

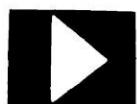
à la
conquête
des
océans



études et entreprise de travaux sous-marins



- Béton immergé
- Reprise en sous-œuvre
- Renforcement d'ouvrages d'art
- Démolition, déroctage
- Soudage, découpage
- Pose de canalisations
- Sondages
- Visite d'ouvrages d'art
- Télévision



DOCUMENTATION ET RÉFÉRENCES VOUS
SERONT COMMUNIQUÉES SUR SIMPLE DEMANDE

**21, RUE DE LA BAUME PARIS 8^e
TEL. 359-64-20, 359-13-61**



Cette scène qu'on croirait tirée de « 20 000 lieues sous les mers » n'est autre qu'un épisode de Précontinent II, expérience menée en mer Rouge en 1963 par l'équipe du commandant Cousteau. Depuis, diverses équipes, françaises, américaines, ou même soviétiques, ont poursuivi l'exploration des possibilités de vie en équipression qui permettront un jour une exploitation rationnelle des richesses du plateau continental.

photo
Les Requins Associés

SOMMAIRE DU N° HORS-SÉRIE

la conquête des océans

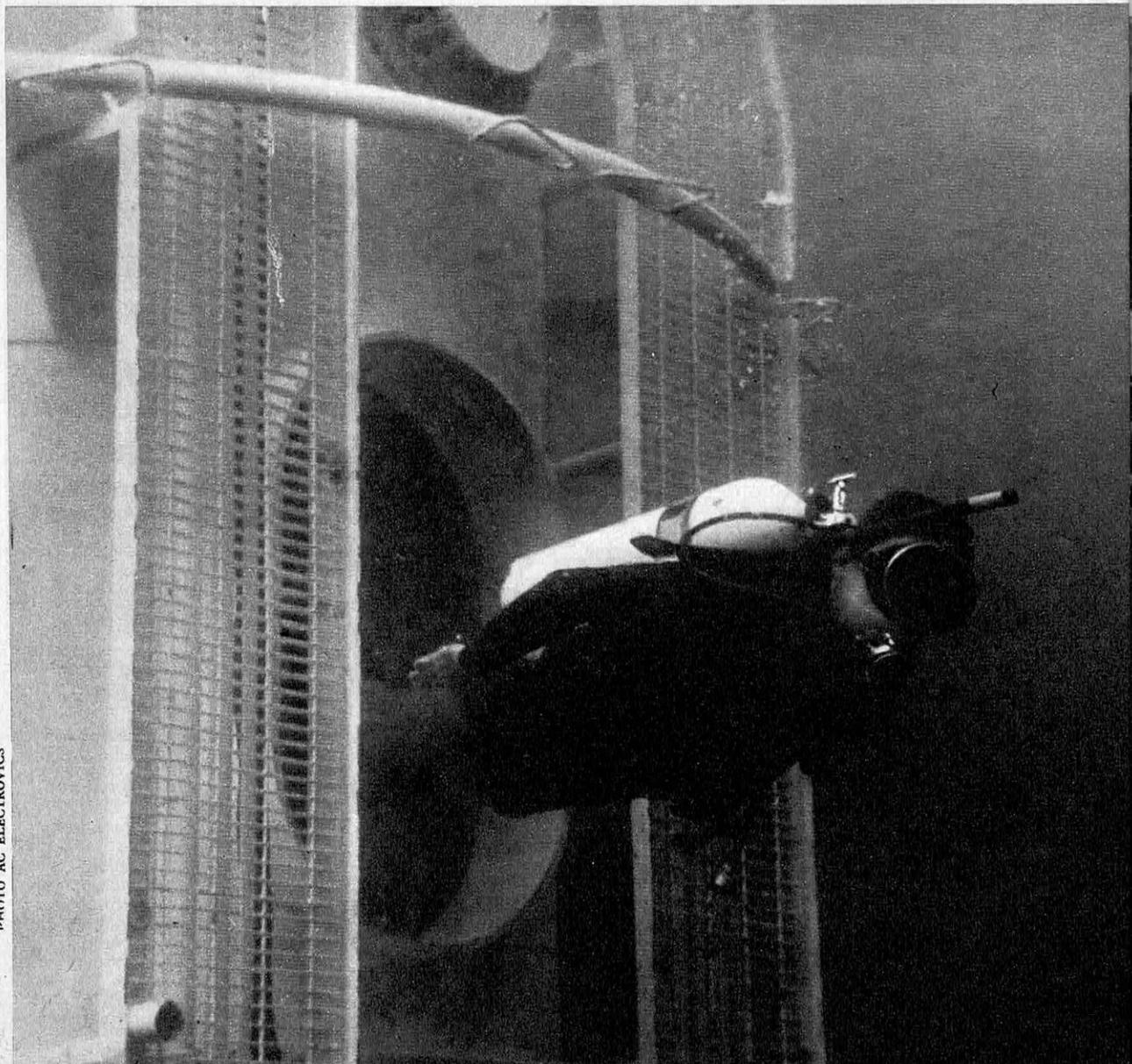
LA CONQUÊTE DES OCÉANS	2
L'OCÉAN, CLEF DE LA GÉOPHYSIQUE	6
LES RESSOURCES MINIÈRES DE LA MER	16
PROSPECTION ET EXPLOITATION DES HYDROCARBURES EN MER	32
LES GISEMENTS D'HYDROCARBURES OFF-SHORE	49
L'HOMME ET LE MILIEU SOUS-MARIN	57
TRAVAILLER SOUS LA MER	74
LA PÊCHE MARITIME	93
AQUICULTURE MARINE	100
LES PROTÉINES DE POISSON	112
DESSALER L'EAU DE MER	118
LES POLLUTIONS MARINES	128
LA GUERRE NUCLÉAIRE SOUS-MARINE	139
L'AVENTURE ARCHÉOLOGIQUE	146
PROBLÈMES JURIDIQUES DE L'EXPLOITATION DES OCÉANS	152

Tarif des abonnements: UN AN. France et États d'expr. française, 12 parutions : 35 F (étranger : 40 F); 12 parutions envoi recom. 51 F (étranger 72 F); 12 parut. plus 4 numéros hors série : 50 F (étranger : 58 F); 12 parut. plus 4 numéros hors série envoi recom. : 71 F (étranger : 100 F). Règlement des abonnements : Science et Vie, 5, rue de la Baume, Paris. C.C.P. PARIS 91-07 ou chèque bancaire. Pour l'Étranger par mandat international ou chèque payable à Paris. Changements d'adresse : poster la dernière bande et 0,60 F en timbres-poste. — Belgique, Grand Duché de Luxembourg et Pays-Bas (1 an) : service ordinaire FB 300, service combiné, FB 450. Règlement à Edimonde, 10, boulevard Sauvinière, C.C.P. 283-76, P.I.M. service Liège. — Maroc : règlement à Sochepress, 1, place de Bandoeng, Casablanca, C.C.P. Rabat 199.75.

Directeur général : Jacques Dupuy. Rédacteur en chef : Jean Bodet. Direction, Administration, Rédaction : 5 rue de la Baume, Paris-8^e. Tél. : Elysée 16-65. Chèque Postal : 91-07 PARIS. Adresse télégr. : SIENVIE PARIS. Publicité : Excelsior Publicité, 2, rue de la Baume, Paris 8^e (Ely 87-46). Correspondants à l'étranger : Washington : « Science Service », 1719 N Street N.W. Washington 6 D.C. New York : Arsène Okun, 64-33 99th Street, Forest Hills 74 N.Y. Londres : Louis Bloncourt, 38, Arlington Road, Regent's Park, Londres N.W.I.

à la conquête des océans

Par Yves LA PRAIRIE
Directeur Général du CNEXO



Notre pays de Terriens est en train d'opérer une reconversion de pensée, d'attitude, quant à son avenir. L'historien a pu déceler, dans notre passé national, toutes les occasions manquées par défaut de réflexe maritime. Or il semble que, depuis quelques années, une prise de conscience collective nous incite à considérer la France comme une sorte de grande presqu'île orientée vers le large, assise sur un « pré-continent » recouvert de quelques dizaines de mètres d'eau, socle qui augmente la superficie du pays d'un tiers.

Pour la première fois dans notre histoire, le Gouvernement et le Parlement ont décidé que l'océan doit être le domaine d'élection d'un grand effort national porteur d'avenir. L'océan n'est plus la limite physique des terres habitées, la frontière d'un monde hostile et encore mystérieux.

A quels mobiles devons-nous attribuer cette mutation psychologique ?

La curiosité scientifique est certes l'un de ces mobiles, mais le goût « de connaître pour connaître » ne suffit pas à lui seul à déterminer la volonté politique de développement océanique que nous voyons manifestée à l'heure actuelle par les grands du monde.

PHOTO M. TOSCAS



Faut-il l'attribuer à des soucis stratégiques ? Il est certain que, depuis l'avènement du vecteur dissuasif le plus efficace à l'heure actuelle, le sous-marin lanceur d'engins à tête thermonucléaire, l'océan est devenu, pour les deux supergrandes puissances mondiales, l'espace stratégique essentiel. L'augmentation du nombre des sous-marins, les problèmes techniques que posent leur navigation, leur guidage et leur détection, nécessitent un accroissement rapide et considérable de la connaissance du milieu et des fonds marins.

Mais une telle nécessité n'explique pas l'effort civil dans le domaine océanique. Le moteur principal est en effet d'ordre économique. Pour les humains, qui seront six milliards en l'an 2000, les ressources des seules terres émergées ne suffiront bientôt plus. Aussi une grande compétition s'engage-t-elle pour la maîtrise du seul espace encore disponible pour une conquête économique : l'océan.

L'eau des océans, que l'industrie sait maintenant dessaler, va pouvoir bientôt fertiliser les zones désertiques, et venir au secours des zones très industrialisées qui manquent de plus en plus d'eau douce. Les saumures résiduelles d'une telle opération représentent une concentration en sels minéraux qui apporte une plus-value économique. L'eau de l'océan contient pratiquement tous les minéraux. La richesse et l'abondance de la matière première permettront à coup sûr d'atteindre prochainement des résultats concrets en ce qui concerne des métaux rares, donc chers, dont se nourrit le développement industriel.

Les ressources minérales sous-marines des plateaux continentaux sont plus directement accessibles économiquement ; la liste s'allonge chaque semaine : charbon, phosphates, potasse, étain, diamants, or, platine, titane, manganèse, fer, se trouvent à portée de l'intervention humaine, parfois dans des conditions d'extraction et de transport plus avantageuses que sur terre. Au-delà des plateaux continentaux, dans les plaines abyssales, on a trouvé de très grandes ressources minérales, constituées notamment de nodules de manganèse répandus sur le sol marin.

Mais le grand responsable de l'effort industriel entrepris depuis plusieurs années au-delà des côtes est le pétrole. Vingt pour cent du pétrole mondial a été extrait en 1968 du sous-sol marin. Dans deux ans, les Etats-Unis retireront du fond marin quarante pour cent de leur pétrole national. Si les réserves terrestres connues sont de l'ordre de 59 milliards de tonnes, soit une trentaine d'années de consommation au rythme 1968, une estimation très grossière des réserves du sous-sol marin donne une probabilité basse de 100 milliards de tonnes, et une hypothèse haute de 200 milliards de tonnes, alors même que l'investigation des grands fonds commence à peine.

Milieu biologique primordial, la mer contient des milliers d'espèces d'êtres vivants. La pêche sort peu à peu du stade d'une économie de « cueillette ». Le perfectionnement

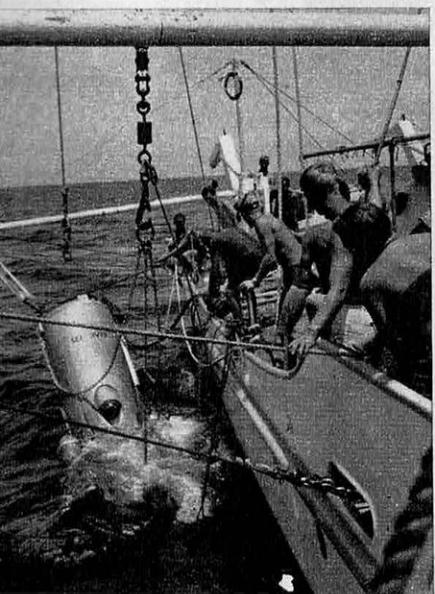


PHOTO STENDT



PHOTO M. TOSCAS

des méthodes de pêche, la modernisation et l'automatisation des navires, vont se poursuivre et s'amplifier. Mais c'est de l'aquiculture que viendra la véritable révolution, prolongeant la terre des hommes par des « fermes » d'élevage sous-marines dont le rendement à l'hectare surprendra plus d'un sceptique.

L'intérêt porté dans le monde entier à l'exploration et à l'exploitation des océans s'inscrit ainsi dans la logique des faits et des besoins. L'intérêt qu'y porte la France trouve dans cette même logique les raisons d'un effort tenace, soutenu, patient, qui s'exerce selon une politique à la fois réaliste et réalisable.

Comme il n'est pas possible de tout entreprendre simultanément, le Centre National pour l'Exploitation des Océans a reçu la mission de déterminer la priorité des objectifs et d'éviter que l'on disperse les efforts dans toutes les directions. C'est pourquoi le programme national d'orientation « Océan » est construit selon des thèmes « orienteurs » déterminés en fonction des perspectives d'exploitation. Les opérations entreprises pour mettre en œuvre ce programme, cadre général du développement océanique français, permettent d'avancer chaque fois vers la réalisation d'objectifs concrets.

Si nous n'avons pas de cosmonautes, si nous connaissons mal les problèmes d'environnement que pose la conquête spatiale, nous avons par contre les premiers océanautes du monde, et nous sommes incontestablement mieux outillés que dans d'autres domaines pour répondre à un « défi » caractéristique de notre temps.

Mais, en même temps, nous abordons un monde sans frontières. Aucune partie du monde n'est, par définition, plus internationale que ne l'est la mer. Des coopérations s'engagent. La France et les Etats-Unis se sont portés coauteurs à l'Assemblée Générale des Nations Unies du projet de décennie internationale pour l'exploration des océans.

Sous de tels auspices de volonté gouvernementale et de collaboration entre pays, s'engagent la découverte et la mise en valeur du « sixième continent », la chance du XXI^e siècle.



PHOTO M. TOSCAS

LES FONDS MARINS DANS LA GÉOPHYSIQUE MODERNE

Voici environ deux siècles que l'homme a vraiment commencé à étudier la surface de la Terre d'une manière scientifique. Depuis, des milliers de géologues et physiciens ont cherché à comprendre son évolution et à déchiffrer son histoire. Pourtant, en dépit des brillantes hypothèses et théories avancées, la science de la Terre n'avait pas dépassé un stade très primitif. La profondeur de notre ignorance est bien illustrée par le fait que les chercheurs étaient incapables d'arriver à un accord sur l'amplitude des mouvements qui affectent la surface terrestre. Certains soutenaient que les mouvements principaux étaient surtout verticaux et ne dépassaient que rarement quelques kilomètres. D'autres, au contraire, estimaient que les manifestations géologiques observées sur les continents impliquaient des mouvements différentiels de plusieurs milliers de kilomètres des blocs continentaux les uns par rapport aux autres. Bien sûr, depuis longtemps, certains esprits imaginatifs avaient émis l'hypothèse que les continents eux-mêmes étaient mobiles et que cette mobilité était la cause des zones de déformation situées sur le pourtour des principaux blocs. En effet, au géologue qui examine les continents, ceux-ci apparaissent comme une mosaïque de blocs de plusieurs centaines ou plusieurs milliers de kilomètres de large dont l'âge peut atteindre trois milliards d'années. Ces blocs sont fréquemment ceinturés par des zones de déformations assez étroites, d'âge variable, et qui semblent avoir été plissées et comme plaquées autour de ces blocs principaux.

Dès la fin du XIX^e siècle, Suess avait montré qu'il était beaucoup plus facile de rendre compte de la géologie des continents de

l'hémisphère Sud si l'on admettait qu'ils étaient dus à la désintégration d'un continent primitif qu'il nomma *continent de Gondwana*. Wegener donna à l'hypothèse de la dérive des continents le statut d'une hypothèse de travail sur laquelle une génération de géologues bâtirent leurs recherches. Il assembla et publia un arsenal impressionnant de faits géologiques, climatologiques et paléontologiques, pour montrer que les continents tels que nous les connaissons étaient dus au morcellement d'un immense continent primitif, dit « Pangea ». Ce morcellement se serait produit depuis le Triasique, c'est-à-dire depuis 200 millions d'années. Malheureusement, si le faisceau d'indices utilisés par Wegener pour reconstituer le puzzle initial était impressionnant, ils ne pouvaient à eux seuls emporter la conviction de la grande masse des géologues. D'autre part, les géophysiciens, en particulier Sir Harold Jeffreys, montrèrent rapidement que le mécanisme de dérive proposé par Wegener était physiquement impossible. Les continents n'étaient pas de grands radeaux glissant sur une croûte océanique quasi fluide, sous l'influence des forces dues à la rotation de la Terre. Aussi la plupart des chercheurs préférèrent-ils laisser inexplicés les indices proposés par Wegener, par exemple le fait que des morceaux de l'hypothétique continent de Gondwana, comme l'Inde, l'Australie et l'Afrique du Sud, maintenant situés près des Tropiques ou de l'Équateur, avaient subi, il y a 300 millions d'années, des glaciations intensives, comparables à celle affectant l'Antarctique de nos jours, ou bien encore le fait que la forme géographique comme la géologie de l'Amérique du Sud et de l'Afrique se correspondent exactement lors-



DESSIN DE PLANQUE

Un fossé profond, le rift, occupe la partie centrale de la chaîne médioatlantique.

qu'on emboîte ces deux continents, en refermant, en quelque sorte, l'Atlantique.

Pourtant, il y a vingt ans, une nouvelle série d'arguments, venus cette fois de la géophysique, renforçaient considérablement la position des « dériveurs ». A la suite des travaux de savants comme le professeur Thellier, on avait appris à reconnaître et mesurer le magnétisme en quelque sorte « gelé » dans les roches au moment de leur formation. En effet, si nos roches n'ont pas été depuis déformées ou réchauffées à de fortes températures, elles peuvent avoir gardé l'aimantation initiale qui leur a été imposée par le champ magnétique terrestre régnant à l'époque de leur formation. Or, si les roches géologiquement récentes ont une aimantation correspondant à celle du champ magnétique actuel, les roches plus anciennes présentent des directions d'aimantation discordantes et qui ne peuvent être réconciliées qu'en admettant, soit que les continents ont depuis parcouru de grandes distances à la surface du globe, soit que le champ magné-

tique terrestre a depuis changé de nature. Or les déplacements que l'on est amené à supposer sont essentiellement ceux qu'avaient proposés les protagonistes de la dérive depuis Suess et Wegener. Les mesures paléomagnétiques indiquent, par exemple, que l'Inde devait se trouver au voisinage du pôle Sud au moment des grandes glaciations de la fin de l'ère Primaire.

Cette nouvelle série de faits était suffisamment troublante pour remettre l'hypothèse de la dérive en vogue parmi les géologues et les géophysiciens. Mais cette hypothèse était encore âprement controversée car le mécanisme de la dérive restait totalement inexpliqué.

La théorie tectonique des grandes plaques

Grâce aux découvertes faites durant ces dix dernières années dans les océans, il semble que nous ayons enfin saisi comment la terre



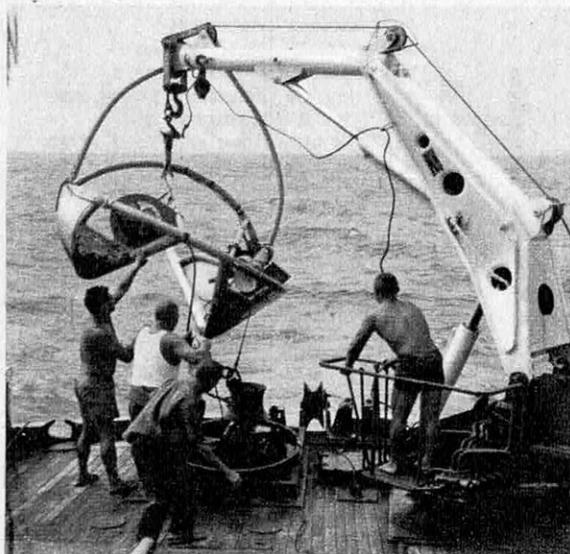
solide se comporte et compris le mécanisme de cette dérive. Oui, la croûte terrestre est mobile, les continents se déplacent et l'on sait comment déterminer leurs mouvements. L'erreur principale de Wegener avait été de considérer les continents comme seuls mobiles sur une croûte océanique fluide et passive. Or ce sont les continents qui sont passifs, tandis que le moteur de la dérive se trouve au fond des océans.

Les recherches géophysiques des trois dernières décades, en particulier celles qui étudient la propagation des ondes sismiques à l'intérieur de la Terre, avaient montré qu'en première approximation on pouvait identifier trois zones concentriques principales à la surface de la Terre. La première, la *lithosphère*, a environ 50 à 100 kilomètres d'épaisseur et comprend donc la croûte continentale (30 à 50 km d'épaisseur), à plus forte raison la croûte océanique (6 km d'épaisseur), et la partie superficielle du manteau supérieur. Elle se comporte essentiellement comme un corps rigide et élastique. Au-

dessous se trouve une couche de plusieurs centaines de kilomètres d'épaisseur, où les solides, bien que rigides pour des forces s'exerçant pendant de très courtes périodes, sont capables de « fluer », de couler, lorsque des forces s'exercent pendant de longues périodes. A l'échelle des temps géologiques, cette couche est donc « sans résistance ». C'est l'*asthénosphère*. Enfin, vers 700 ou 800 kilomètres de profondeur, la viscosité du manteau s'accroît beaucoup et tout mouvement à grande échelle est pratiquement interdit dans cette zone. Géologiquement, cette couche, la *mésosphère*, est inerte.

Tout se passe donc comme si la surface de la Terre était couverte par une mince pellicule rigide, la *lithosphère*, supportée par une couche plus épaisse, l'*asthénosphère*, qui se comporte, à l'échelle des temps géologiques, comme un fluide.

Il est frappant de constater que les zones à la surface du globe le long desquelles se manifestent des mouvements violents sont relativement très étroites. Les tremblements



*Photographiées
par quelque 3 000 mètres de fond,
aux approches de la dorsale
médioatlantique,
par la « troïka » du commandant Cousteau,
engin photo ou cinéma
pouvant opérer
par des fonds de 8 000 m,
des coulées de lave témoignent
de l'activité volcanique développée
au niveau du rift.*

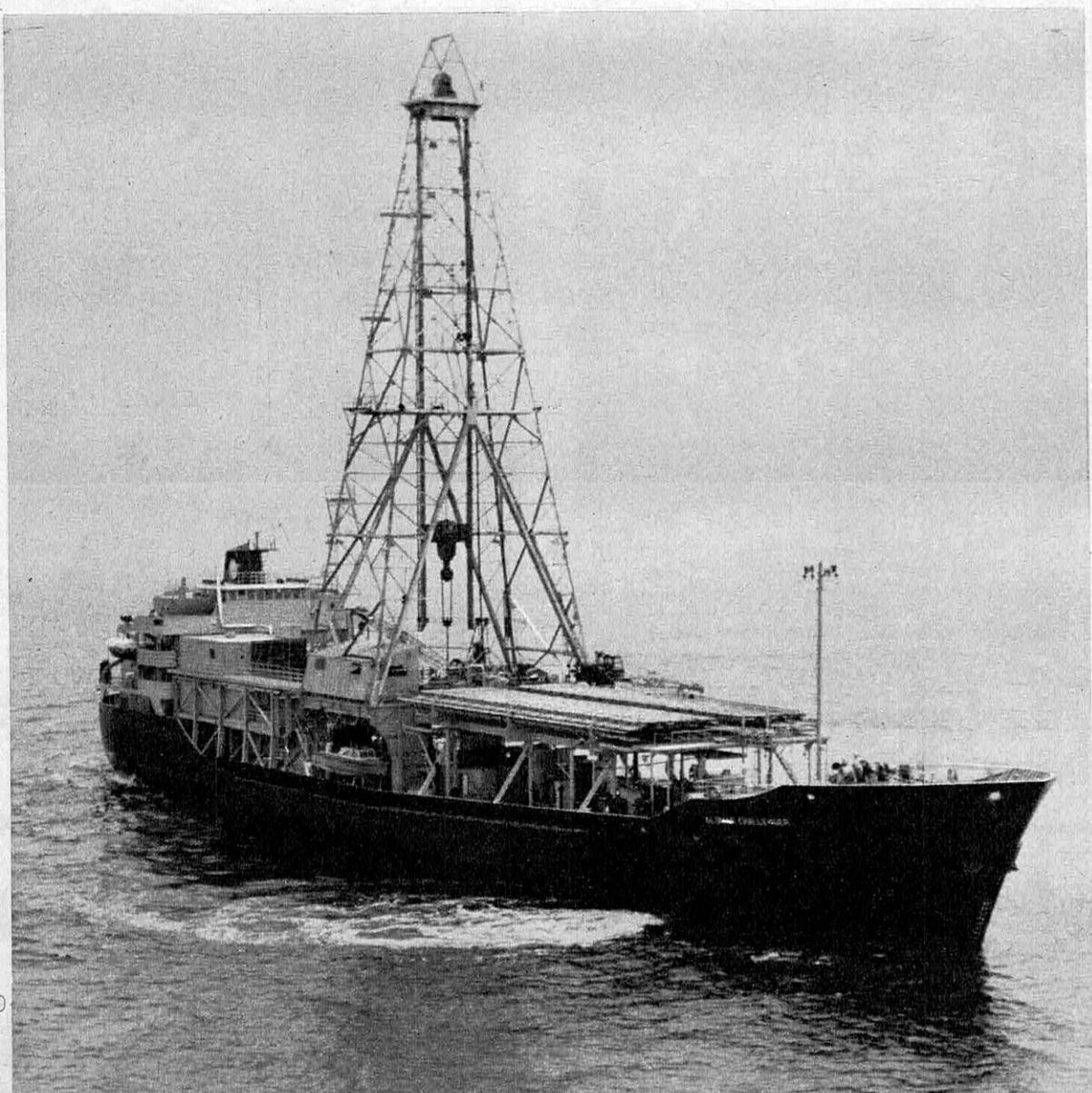


de terre, les volcans et les chaînes de montagnes activement plissées se trouvent associés à l'intérieur de quelques zones étroites ceinturant de grandes plaques essentiellement asismiques et tectoniquement inactives. Sur une carte de la sismicité du globe, on peut distinguer trois principales zones ou ceintures. La *ceinture circumpacifique*, longtemps appelée « ceinture de feu du Pacifique », est marquée par une ligne continue de foyers de tremblements de terre, de volcans, de failles et de chaînes plissées, sauf le long de la partie Sud du Pacifique. La *ceinture alpino-himalayenne*, qui s'étend depuis les Açores, à travers la Méditerranée, la Turquie et, par delà le Thibet, rejoint la ceinture circumpacifique par l'arc d'Indonésie. Enfin, une ligne moins active de séismes peu profonds parcourt le milieu des océans et est associée à une chaîne de montagnes sous-marines, la *dorsale médicoocéanique*. Les deux premières zones sont fréquemment caractérisées par des séismes profonds, pouvant se produire jusqu'à près de 700 km de

profondeur, alors que la zone sismique médicoocéanique n'est marquée que par des séismes superficiels (se produisant au plus à quelques kilomètres de la surface).

L'hypothèse fondamentale, somme toute assez logique, a été d'admettre que ces lignes sismiques marquaient les limites de quelques grandes plaques de lithosphère, très minces mais rigides, se déplaçant les unes par rapport aux autres en glissant au-dessus de l'asthénosphère. La surface de la Terre ne serait donc qu'une immense mosaïque de plaques en déplacement et les ceintures tectoniquement actives marqueraient les zones d'interaction de ces plaques. Il est important de remarquer que ces plaques de lithosphère peuvent comprendre aussi bien des parties de continent que des parties d'océan car la lithosphère est beaucoup plus épaisse que la croûte océanique ou même que la croûte continentale.

Pratiquement, trois cas peuvent se présenter. Dans le premier cas, deux plaques entrent en collision. S'il s'agit de plaques



océaniques, il y a compression et enfoncement de l'une des plaques à l'intérieur du manteau, enfoncement qui produit en surface une fosse océanique. C'est le cas surtout de la zone circumpacifique. S'il s'agit de plaques continentales, il y a compression mais pas enfoncement du bloc continental, trop léger. Ceci se traduit donc par un rétrécissement de la zone tampon. C'est le cas surtout de la zone alpino-himalayenne.

Dans le second cas, deux plaques s'écartant l'une de l'autre, le vide entre les deux plaques est rempli par du matériau nouveau très chaud montant de l'asthénosphère. Il y a création d'une nouvelle zone océanique, et ceci peut aussi bien se produire entre deux continents (cas de la mer Rouge) qu'entre deux océans (cas de la chaîne sous-marine médioatlantique).

Dans le troisième cas enfin, les deux plaques peuvent glisser le long d'une frontière commune. Les seuls mouvements le long de cette frontière sont alors des mouvements de cisaillement, sans compression ni exten-

sion. C'est le cas, par exemple, de la faille de Saint-André en Californie.

Le premier cas, qui conduit à l'enfoncement de plaques de lithosphère sur de fortes épaisseurs, explique l'existence de séismes profonds. Dans les deux autres cas, on ne doit s'attendre qu'à une activité sismique superficielle.

Le renouvellement des fonds

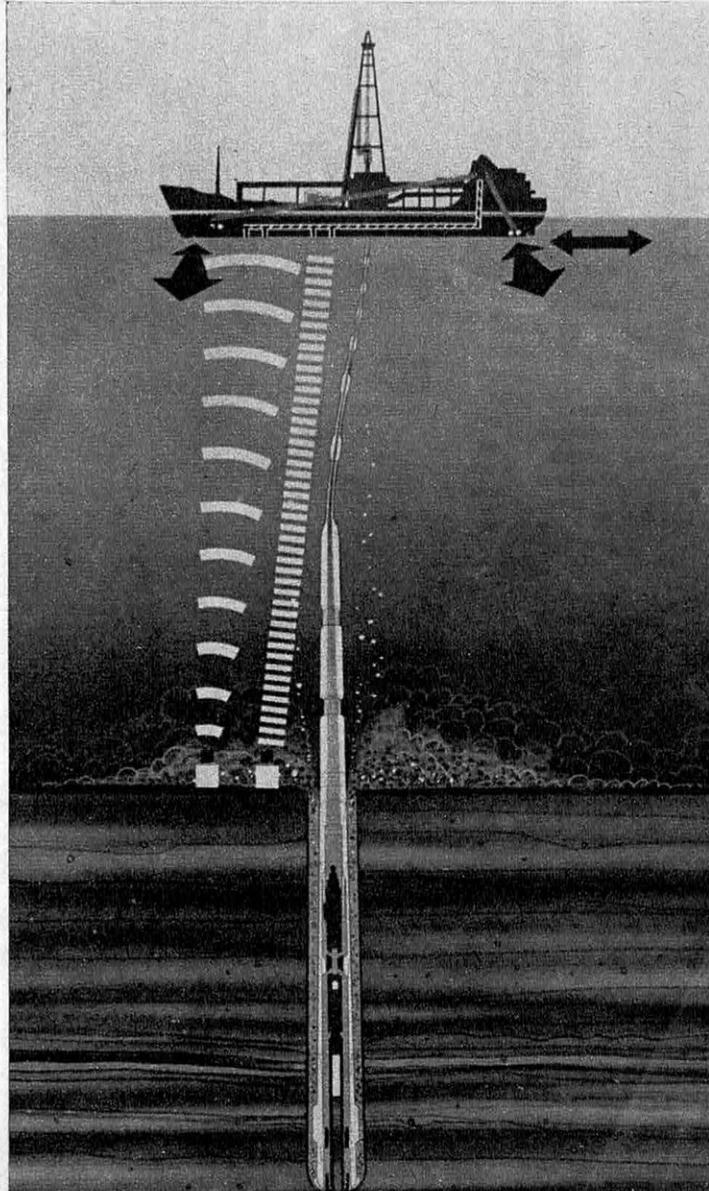
Ce schéma très simple et pourtant tout récent (il a moins de dix-huit mois) n'a pu être établi que grâce à la découverte du mécanisme de renouvellement des fonds océaniques. Ce mécanisme est celui par lequel, lorsque deux plaques s'écartent, le vide créé se trouve rempli par un fond océanique nouveau. Proposé pour la première fois en 1960 par le professeur Hess, il n'était considéré à l'époque par son auteur que comme un schéma très grossier.

En effet, avant qu'on explorât les océans, géologues et géophysiciens avaient extrapolé

Le Glomar Challenger
est le premier représentant
d'une génération
de navires de forage lourds
pour explorations géophysiques
en haute mer.
En avant du derrick central,
de près de 50 m de haut,
on remarque le « râtelier » où sont stockées
les tiges de forage,
8 000 m au total.
Les remous vers l'avant du navire
sont provoqués par les
moteurs auxiliaires de positionnement.

Le système de positionnement dynamique
adopté par les constructeurs
du Glomar Challenger
est bâti autour d'un ordinateur.
Celui-ci, alimenté par des signaux sonar
émis ou réfléchis par le fond,
calcule les écarts
par rapport à la position idéale
et commande leur correction
par les propulseurs auxiliaires.

DOCUMENT I.P.S.



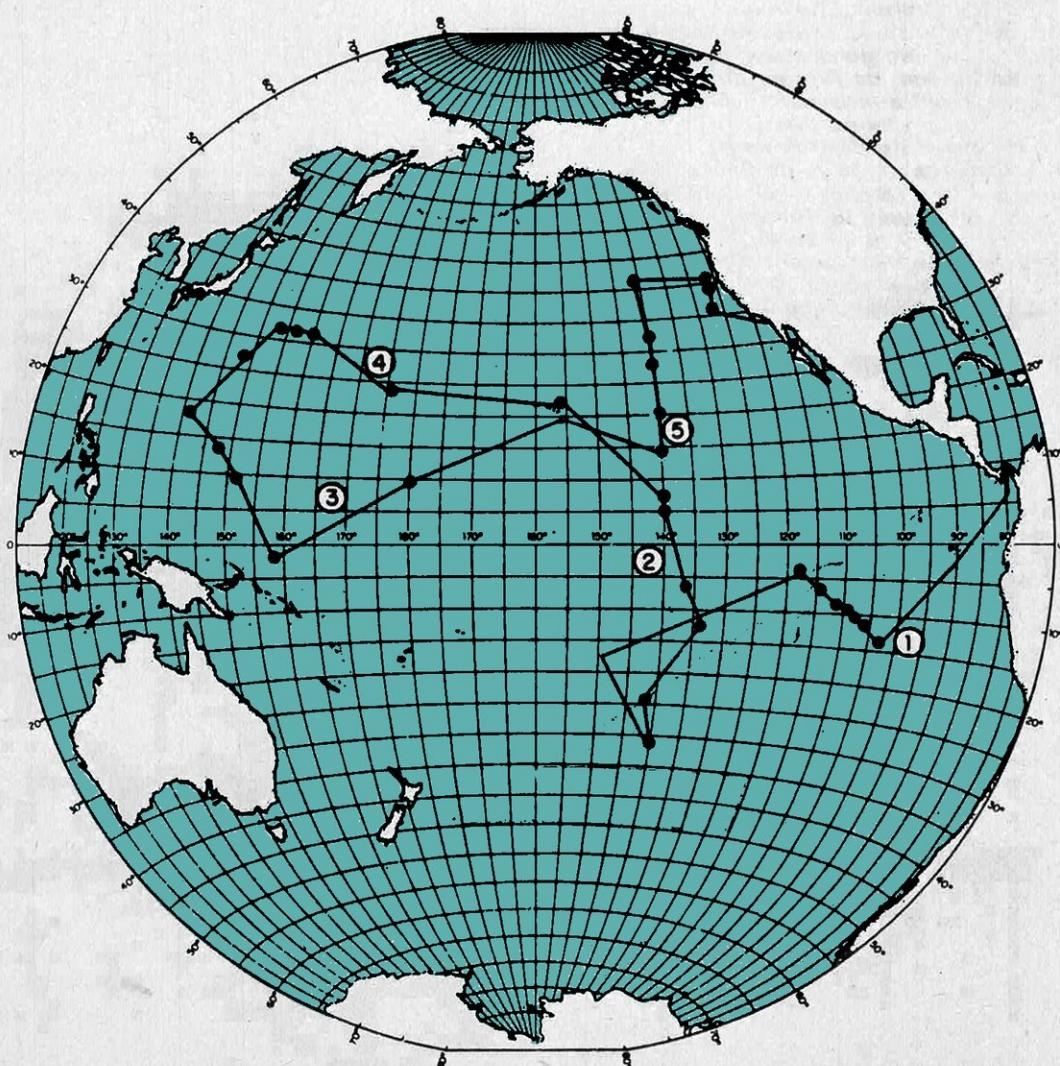
la structure des continents à celle des océans. Ainsi, Daly avait prédit en 1933 que la croûte océanique devrait avoir 74 kilomètres d'épaisseur et consister de basalte, et Kuenen (1946) estimait qu'il devait s'y être accumulé 12 kilomètres de sédiments durant les trois milliards d'années de son existence. Or les travaux d'exploration des océanographes américains, comme Ewing, et anglais, comme Hill, montrèrent que la croûte océanique n'était qu'une mince pellicule de 6 kilomètres d'épaisseur, qui semblait avoir été obtenue par altération et modification des roches du manteau supérieur immédiatement sous-jacent. Au lieu de 12 kilomètres de sédiments, on n'en trouva en moyenne que 300 mètres. Au lieu de roches ayant jusqu'à 3 milliards d'années, les plus anciennes qu'on draguait du fond des océans ne dépassaient pas cent à deux cents millions d'années. Bien plus, il semblait que la couverture sédimentaire allait en s'aminçissant régulièrement depuis les bordures continentales jusqu'à la crête de cette chaîne

de montagnes sous-marines, la dorsale médioocéanique.

Car, entre-temps, les océanographes Heezen et Ewing avaient découvert l'existence de cette chaîne de montagnes longue de plus de 40 000 kilomètres, large de plus de 2 000 kilomètres et s'élevant à deux kilomètres au-dessus des bassins adjacents. Cette dorsale est parcourue en son centre par un fossé profond de 2 kilomètres en moyenne, large d'une vingtaine, et dans lequel se trouve située toute l'activité sismique peu profonde notée dans les océans.

Ce fut le trait de génie de Hess de supposer que ce fossé profond, ce *rift*, était l'ouverture par laquelle montaient les laves en fusion entre les deux portions de croûte océanique qui s'écartaient de chaque côté. Ainsi, dans l'Atlantique, proposait Hess, le rift voyait la création de quelque deux centimètres de croûte océanique nouvelle tous les ans, et l'Europe et l'Amérique du Nord s'écartaient donc de la même distance chaque année. Ceci ne nécessitait aucune

DOCUMENT I.P.S.



Sur ces planisphères sont indiquées les principales étapes et les positions de forage

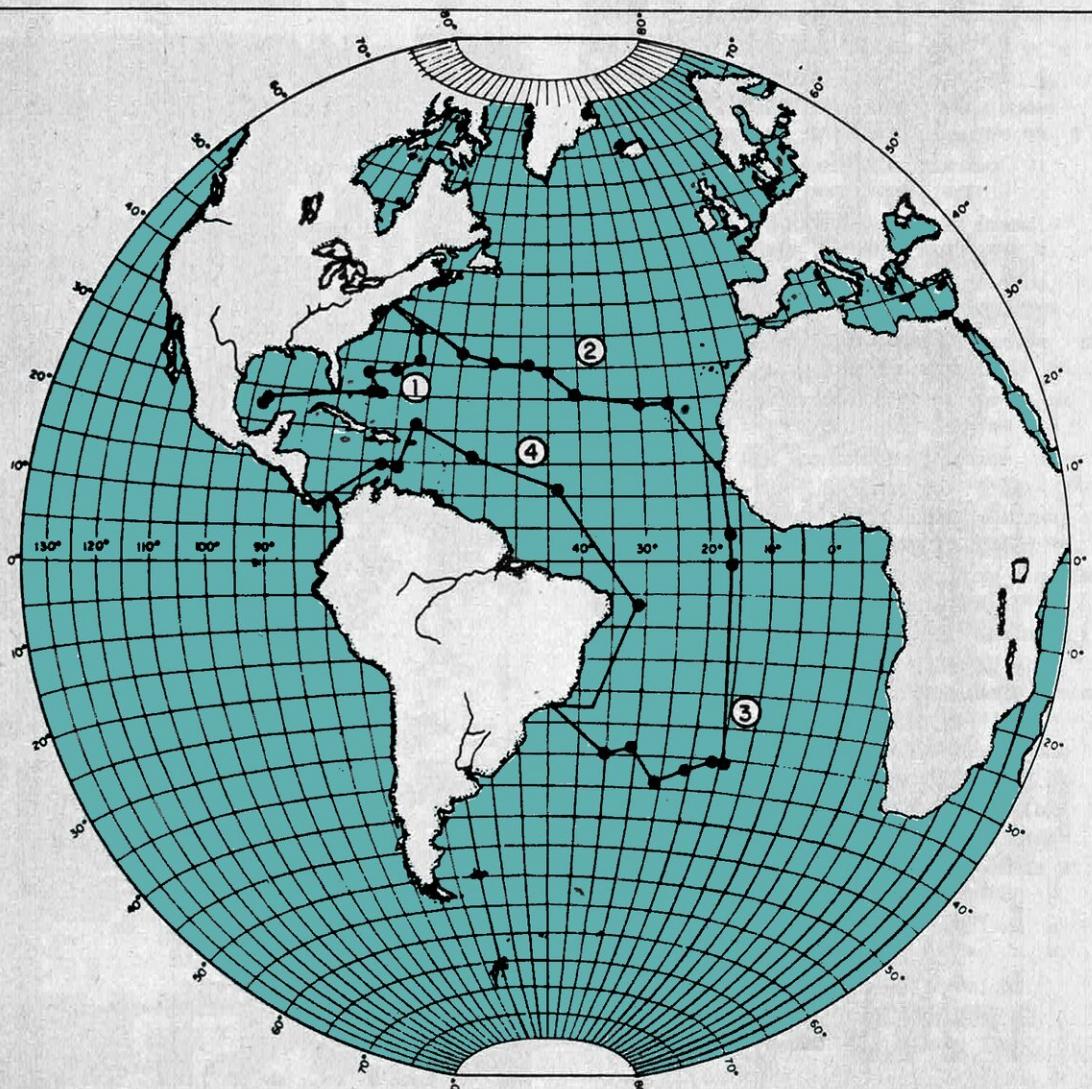
déformation des bassins océaniques ou des continents. Le moteur de la dérive se trouvait au fond de l'Atlantique et le géologue, examinant le continent, n'en pouvait constater aucun effet. Dans le Pacifique, au contraire, Hess proposait que la croûte océanique s'enfonçait comme un tapis roulant le long des grandes fosses. Ainsi la nouvelle croûte créée à partir du manteau le long des rifts se retrouvait à l'intérieur du manteau le long des fosses océaniques. Un cycle complet demandait cent à deux cents millions d'années, ce qui expliquait l'extrême jeunesse géologique des bassins océaniques.

Cette hypothèse, appelée par un autre géologue, Dietz, *sea floor spreading hypothesis*, littéralement *hypothèse de l'étalement des fonds*, fut, en dépit de son élégance, d'abord rejetée par la plupart des océanographes. En effet, si elle résolvait le paradoxe de l'âge des océans tout en fournissant une explication de cette fameuse dérive des continents, son audace même nécessitait qu'on découvrît des preuves plus solides en sa faveur. En tout

premier lieu, il fallait un marqueur capable de fournir l'âge de la croûte océanique en tout point, et donc de vérifier que cet âge allait en croissant à partir des rifts.

Ce marqueur, proposèrent Vine et Matthews, deux géologues de Cambridge, nous est fourni par les anomalies magnétiques. En effet, le champ magnétique terrestre s'inversant périodiquement d'une manière apparemment aléatoire, il devait en résulter que lorsque la nouvelle croûte océanique se forme le long du rift, elle se trouve aimantée alternativement de manière positive et négative. Il devait donc y avoir le long du rift de grandes bandes d'anomalies alternativement positives et négatives et dont la largeur reflète la chronologie des inversions du champ magnétique terrestre. Il était donc possible d'en déduire l'âge de la croûte et la vitesse à laquelle elle se forme le long du rift.

L'hypothèse de Vine et Matthews fut presque immédiatement vérifiée d'une manière extraordinaire. Partout on découvrait,



parallèles au rift, des bandes d'anomalies magnétiques à partir desquelles on a pu déterminer près de la moitié de la surface des océans. Les taux de renouvellement des fonds à l'axe des dorsales ont pu être ainsi mesurés tout le long du rift ; ils varient de 2 à 12 centimètres par an.

La synthèse tectonique globale

Nous avons donc maintenant tous les éléments nécessaires pour établir pour la première fois un modèle cinématique quantitatif de la surface de la Terre. Ayant reconnu le mécanisme par lequel les grandes plaques se séparent le long des rifts, il est en effet possible de calculer la géométrie de ce mouvement d'écartement. On peut donc prédire le mouvement d'un point d'une plaque par rapport à un point de la plaque adjacente et, de proche en proche, déterminer non seulement la vitesse et la direction des mouvements d'expansion, mais aussi celles des mouvements de compression ou de glissement. On peut ainsi calculer que, dans la fosse du Japon, la croûte océanique s'enfonce à la vitesse de 10 centimètres par an. On peut aussi calculer que la Californie glisse vers le Nord à la vitesse de 6 centimètres par an, entraînant l'ouverture progressive du golfe de Californie.

On peut d'autre part comparer la direction et le taux de ces mouvements à ceux indiqués par les mouvements de dislocation à l'origine des séismes. On a pu ainsi montrer qu'il s'agissait bien d'extension le long des rifts et de compression le long des fosses. Toute la sismicité du globe se trouve expliquée et, pour la première fois, nous disposons d'un cadre dans lequel il est possible de prédire les quantités d'énergie respectives qui seront dissipées dans les diverses zones tectoniques. C'est là une avance importante vers la prédiction des tremblements de terre.

Enfin, il semble que nous ayons les éléments nécessaires pour reconstituer l'évolution géologique du globe. Tant que le mécanisme tectonique fondamental n'avait pas été découvert, il était vain de vouloir comprendre dans le détail cette évolution. Déjà, nous avons reconnu que cette expansion des fonds était épisodique, s'arrêtant et reprenant, d'une manière globale, sur toute la surface du globe. Il semble que la fin des épisodes d'expansion coïncide avec les paroxysmes orogéniques, c'est-à-dire les périodes de compression maximum. Tout se passe comme si les mouvements différentiels entre les grandes plaques ne pouvaient plus alors être absorbés dans les fosses océaniques.

Ils sont alors d'abord absorbés dans les zones compressives continentales adjacentes, puis doivent s'arrêter jusqu'à ce qu'un nouveau système de fosses océaniques ait été créé. Un énorme effort de réinterprétation de toutes les données géologiques et géophysiques est maintenant en cours, et il est trop tôt pour en prédire toutes les conséquences. Mais nous savons qu'il s'agit d'une véritable révolution des sciences de la Terre.

Des implications pour l'océanographie profonde

Il est toutefois un domaine dans lequel on peut déjà reconnaître l'impact énorme produit par cette nouvelle théorie : c'est celui de la géologie et de la géophysique des grands fonds marins. On sait qu'un navire foreur capable de prélever des carottes par 6 000 mètres de fond a été armé par la National Science Foundation des Etats-Unis pour vérifier précisément l'exactitude de cette théorie du renouvellement des fonds. Ce navire,



le *Glomar Challenger*, est capable d'obtenir sous la couche des sédiments (à condition qu'elle ne dépasse pas 1 000 mètres d'épaisseur) un échantillon du socle rocheux, et cela avec un maximum de 6 000 mètres de tube. Les forages déjà exécutés dans l'Atlantique Nord et Sud ont bien vérifié que l'âge du socle rocheux allait en diminuant depuis le pied des marges continentales (il dépasse 140 millions d'années au large de la Floride), jusqu'au rift où la roche est contemporaine. A la grande surprise de nombreux géologues, le *Glomar Challenger* découvrit l'existence de pétrole par 3 400 mètres de fond au milieu du golfe du Mexique. Ce pétrole était associé aux roches recouvrant un dôme de sel tout à fait semblable à ceux qui parsèment la marge continentale du Texas. Dans la théorie de la dérive des continents par expansion des fonds, ce fait n'a rien de surprenant. Lorsque, il y a 200 millions d'années environ, le golfe du Mexique commença à s'ouvrir, au fur et à mesure que les marges s'enfonçaient, les dépôts sédimentaires s'y accumulaient extrêmement rapide-

ment. Les dépôts lagunaires caractérisant cette période amenèrent la formation d'une couche de sel, le *Louann Salt*. Puis, l'enfoncement de cette croûte nouvellement créée étant plus rapide que le taux de déposition des sédiments, une mer profonde envahit la dépression. Ces conditions sont précisément celles favorables à la formation de réserves importantes de pétrole. Elles contrôlent la répartition des réserves sur les marges de l'Afrique de l'Ouest, du Brésil, du Labrador, etc. De nos jours, elles contrôlent la formation des dépôts sédimentaires de la mer Rouge qu'on peut considérer comme étant très semblable à ce qu'était l'océan Atlantique durant le Jurassique, il y a 140 millions d'années.

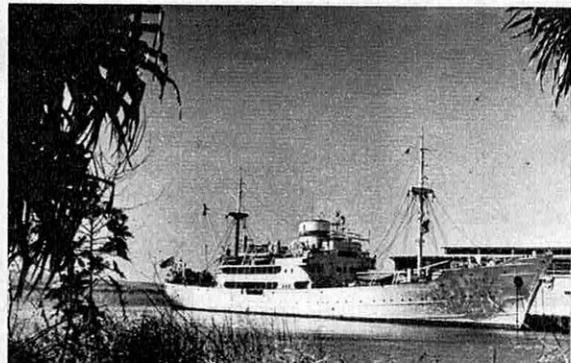
On peut donc s'attendre à découvrir des quantités de pétrole importantes au pied des marges formées par l'écartement des continents ou l'effondrement de leurs bords. Au large de Toulon existent des dômes que le professeur Glangeaud pense être des dômes de sel. Il n'est pas impossible qu'ils soient associés à du pétrole. De même, des structures diapiriques existent sur la pente du plateau de Gascogne. Pour la première fois, la théorie fournit un schéma cohérent pour la formation de ces réserves de pétrole. Elle devrait donc permettre de mener les recherches plus logiquement.

Un autre aspect économique non négligeable est l'association du rift avec des réserves de minéraux rares (soufre, cuivre, or, argent, etc.), dus probablement à l'action d'émanations du manteau. Ceci a été démontré de manière spectaculaire dans les rifts de la mer Rouge où des concentrations énormes et exploitables de ces minéraux ont été découvertes.

Ainsi, en quelques années, cette théorie a pu intégrer et expliquer un ensemble de faits géologiques, géophysiques et géochimiques d'une variété extraordinaire, les réunissant en un tout, en une seule science de la Terre. On est encore loin d'en avoir tiré toutes les conséquences, mais déjà certains résultats pratiques importants apparaissent, comme la prédiction des tremblements de terre, la localisation des réserves de pétrole profondes et des ressources minières en mer. Surtout, la naissance de cette théorie a montré que c'est faute d'avoir fait les efforts nécessaires pour l'exploration de l'espace océanique, qui couvre les deux tiers de la planète, que l'homme s'était condamné jusqu'ici à ne rien comprendre à la structure des continents sur lesquels il vit.

Xavier LE PICHON

Conseiller Scientifique au CNEXO



Ces dernières années, les navires soviétiques ont effectué diverses campagnes de géophysique, dans l'Atlantique et sur le rift de l'océan Indien. Ci-contre, la goélette amagnétique Zaria; de haut en bas, le Vitiaz et l'Akademik Kourtchatov.

LA MER SOURCE DE MINERAUX

Le sel marin est encore, et de loin, le principal composé minéral tiré des océans (photo ci-contre), mais demain peut-être saura-t-on exploiter les phosphorites reposant par 800 à 1 000 m de fond au large des U.S.A. (photo à droite).

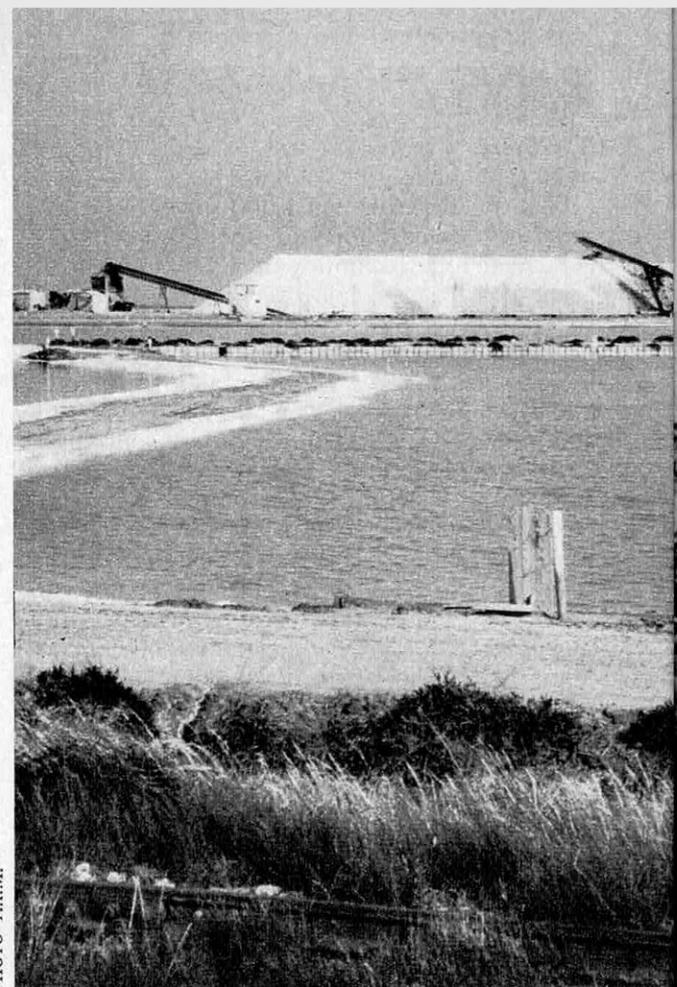


PHOTO T.A.M.

Les richesses de la mer ont depuis longtemps fait rêver plus d'un esprit aventurier, mais ce n'est que tout récemment que le monde des affaires a décidé de s'intéresser à ces ressources.

On sait que l'Océan contient un nombre considérable de minéraux, sous forme de dépôts ou à l'état dissous. Cependant, à l'heure actuelle, on considère qu'un nombre encore restreint de ces substances est susceptible d'être exploité de manière rentable.

En 1969, nous en sommes encore au tout début de l'exploration systématique des fonds marins, et les procédés adéquats de recherche océanologique et de récupération des échantillons commencent à peine à être disponibles, ou sont en gestation. Mais le développement de la technique suit un rythme extrêmement rapide, qui n'est pas sans rappeler celui du développement des techniques de l'espace.

D'un autre côté, un certain nombre de gisements terrestres sont sur le point d'être épuisés, ou doivent faire face à une demande toujours accrue de la part de notre société industrielle. Ceci explique l'intérêt grandissant que portent les grands groupements industriels aux substances minérales sous-marines, intérêt manifesté par la création de fi-

liales de recherches déjà nombreuses, afin d'être « dans le train » au moment où les conditions d'exploitation deviendront effectivement rentables.

Ainsi, un ensemble de facteurs convergents font que la situation actuelle, caractérisée par une position d'attente, est sur le point d'évoluer assez rapidement pour provoquer la mutation de l'activité minière sous-marine du stade parcellaire et artisanal, qui est le sien actuellement, à un niveau vraiment industriel.

Dans cette étude, nous nous efforcerons de donner un panorama des substances minérales à valeur économique réparties au sein des océans (hydrocarbures exceptés), des exploitations actuelles, des méthodes d'exploration et de récupération, et des possibilités d'avenir.

L'ultime réceptacle

En utilisant une image quelque peu triviale, on peut dire que la mer est la « poubelle » du globe terrestre ; depuis la constitution de l'Hydrosphère (Océan mondial), c'est l'ultime réceptacle de toutes les substances de l'écorce terrestre. Les facteurs d'érosion — pluie, vent, drainage fluviatile — rongent in-



lassablement les terres émergées. Annuellement, les rivières et les fleuves déversent dans la mer des centaines de millions de tonnes de matériaux d'origine continentale. Ces derniers vont des particules de moins en moins grossières qui constituent les graviers, les sables et les vases (appelés encore **sédiments détritiques**), jusqu'aux substances dissoutes.

En ce qui concerne les particules, plus elles sont fines, plus elles ont tendance à se déposer loin des rivages ; d'où, très schématiquement, un classement dans le sens rivage → grands fonds océaniques, si l'on ne tient pas compte des avancées et reculs successifs des traits de côtes au cours de l'histoire géologique. A toutes ces substances d'origine continentale s'ajoutent des éléments purement sous-marins, produits par les fumerolles, les sources et le volcanisme sous-marins, ainsi que des matériaux extra-terrestres comme les poussières météoriques (sphérolites cosmiques).

Si on y ajoute les matériaux d'origine biologique, et divers gisements de la partie immergée des socles continentaux, on a pu dire que les ressources minérales des océans étaient fabuleuses, et même inépuisables. D'un point de vue global, c'est assez vrai,

mais il faut tenir compte des énormes surfaces et volumes (plus de 360 millions de km² et environ 1 370 millions de km³) que représente l'Océan mondial. A ces facteurs restrictifs s'ajoute une répartition très variable de ces substances et de grandes fluctuations quant à leur concentration.

Du fait de leur nature variée et de leur répartition inégale, il est commode de classer les gisements (au sens large du terme) des différents minéraux présents dans le domaine océanique, suivant leur environnement :

- l'eau de mer elle-même ;
- les gisements du substratum du plateau continental, prolongement des terres émergées ;
- les plages actuelles ;
- les sédiments meubles du plateau continental et de ses abords ;
- les grands fonds.

Seuls, à ce jour, sont exploités quelques gisements situés très près des côtes et par faible profondeur.

L'eau de mer

• **Les sels dissous.** On admet que tous les éléments naturels sont dissous dans l'eau de mer. Avec une salinité moyenne d'environ 3,5 % (35 g/l), 1 km³ d'eau de mer contient 35 millions de tonnes de sels dissous. Si tous les sels de l'Océan en étaient extraits et répartis sur la totalité des terres émergées, cela représenterait une couche de 150 m d'épaisseur.

Deux éléments, le sodium et le chlore, constituent à eux seuls 85 % des corps dissous ; et les neuf éléments les plus importants représentent plus de 99 % du total.

Éléments (par ordre d'importance)	Concentration (en pour mille)	Masse totale dissoute dans les océans (en tonnes)
1. Chlore	19	29,3 × 10 ¹²
2. Sodium	10,5	16,3 × 10 ¹²
3. Magnésium	1,35	2,1 × 10 ¹²
4. Soufre	0,885	1,4 × 10 ¹²
5. Calcium	0,400	0,6 × 10 ¹²
6. Potassium	0,380	0,6 × 10 ¹²
7. Brome	0,065	0,1 × 10 ¹²
8. Carbone	0,028	0,04 × 10 ¹²
9. Strontium	0,008	0,012 × 10 ¹²
10. Bore	0,004 6	7 000 × 10 ⁹
11. Silicium	0,003	4 700 × 10 ⁹
17. Phosphore	0,000 07	110 × 10 ⁹
18. Iode	0,000 06	93 × 10 ⁹
19. Baryum	0,000 03	47 × 10 ⁹
22. Fer	0,000 01	16 × 10 ⁹
23. Aluminium	0,000 01	16 × 10 ⁹
27. Cuivre	0,000 003	5 × 10 ⁹
29. Uranium	0,000 003	5 × 10 ⁹
30. Nickel	0,000 002	3 × 10 ⁹
32. Manganèse	0,000 002	3 × 10 ⁹
39. Argent	0,000 000 3	6 × 10 ⁸
57. Or	0,000 000 004	6 × 10 ⁸

Quatre éléments, qui ont une grande importance pour l'industrie chimique, sont extraits commercialement à l'heure actuelle ; il s'agit du chlore, du sodium, du magnésium et du brome. Le sodium et le chlore sont extraits sous forme de sel marin (on connaît des exemples de production de sel à partir de marais salants chez les Chinois, au III^e millénaire avant J.-C.) ; aux U.S.A., le magnésium (et ses composés) extrait de la mer représente la quasi-totalité de la production nationale de ce métal, alors que dans de nombreux pays on l'obtient à partir de dépôts terrestres. Le brome, lui, est pratiquement l'unique élément produit exclusivement en partant de l'eau de mer.

Le traitement de l'eau de mer a permis de produire dans le monde, en 1963 : 10 millions de tonnes de chlorure de sodium (dont 800 000 t en France) ; 300 000 t de magnésium (uniquement aux U.S.A., Grande-Bretagne et U.R.S.S.) ; les chiffres de 1964 indiquent une production de 75 000 t de brome. Comme sous-produits de l'extraction du sel marin et du magnésium, on obtient également des composés du calcium et du potassium. Avec l'accroissement de la demande en produits fertilisants, le jour n'est pas éloigné où la potasse sera directement extraite de l'eau de mer.

Avec les procédés classiques de traitement des sels dissous, on ne pense pas pouvoir pousser rentablement l'extraction de nouveaux éléments de concentration inférieure à celle du brome. Toutefois, le développement de techniques nouvelles (résines échangeuses d'ions, parois semi-perméables, etc.) laisse espérer la récupération de certains éléments. En Grande-Bretagne des recherches sont conduites dans ce sens pour l'uranium.

Plusieurs fois déjà, on a tenté d'extraire de l'or de l'océan. Notamment les Allemands, lors de la grande campagne océanographique du « Meteor » en 1925-1927. En 1964, la Dow Chemical Co aurait obtenu 0,09 mg d'or après traitement de 15 tonnes d'eau de mer. Les résultats sont donc encore bien maigres, malgré certains espoirs suscités par des teneurs exceptionnelles, mais sujettes à caution (jusqu'à 60 mg/tonne), qui auraient été trouvées en certains endroits.

● **Les éléments en suspension.** En plus des sels dissous, une grande quantité de minéraux se trouvent en suspension dans l'eau de mer, principalement sous forme de particules colloïdales : or, silice, manganèse, plomb, fer, etc. On peut imaginer que l'on pourra récupérer ces particules au moyen de filtres sélectifs ou de procédés électrostatiques lors de l'utilisation de grandes masses d'eau de mer, par exemple pour le refroidissement des centrales nucléaires.

● **Les poches sursalées.** Dans la vallée médiante de la mer Rouge, en face de La Mecque, on a récemment découvert des dépressions abritant, par plus de 2 000 m de fond, des masses d'eau anormalement chaudes (44 à 56° C) et sursalées (salinité 10 fois supérieure à la normale). On y a relevé des teneurs élevées en manganèse, fer, zinc, cuivre. Certaines analyses auraient montré des teneurs exceptionnelles de cuivre (2 %). Corrélativement, les sédiments du fond de ces cuvettes sont riches en fer, cuivre et zinc (jusqu'à 6,2 % d'oxyde de zinc et 0,74 % d'oxyde de cuivre). De tels sédiments semblent être un exemple moderne de minerais en cours de dépôt ; ils présentent des similitudes avec des dépôts terrestres localisés des deux côtés de la mer Rouge. Des sociétés américaines s'intéressent à ces saumures et à ces sédiments exceptionnels.

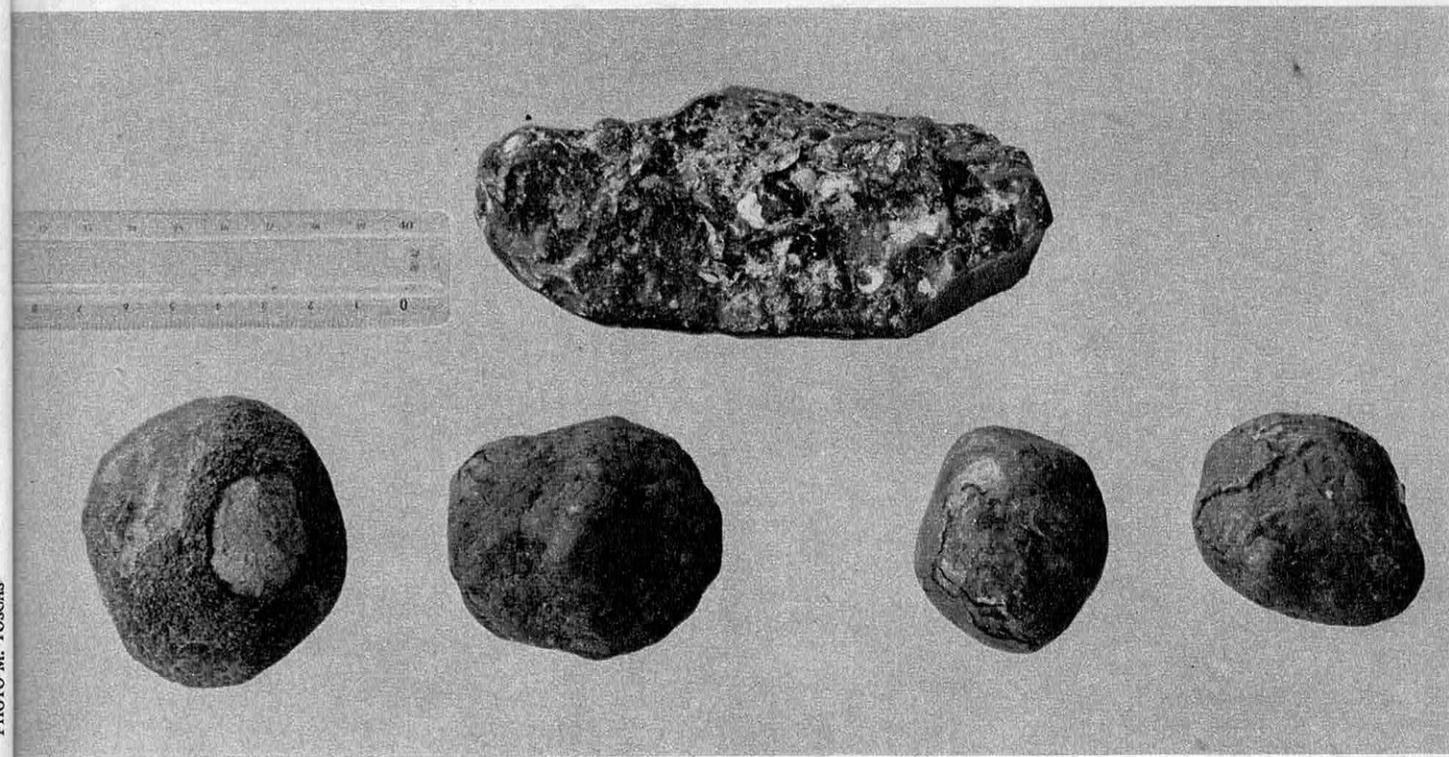
Selon certains auteurs, il y aurait ailleurs, et notamment en Méditerranée, des masses d'eau où l'on pourrait trouver des « minéralisations solubles » intéressantes. Dans un même ordre d'idées, on a ramassé sur la ride médio-océanique du Pacifique oriental des échantillons de vases enrichies en fer, manganèse, cuivre, chrome, cobalt, nickel, plomb. Toutes ces régions ont pour caractéristique essentielle d'être des zones faibles de l'écorce terrestre (fossés d'effondrement, zones de volcanisme sous-marin, rides océaniques) où le flux de chaleur issu des profondeurs de la Terre est particulièrement élevé.

● **Concentration par les organismes vivants.** De nombreux animaux et végétaux ont la faculté de concentrer certains éléments dissous dans l'eau de mer et de les stocker dans leurs tissus ou squelette, souvent en proportion considérable. L'exemple le plus connu est celui du calcium accumulé sous forme de carbonate dans les coquilles et tests d'un grand nombre d'organismes marins. Par ailleurs, certaines algues marines (laminaires) concentrent jusqu'à 100 000 fois l'iode de l'eau de mer. Jusqu'à la découverte d'iode dans les dépôts de nitrates du Chili, elles constituaient pratiquement la seule source de cet élément.

Des animaux concentrent également en proportion notable certains éléments : les squelettes de poissons montrent des enrichissements intéressants en plomb ($\times 20\,000\,000$), zinc ($\times 1\,000\,000$), cuivre ($\times 1\,000\,000$), étain ($\times 330\,000$), vanadium ($\times 280\,000$) ; les carapaces de homards renferment du cobalt.

Les teneurs absolues de ces éléments sont cependant insuffisantes pour envisager une utilisation actuelle.

● **L'eau douce.** Bien que l'eau douce ne soit pas considérée couramment comme un mi-

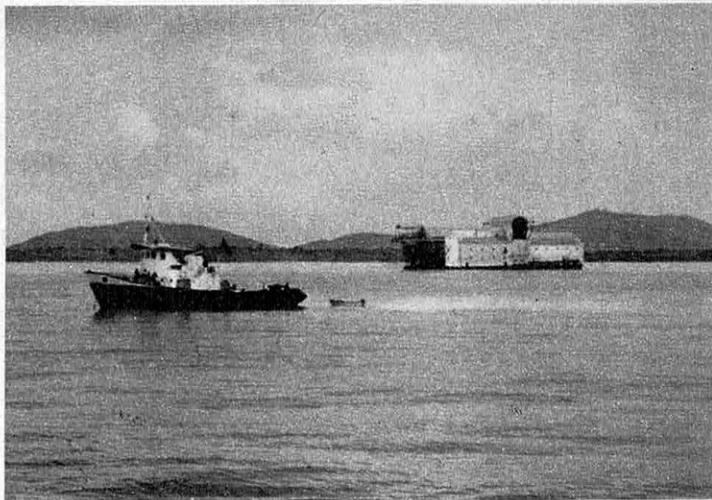


nerai, elle est pourtant l'un des produits les plus intéressants qui puissent être tirés de l'eau de mer. Le dessalement de l'eau de mer se développe à un rythme rapide, pour des raisons économiques ou politiques : Moyen-Orient (Koweit), Amérique (U.S.A., base de Guantanamo à Cuba, Curaçao, etc.). En 1964, plus de 60 000 millions de litres d'eau douce ont été récupérés de cette manière. L'utilisation de l'énergie nucléaire, en ouvrant une voie nouvelle dans la production de l'eau douce, aurait pour effet de rentabiliser les éléments dissous, obtenus comme sous-produits.

L'exploitation des venues d'eau douce sous-marines de certains littoraux est à l'ordre du jour, afin d'assurer l'alimentation en eau potable d'îles isolées ou de côtes semi-arides souvent surpeuplées. En France, des études ont été réalisées ou sont en projet, sous la responsabilité du Bureau de Recherches Géologiques et Minières : pays niçois, région de Marseille, étang de Thau, estuaire de la Gironde, pays de Caux, Guadeloupe.

Les gisements du substratum du plateau continental

Les plateaux continentaux ne sont que le prolongement en mer des masses continentales émergées ; ils ont donc la même constitution géologique et présentent, sous la couche de sédiments meubles récents (nappe de une à quelques dizaines de mètres d'épais-



Les dépôts minéraux exploités actuellement sont tous situés à faible profondeur. C'est le cas des gisements d'étain off-shore en Indonésie.

La photo ci-dessus montre une grosse drague à godets devant Bangka.

Quant aux phosphorites, que l'on rencontre généralement en bordure du plateau continental, et aux nodules polymétalliques des grands fonds, leur exploitation risque de se faire attendre encore quelques années.

La photo en haut de page montre des échantillons de ces deux types de formations.



CONCRÉTIONS CHIMIQUES ET BIOCHIMIQUES DES MOYENNES ET GRANDES PROFONDEURS

-  Nodules de Manganèse
-  Phosphorites
-  Concrétions de Baryte

GISEMENTS DÉTRITIQUES

- a. Placers sous-marins (Plateaux continentaux)
 -  Étain (Cassitérite)
 -  Fer (Magnétite)
 -  Diamant
 -  Or (Accessoirement platine et argent)



b. Accumulations pour travaux publics (Plateaux continentaux)

Sables et graviers

Coquilles

Gisements actuellement exploités

Limite des plateaux continentaux (— 200 m)

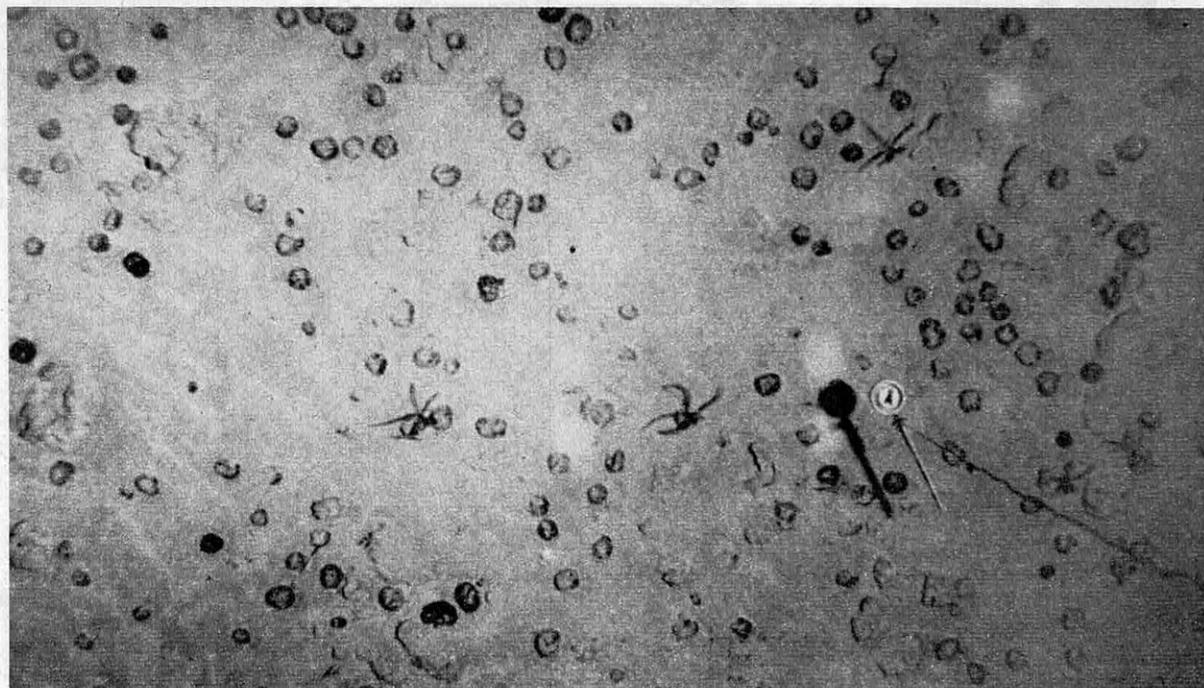


Plate-forme marginale en contrebas du plateau continental de la Floride, le Blake Plateau recèle, par des fonds inférieurs à 1 000 m, d'importants gisements de nodules polymétalliques (photo ci-dessus). Ceux-ci sont plus généralement rencontrés dans les grandes plaines abyssales.

seur, constituée par des vases, sables et graviers), des gisements de type classique : filons, amas, gîtes stratiformes, etc.

Quelques-uns de ces gisements seulement sont exploités à l'heure actuelle, à proximité immédiate des côtes, et en continuité totale avec les gîtes terrestres. L'exploitation se fait par puits et galeries partant le plus souvent de la terre ferme. Citons le fer de Finlande et de Terre-Neuve (en France, la mine de fer littorale de Diélette, dans le Cotentin, a été fermée depuis peu) ; le charbon en Nouvelle-Ecosse (Canada), à Taïwan, au Japon, en Ecosse, en Turquie; le soufre aux U.S.A.

S'il existe des gisements de ce type plus au large, en plein plateau continental, ils sont, et pour un certain temps encore peut-être, négligés. L'exploration des fonds marins, qui ne fait que commencer, s'oriente tout naturellement d'abord vers la couche superficielle des dépôts non consolidés.

Les dépôts des plages actuelles

Zones de litige entre les terres émergées et l'Océan, fluctuant au gré des variations journalières ou géologiques du niveau de la mer, les plages sont caractérisées par des processus actifs de sédimentation ou d'érosion. L'action de la houle sur les sables côtiers (dont l'origine est continentale, par le biais du

drainage fluviatile) peut — ou a pu, à une époque récente — opérer dans certaines conditions une concentration de minéraux disséminés dans le stock sableux originel.

Souvent exploités depuis fort longtemps, les gisements de plage font la transition entre les gîtes détritiques (alluvionnaires) terrestres et marins. On peut y trouver des concentrations en minéraux extrêmement variés : or, platine, argent, diamant, étain, magnétite (oxyde de fer), minéraux du titane (rutile, ilménite), zircon, chromite, monazite et columbite (minéraux des terres rares et du thorium), etc., et, bien sûr, le quartz, qui constitue l'élément de base de nombreux sables et graviers.

A l'exception du quartz, ces concentrations ceinturent le plus souvent les anciens boucliers ou régions fortement minéralisées, soumis à une érosion intense (climat tropical ou relief important), actuellement ou à certaines époques du Quaternaire : Alaska, Brésil, Afrique, Madagascar, Inde, Ceylan, Asie du Sud-Est, Australie, etc.

La couverture meuble du plateau continental

Comme nous l'avons dit plus haut, les plateaux continentaux sont dans la plupart des cas recouverts par une nappe relativement mince de sédiments meubles (ou non-conso-

lidés), c'est-à-dire de vases, sables, graviers, galets, dont les constituants (à l'exception des débris coquilliers) sont d'origine continentale. Ces sédiments proviennent soit d'apports actuels par les courants marins (courants de houle principalement), soit, plus généralement, d'apports plus anciens, lors des avancées (transgressions) et reculs (régressions) successifs du niveau marin. Ces événements ont provoqué au cours du Quaternaire la migration des lignes du rivage depuis le rebord continental jusqu'au trait de côte actuel et même au-delà. Sur le plateau continental on peut retrouver d'anciens tracés fluviatiles, prolongeant le cours des rivières et fleuves actuels.

Ces dépôts meubles peuvent présenter des minéralisations intéressantes ou des accumulations à caractère économique. Plusieurs cas sont à considérer : **placers off-shore** (minéraux lourds) ; accumulation de **matériaux utilisables pour les travaux publics** ; **dépôts biochimiques** en bordure du plateau continental.

• **Les placers off-shore.** On désigne ainsi d'anciennes plages ou chenaux fluviatiles ennoyés par la dernière transgression post-glaçiaire. Les sables et graviers renferment alors une certaine teneur en minéraux denses, généralement intéressants du point de vue minier, surtout quand les alluvions remplissent les talwegs de rivières submergées.

Ainsi, on exploite actuellement :

— les « **sables à minéraux lourds** », surtout les composés du titane, du zirconium, des terres rares et du thorium. C'est le cas en Amérique, en Asie, et surtout en Australie qui produit plus de 90 % du rutile (oxyde de titane) mondial. Pour ces minéraux, il est difficile d'avoir des indications sur la localisation des gisements strictement sous-marins, car il y a souvent confusion avec les exploitations de plages qui leur sont contigües.

— **l'étain** (cassitérite), principalement en Indonésie devant les îles de Singkep, Bangka et Billiton au nord-est de Sumatra, et accessoirement dans le détroit de Malacca et dans l'île de Phuket (Thaïlande). L'Indonésie a été le premier pays à exploiter des gisements *off-shore* importants, au moyen de volumineuses dragues à godets.

En Europe, des projets d'extraction de sables stannifères sont à l'étude, devant les côtes de la Cornouaille anglaise ; il ne semble pas que les possibilités soient du même ordre qu'en Asie du Sud-Est.

— **le fer.** En 1960, les Japonais ont découvert des sables très riches en magnétite dans certaines zones littorales du sud de l'archipel nippon. Cet oxyde est un minerai de fer de première qualité. Les ressources sont assez importantes et l'exploitation a dé-

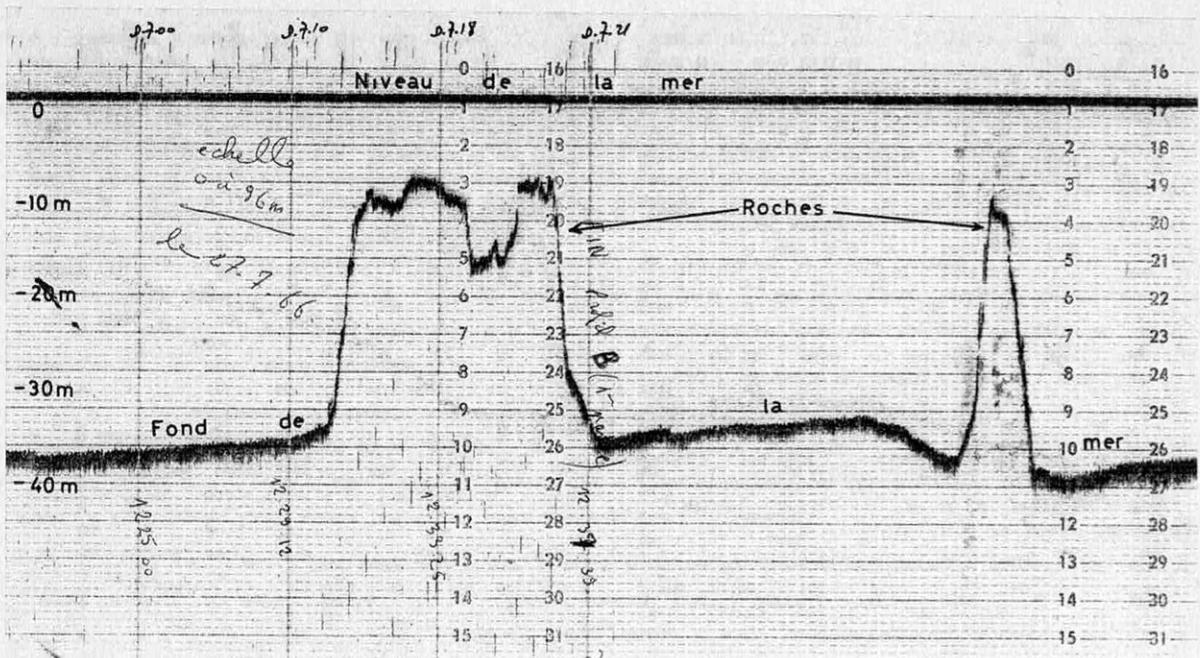
marré en 1962. Tout récemment, des placers de magnétite ont été localisés en Nouvelle-Zélande, au large de la côte ouest de l'île du Nord.

— **l'or et le platine**, souvent associés à l'argent, et parfois à l'étain, principalement devant les côtes sud et ouest de l'Alaska. Dans l'état actuel des recherches, la zone la plus favorable est située devant Nome. Les tenues les plus notables sont liées au charriage d'alluvions par les glaciers quaternaires. Des recherches toutes récentes tendent à montrer une épaisseur relativement forte de stérile dans de nombreuses zones, ce qui est assez défavorable économiquement.

— **le diamant.** Des diamants sous-marins sont exploités depuis 1962 au large du Sud-Ouest Africain. Les concessions, accordées à des sociétés en majorité sous contrôle De Beers, s'étendent vers le Nord, à partir de l'embouchure de l'Orange, sur une bande côtière de près de 400 km. La plus grande partie des diamants récupérés sont d'une qualité qui les destine à la joaillerie. Mais, malgré cet atout, ces opérations minières ont encore une rentabilité incertaine, car les côtes sont très exposées et les tempêtes fréquentes. Tous les exemples de placers, exploités ou sur le point de l'être, que nous venons d'énumérer, sont situés très près des côtes et sous des tranches d'eau ne dépassant pas la vingtaine de mètres.

• **Les minéraux pour les travaux publics.** Il s'agit de sables et graviers, d'une importance primordiale pour les travaux publics et la construction, car les carrières exploitées à terre ne suffisent souvent plus. D'importantes accumulations existent en de nombreux endroits du plateau continental. Leur extraction — par dragage ou pompage — est déjà entreprise dans les zones littorales des grands ports des U.S.A. et, pour la Grande-Bretagne, dans la Manche. En 1966, l'ensemble de la production mondiale a été estimée à 76 millions de m³.

En France, de petites exploitations artisanales draguent certaines accumulations sableuses très près des côtes ou dans les embouchures de rivières. Un inventaire précis des sables et graviers du plateau continental français doit être entrepris prochainement. Il s'agit aussi des accumulations coquillières. Elles sont formées de coquilles ou d'organismes marins entièrement constitués par du carbonate de calcium. La production, encore peu développée, sert à la fabrication de la chaux et du ciment ; elle a été de 15 millions de m³ en 1965. Les principales exploitations sont situées aux U.S.A., en Islande, aux Hawaï et aux Bahamas. Un exemple intéressant de récupération est fourni par la baie de San Francisco où les dépôts coquille-



Tracé original d'un enregistrement à l'échosondeur, lors d'une campagne de prospection minéralière. Les décrochements de grande amplitude indiquent une série d'affleurements rocheux.

liers sont naturellement mélangés à la vase (composée pour une large part de minéraux silicatés). Ce mélange est pompé et permet la fabrication directe du ciment.

Citons également le cas très particulier du « maërl », algue calcaire (*Lithothamnium calcareum*) qui se présente sous forme de concrétions ayant l'allure de granules. Cette algue se reproduit en des régions bien localisées des côtes bretonnes (Concarneau, îles de Glénan, Côtes-du-Nord). Les dépôts sont exploités pour l'amendement des sols pauvres caractéristiques de la Bretagne. En 1965, la production était d'environ 26 000 tonnes.

• **Les dépôts biochimiques de la bordure.** Nous abordons ici un type de dépôts différents des précédents, mais toujours non-consolidés. On le rencontre en général près de la bordure des plates-formes continentales et son origine est purement marine : précipitation ou concrétionnement, par des processus biochimiques (bactéries) de certaines substances dissoutes dans l'eau de mer. Leur formation peut se poursuivre à l'époque actuelle.

Les **phosphorites sous-marines** se présentent sous la forme de nodules ou de galets de formes diverses qui ne sont pas sans analogie avec les nodules de manganèse rencontrés généralement par plus grands fonds. Elles sont localisées en bordure de certains plateaux continentaux, et des conditions très particulières semblent concourir à leur formation : zones de hauts fonds, eaux peu char-

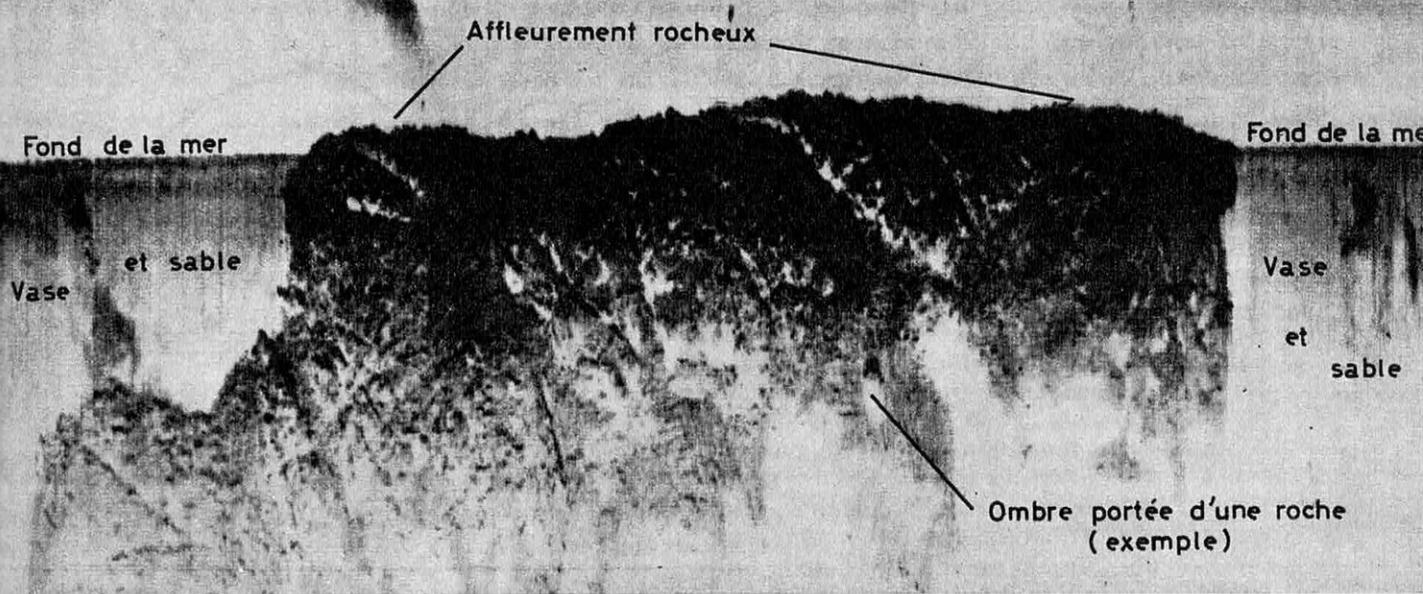
gées en matériaux détritiques, courants froids ascendants (*upwelling*).

Les gisements les plus connus de ce type sont situés devant les côtes de la Californie du Sud (U.S.A. et Mexique), par des fonds relativement peu importants (60 à 200 m). Une tentative d'exploitation a eu lieu en 1962 (la seule à ce jour pour les phosphorites), mais pour des raisons de rentabilité, elle a dû s'arrêter très rapidement.

On a reconnu l'existence de dépôts similaires, mais généralement plus profonds, au large des côtes du sud-est des U.S.A. (Blake Plateau, par 900 à 1 000 m de fond), des Andes, de l'Argentine, de l'Afrique du Sud, de l'Australie, et tout récemment, de la Nouvelle-Zélande.

Il n'y a pas longtemps, un nouveau type de dépôts phosphatés a été découvert, tout à fait fortuitement, près des côtes occidentales du Mexique, par des fonds de 70 m. Il s'agit de sables à apatite (phosphate de calcium). La **baryte** (sulfate de baryum) aurait une faible extension potentielle, et n'a été draguée qu'en de rares endroits, sur la pente continentale, par des profondeurs allant de 300 à 1 200 m (Ceylan, ouest de l'Indonésie, côte sud de la Californie). Cette substance, qui se présente sous forme de concrétions ou de fins cristaux, pourrait trouver un débouché comme ingrédient pour alourdir les boues de forage, ou dans le raffinage du sucre.

La **glaucophanie**, silicate complexe hydraté d'un



Le sonar latéral complète les informations fournies par les techniques acoustiques moins évoluées. Il donne en fait de véritables photographies des fonds marins rencontrés.

vert intense dont la teneur en potassium pourrait la faire utiliser comme fertilisant, est très fréquente sur la marge continentale à des immersions très variées de 10 à 1 800 m, et même plus (Californie, est de l'Amérique du Nord, Afrique du Sud, Afrique occidentale, Portugal, côte est de l'Australie, Nouvelle-Zélande, Philippines, Chine, Japon, etc.).

Les dépôts minéraux des grands fonds

D'un point de vue géologique, les grands fonds, ou plaines abyssales, constituent le domaine purement océanique des fonds marins. Ils sont généralement éloignés des terres émergées et caractérisés par une sédimentation dans l'ensemble bien plus fine et un taux d'accumulation des particules solides bien plus réduit que les marges continentales. Les plaines abyssales sont la dernière étape du transport des matériaux solides provenant de l'érosion des continents, qui s'y déposent sous forme de boues de couleur brunâtre (argiles « rouges »). Mais on y trouve aussi des dépôts strictement océaniques tels que les nodules de manganèse (d'origine biochimique) ou les boues calcaires ou siliceuses (d'origine biologique).

A ce jour, aucun de ces dépôts n'a été encore exploité, et ceci est bien compréhen-

sible, puisque notre connaissance des grands fonds est encore limitée et que l'accès aux grandes profondeurs pose des problèmes techniques importants.

● **Les nodules de manganèse.** Les plus riches gisements de manganèse du globe semblent se trouver au fond des mers. Ces dépôts ont déjà beaucoup fait parler d'eux. Ils ont été découverts pour la première fois au cours de l'expédition britannique du « Challenger » autour du monde (1873-1876), la première vraie campagne océanographique. Ce sont les mieux étudiés des gisements des grands fonds. On les rencontre sous la forme de nodules noirâtres, présentant fréquemment un aspect de pomme de terre. Ils sont surtout localisés au-delà des 2 000 m, et dans des zones où le taux de sédimentation est très faible, ce qui permet aux précipitations de se développer en toute tranquillité, à partir d'un noyau initial. D'autres facteurs plus complexes doivent intervenir dans leur processus de formation : topographie sous-marine, courants, fumerolles, etc.

Très abondants dans le Pacifique, les nodules de manganèse le sont beaucoup moins dans les océans Atlantique et Indien, à cause du taux de sédimentation plus élevé de ces derniers. Toutefois, un gisement intéressant a été récemment découvert dans l'Atlantique, sur le Blake Plateau, au large des côtes de Géorgie-Floride, par 800 à 1 000 m de fond. C'est là que, pour la première fois, un sous-

marin océanographique, l'« Aluminaut », a été utilisé pour la reconnaissance d'un gisement.

Ces nodules ont une composition chimique variant dans des limites assez larges suivant les régions ; on y trouve, associés au manganèse, un grand nombre d'autres éléments en proportion très variable (nickel, cobalt, cuivre, molybdène, vanadium, fer, etc.) d'où la dénomination qu'on leur donne parfois de nodules polymétalliques. D'après les spécialistes, ils se formeraient, de nos jours, bien plus rapidement que n'augmente la consommation de manganèse. Leur tonnage global est actuellement estimé à 10^{12} tonnes.

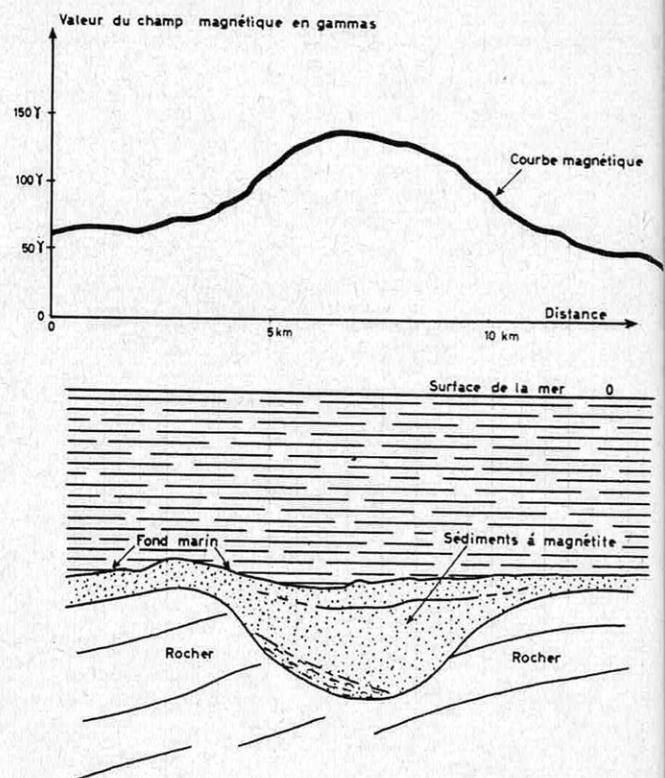
En dépit d'une grande publicité faite autour de ces gisements, il ne semble pas que les conditions de rentabilité soient déjà atteintes. Dans l'état actuel de la technique, les métaux accompagnant la manganèse nuisiraient à son extraction. En 1967, cependant, un procédé utilisant les nodules dans la lutte contre la pollution atmosphérique a été breveté par les Américains. Les projets de récupération industrielle sont d'ailleurs avancés aux U.S.A. La limite économique de profondeur serait à l'heure actuelle de 1 600 m ; elle pourrait atteindre 4 000 à 5 000 m dans des délais assez brefs.

• Les boues abyssales. Elles tapissent de vastes surfaces des plaines abyssales et sont de deux types :

— Les argiles « rouges » des grands fonds sont essentiellement d'origine détritique. Elles sont d'ailleurs plutôt de couleur brune. On les trouve par des fonds de 4 000 m. Elles pourront être exploitées lorsque les circonstances s'y prêteront, soit comme matériau brut (argile), soit pour en extraire de l'alumine, du cuivre, du nickel, du cobalt, des terres rares, etc.

— Les boues d'origine biologique comprennent d'abord les boues carbonatées, constituées par des microorganismes à test calcaire (globigérines), que l'on pourrait utiliser comme source de carbonate de calcium (estimation globale, 10^{14} t). Au-delà de 4 500 m et lorsque les masses d'eau qui les surmontent deviennent froides, elles ont tendance à disparaître par suite de la dissolution du calcaire. D'autre part, les boues siliceuses (radiolaires et diatomées) caractérisant généralement les fonds marins des hautes latitudes (eaux froides polaires) pourraient servir de matière première pour matériaux de construction, isolants thermiques et acoustiques, filtres, adsorbants, etc. (estimation de 10^{13} tonnes pour les radiolarites). Toutefois, leur exploitation n'est pas encore sérieusement envisagée.

Pour rester dans le domaine des grands fonds, signalons que les géologues soviétiques ont



La prospection magnétique, dont nous donnons ici un exemple typique, peut permettre la localisation de minéraux lourds ferrugineux. Elle est réalisé par le remorquage d'un magnétomètre en arrière du navire de prospection.

découvert en 1967 de la chromite (oxyde de chrome) à la surface de certaines crêtes médiocéaniques de l'océan Indien. Cet exemple montre que l'inventaire des ressources minières de l'Océan est bien loin d'être clos. Peut-être même un jour découvrira-t-on quelque météorite de fer-nickel de grande dimension au fond des mers. Le « maillage » des reconnaissances par grands fonds est encore si lâche que rien n'interdit d'y rêver.

Techniques de recherches des gisements sous-marins

Le développement des moyens d'exploration et de récupération industrielle des matières premières conditionne l'avenir minier des océans. Laissant de côté les projets qui, souvent ambitieux, n'ont pas en général dépassé le stade de la conception, nous n'envisagerons ici que les techniques utilisées à

l'heure actuelle. Mais le contexte technologique évolue aujourd'hui tellement vite que des procédés nouveaux pourront être utilisés plus tôt qu'on ne le pense communément. Toute opération de reconnaissance bien conduite doit, dans la plupart des cas, faire appel aux quatre opérations suivantes :

- localisation ;
- levé topographique des fonds, établissement de la carte bathymétrique ;
- préreconnaissance géophysique ;
- échantillonnage.

● **Localisation.** Le travail en mer, c'est un peu du travail en aveugle. C'est pourquoi le problème de la localisation est fondamental. Les recherches en mer n'auraient pas grande signification si la position du gisement ne pouvait être déterminée avec un maximum de précision. L'idéal serait de pouvoir se localiser à quelques mètres près, mais plus on s'éloigne des côtes, plus cela devient difficile.

A proximité des côtes, et pour des études d'étendue restreinte, on peut utiliser les procédés optiques classiques. La méthode des cercles hydrographiques permet d'effectuer le relevé du navire par visées sur des points connus à terre (amers). Les théodolites, quant à eux, visent le navire à partir de deux points connus à terre, mais impliquent l'existence d'une liaison radio.

Lorsque l'on s'éloigne des côtes, les systèmes radioélectriques de localisation deviennent indispensables. On utilise généralement les systèmes de type Decca, Rana, Toran, Loran, etc., à coordonnées hyperboliques. Dans ces cas, les stations émettrices sont à terre et le récepteur du bord enregistre en continu la position du navire. En l'absence de toute station émettrice, on peut recourir à des bouées-réflecteurs radar, mouillées en des points connus.

Un procédé révolutionnaire, le sonar à effet Doppler, récemment mis au point par la Société Marquardt, utilise les ondes acoustiques. Il comprend un émetteur d'ultrasons dirigé vers le fond de la mer suivant quatre directions (avant, arrière, babord, tribord) et un ensemble récepteur des signaux réfléchis. L'analyse des fréquences émises et reçues permet de calculer à tout instant les composantes de la vitesse du navire, les distances parcourues et la position. Mais il est nécessaire de revenir se « caler » sur un point fixe au bout d'un certain temps.

Le repérage par « constellation » de satellites artificiels à orbites polaires, réalisé par les Américains depuis quelques années, est sur le point de devenir disponible commercialement. Utilisable en tous temps et en tous lieux, ce système atteint une précision de l'ordre du 1/10 de mille, ce qui est remar-

quable en haute mer. Il peut d'ailleurs être couplé au sonar Doppler, auquel il fournit le point précis à intervalles réguliers sans qu'il soit nécessaire de revenir se caler à terre.

● **La carte bathymétrique.** L'instrument de base pour son établissement est l'échosondeur, utilisant la propagation des ultrasons dans l'eau. L'impulsion acoustique, de l'ordre de 30 kilocycles, est dirigée verticalement vers le fond, renvoyée en écho et enregistrée sous la forme d'une ligne continue reproduisant fidèlement le profil des fonds et leur profondeur. Une série de profils de ce type permet de restituer la carte bathymétrique. Ces données sont aujourd'hui complétées par le sondeur latéral dont les relevés dessinent (on pourrait presque dire « photographient ») les zones d'anomalies topographiques. La méthode consiste à traîner dans l'eau un « poisson » renfermant un émetteur et un récepteur. L'émetteur balaie latéralement en continu une portion de plan perpendiculaire à la marche du navire. L'onde réfléchie décèle tout objet reposant sur le fond, telles les zones d'affleurements rocheux dans les zones de sédiments meubles. On peut ainsi compléter avantageusement la carte bathymétrique.

● **La préreconnaissance géophysique.** La prospection des fonds marins requiert une participation toujours plus importante de la géophysique, sous forme d'indications complémentaires aux hypothèses géologiques basées sur l'examen d'échantillons de roches ou de sédiments. La géophysique est notamment très utile pour mettre en évidence le substratum rocheux enfoui sous la nappe de sédiments meubles. Dans le cas des placers sous-marins, deux méthodes donnent de bons résultats. C'est, d'abord, la **sismique réflexion continue**, technique rapide et économique, pour l'obtention d'un grand nombre d'informations sur la structure superficielle ou profonde des fonds marins. Elle permet en particulier la détection des vallées comblées et submergées du plateau continental. Elaborée à partir de la méthode d'échosondage, la sismique réflexion consiste à traîner, hors du sillage du navire prospecteur, un ensemble émetteur-récepteur. L'émetteur (étincelle ou sparker) utilise comme source acoustique une explosion simulée, sous la forme d'une étincelle à haut voltage éclatant toutes les secondes environ. Le récepteur (hydrophone) recueille les variations de la pression de l'eau sous l'effet de l'onde réfléchie par le fond. La méthode est valable, en particulier, pour l'enregistrement d'un talweg sous-marin comblé par des sables. Quant à la **méthode magnétique**, rapide et facile à mettre en œuvre, elle se bor-

ne en général à mesurer le champ magnétique total. On utilise alors un magnétomètre traîné à 200-300 mètres derrière le bateau. On peut ainsi localiser des accumulations de minéraux lourds ferrugineux au sein des nappes alluviales.

● **L'échantillonnage.** Lorsque la zone de recherches est localisée, délimitée, cartographiée, il reste à recueillir le maximum de données les plus exactes possibles sur la nature des fonds marins et leur teneur en minéraux utiles. Les procédés de prélèvement sont extrêmement nombreux.

Pour les prélèvements superficiels on peut utiliser : les dragues sédimentologiques traînées sur le fond ; les bennes, dont l'avantage est d'autoriser des prélèvements ponctuels ; les engins automatiques sans câble de liaison avec le navire. L'utilisation de sous-marins et autres engins autonomes est encore, en ce domaine, très limitée. Les procédés optiques (photo, télévision) sont en tous cas d'un grand secours, en particulier pour l'exploration des champs de nodules polymétalliques. Lorsqu'il s'agit d'explorer en profondeur, on dispose de très nombreux modèles de carottiers, variables avec le terrain : carottiers à gravité, à roches, à piston pour les vases (carottier Kullenberg), vibrocarottiers pour les sables. Ces engins, en liaison souple avec le navire, ne dépassent guère une dizaine de mètres dans les sables, mais peuvent pénétrer jusqu'à 30 m dans les fonds vaseux. Au-delà d'une certaine profondeur, on a recours à des navires de forage ou à des pontons-foreurs. La colonne de tubage, pratiquement solidaire de l'engin flottant, s'enfonce par rotation, vibration, ou percussion. Afin d'assurer une grande stabilité au navire, on utilise plusieurs ancrages, ou des techniques de stabilisation dynamique avec moteurs auxiliaires asservis à un calculateur, pour la correction automatique des écarts par rapport au trou de forage.

Vers une réelle exploitation ?

Ainsi que nous l'avons vu, le nombre des gisements sous-marins réellement exploités est encore très réduit, et on a l'impression d'une certaine stagnation en ce domaine. Notre connaissance des fonds marins est encore trop rudimentaire et fragmentaire ; elle dépend elle-même étroitement de la progression des techniques océanographiques. Par ailleurs, en ce qui concerne l'exploitation proprement dite, il existe actuellement un « fossé technologique », surtout pour les grands fonds. Mais cette lacune devrait être assez rapidement comblée, et les Américains s'y appliquent activement. Le problème es-

sentiel, enfin, est celui de la rentabilité, qui conditionne en grande partie les deux points précédents. L'industrie ne se lancera vraiment dans une activité minière de recherche et d'exploitation que si le produit brut, récupéré et amené à quai, est concurrentiel avec les matières premières extraites sur les continents. La plus grande partie de ces richesses potentielles se présente heureusement sous la forme de dépôts non consolidés, à la surface des fonds marins ou sous une assez faible épaisseur de stérile. Elle pourrait donc être de récupération relativement aisée, une fois résolus les problèmes posés par la profondeur.

Quoi qu'il en soit, tout progrès des activités minières sous-marines est conditionné par un effort systématique d'exploration et de mise au point des moyens d'échantillonnage et de récupération. Pour pouvoir déterminer les critères de rentabilité d'un gisement dans un contexte technologique et économique donné, il faut en connaître, grâce à des études minutieuses, les caractéristiques précises : extension, teneurs, variations locales, impuretés, etc.

On assiste à l'heure actuelle au démarrage d'une telle politique méthodique qui permettra d'élargir considérablement l'inventaire des ressources sous-marines et d'en définir les caractéristiques économiques. De nombreux organismes gouvernementaux et sociétés privées font un gros effort d'exploration et de technologie. Dans cette compétition, les U.S.A. sont évidemment en tête.

Les placers *off-shore* sont les gisements les plus directement accessibles, constitués de minéraux facilement transformables. Aussi leur prospection vient-elle d'être entreprise sur le pourtour des pays déjà connus pour leurs richesses minières à terre. Les U.S.A., l'Australie, la Nouvelle-Zélande, pour ne citer qu'eux, mènent depuis peu des campagnes de reconnaissance générale de leur marine continentale.

Aux Etats-Unis, l'effort de recherche concerne les placers d'or, de platine, d'argent, de cassitérite, de terres rares et les phosphorites, principalement sur les côtes de l'Alaska, de l'Orégon, de Californie, de Floride-Georgie (Blake Plateau).

En Australie, plusieurs compagnies se sont groupées pour la prospection générale des gisements éventuels de phosphorites sur les côtes ouest, et de sables à minéraux lourds au Sud et à l'Est.

En Nouvelle-Zélande, où les recherches sont également actives, on a découvert des placers de magnétite sur le plateau continental, des phosphorites et des nodules de manganèse sur les « ridges » qui lui sont associées ; les prospecteurs ont l'espérance d'y trouver d'au-

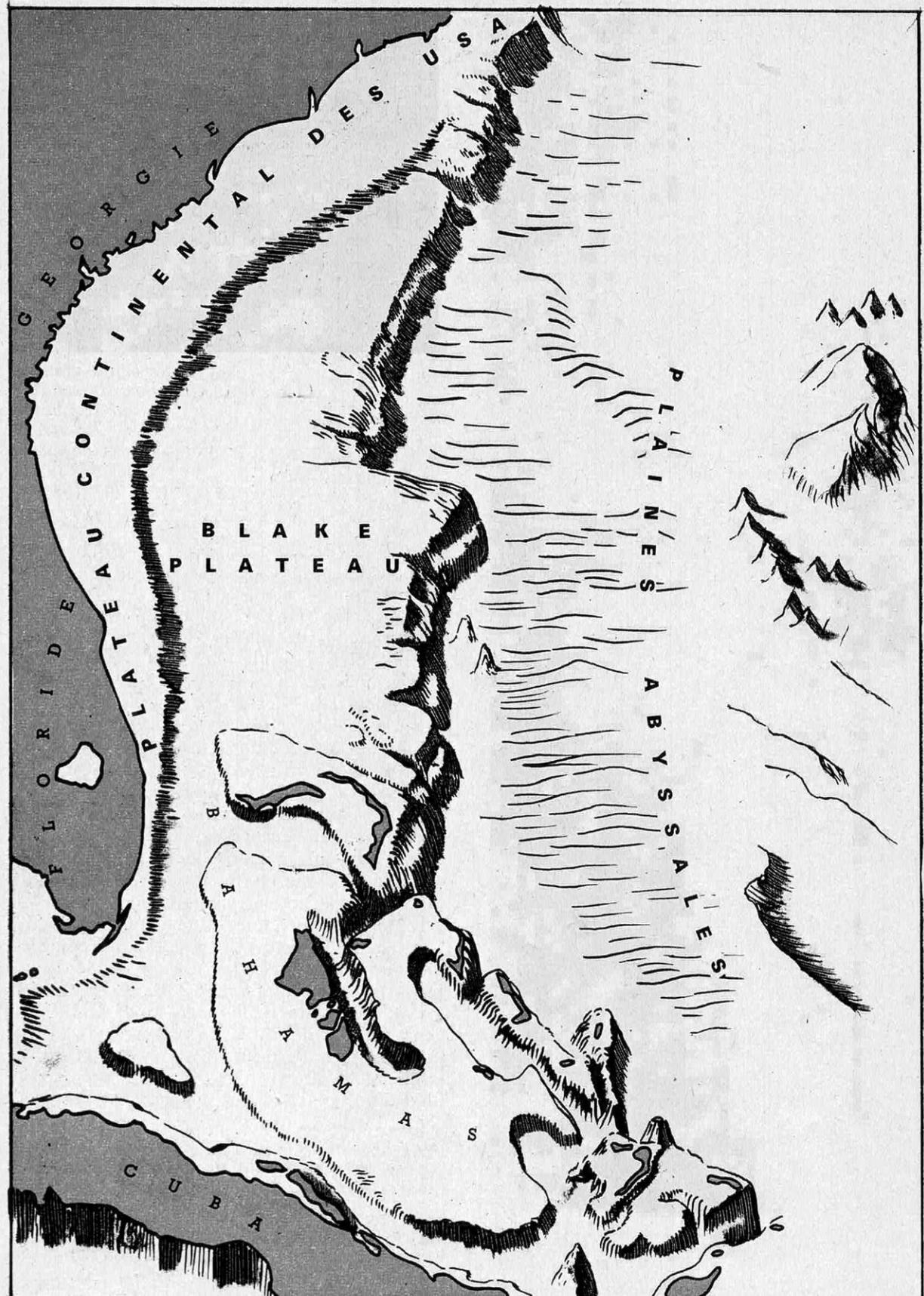
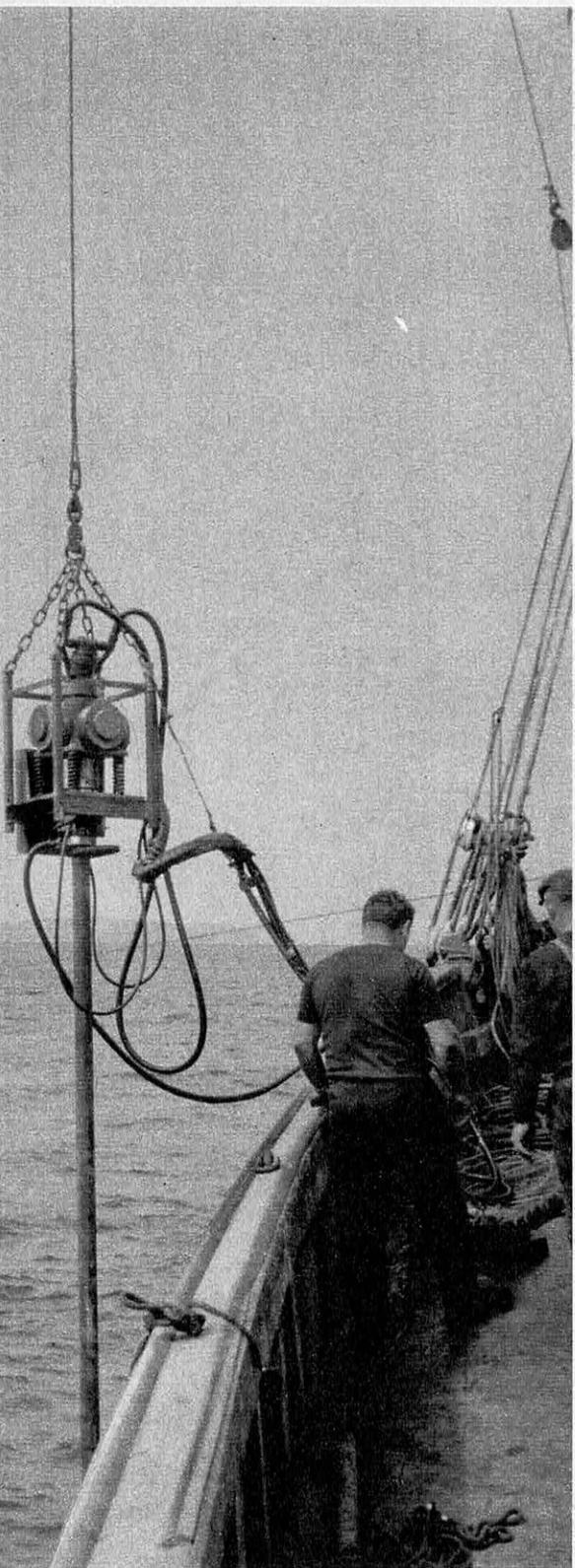
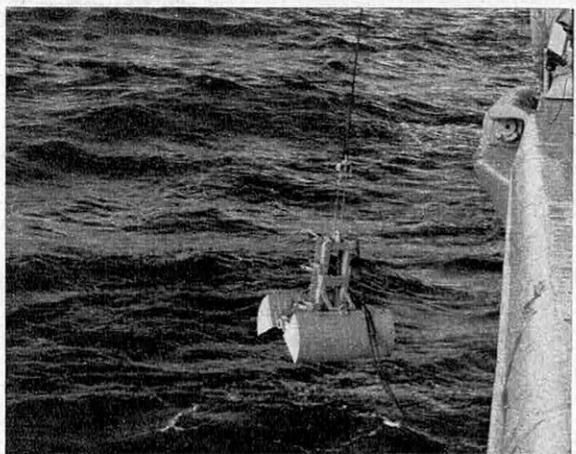


Diagramme physiographique du Blake Plateau, riche zone minéralière au large de la côte atlantique des Etats-Unis. (d'après B. Heezen)



*En rade de Brest,
mise à l'eau
d'un vibrocarottier électrique (Menard)
pour prélèvements d'échantillons
de sédiments meubles,
sables en particulier,
à l'intérieur du sol sous-marin.*



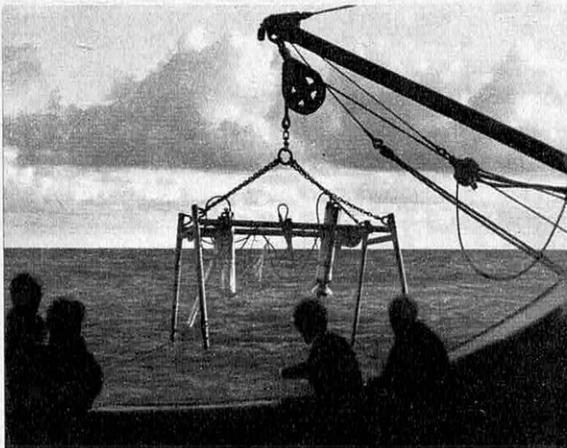
*Une benne-caméra
(celle-ci n'est pas discernable
sur la photo)
en action
lors d'une campagne
d'études des fonds
à l'entrée de la Manche.*

tres sables minéralisés : or, argent, rutile, ilmenite, thorite, monazite, etc.

En Asie du Sud-Est, on assiste à un afflux de demandes de permis de recherches pour l'étain off-shore de la part de sociétés américaines ou australiennes. En Indonésie, les concessions s'étendent depuis Singapour jusqu'à la côte sud-ouest de Bornéo. En Malaisie, des négociations sont en cours pour l'octroi de permis d'exploration des côtes occidentales de la péninsule de Malacca.

Toujours dans le domaine de l'étain, trois permis ont été accordés à une société américaine devant la Cornouaille anglaise. Une campagne préparatoire aurait réalisé 35 forages dans la couverture meuble, conduisant à la découverte d'une couche minéralisée de 1,50 m d'épaisseur. Un programme complémentaire de recherches est en préparation. Dans les pays de l'Est, on est assez discret sur ce genre de recherches. Il y aurait des exploitations de sables titanifères très près du rivage en Baltique (Riga et Kaliningrad) et en mer Noire.

La France ne reste pas à l'écart, et l'un des objectifs du Centre National pour l'Exploitation des Océans est justement de promouvoir la mise en valeur de la marge continentale française. Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières a, dès 1963, entrepris une campagne de recherche de placers de cassitérite devant l'estuaire de la Vilaine. Il a également participé, en 1966, à la prospection de placers stannifères sous-marins en Indonésie. En 1967, il s'est associé avec d'autres organismes français (Transat, Citra, CGG, Forasol, Intrafor-Cofor) pour créer une socié-



Un équipement de photographie sous-marine utilisé par les géologues. On distingue l'appareil de prises de vues et la lampe éclair.

té d'étude (MINERAMER), chargée de mettre au point un bateau foreur pour recherche des gisements des plateaux continentaux.

Un autre type de gisements est appelé à prendre une importance considérable dans quelques années, essentiellement au large des côtes très industrialisées (U.S.A., Europe). Il s'agit des matériaux de travaux publics (sables, graviers, coquilles).

Les zones d'exploitation sous-marine actuelles se limitent encore à une étroite bande côtière, entièrement localisée sur le plateau continental. On est en effet limité par la profondeur d'accès des grandes dragues d'exploitation qui est de 40 m (tranche d'eau + épaisseur des sédiments). Les spécialistes américains prévoient que l'on pourra bientôt atteindre la profondeur « industrielle » de 180 m, soit à peu près la limite externe du plateau continental.

Les grands fonds sont encore vierges de toute exploitation. Les nodules de manganèse y tiennent la vedette et il paraît probable qu'ils seront utilisés par l'industrie dans quelques années, lorsque les gisements seront mieux définis, les procédés d'extraction des divers métaux qui les composent affinés, et les procédés de récupération techniquement au point (de nombreux projets sont déjà dans les cartons). On pense que, vers 1980, la profondeur opérationnelle d'exploitation sera d'environ 4 000 m, et cela grâce à des véhicules sous-marins autonomes ou guidés à partir de la surface. D'autres techniques sont possibles : chalutage, pompage, etc.

L'exploitation des boues des grandes profondeurs n'est pas envisagée dans l'immédiat.

Elle ne devrait pas, toutefois, poser trop de problèmes technologiques dans quelques décennies. En plus de leur constituant de base qui est directement utilisable (argile, carbonate de calcium, silice), la présence d'éléments métalliques très divers, à l'état de traces ou en faible quantité, pourrait leur donner une plus-value économique. On pourrait concevoir la récupération d'une partie au moins de ces métaux, compte tenu des faibles liaisons métal-support minéral ou organique, par l'utilisation d'acides complexeants. Il serait aussi possible d'utiliser certaines de ces boues (ainsi d'ailleurs que certaines vases du plateau continental) en agriculture, pour l'amendement de sols particulièrement pauvres en oligoéléments (nickel, cobalt, molybdène).

Si l'activité minière océanographique est encore dans l'enfance, toute une juridiction concernant l'exploitation des plateaux continentaux voit le jour sans attendre plus longtemps. Elle est basée sur la Convention de Genève du 29 avril 1958⁽¹⁾ qui place les plateaux continentaux sous la souveraineté des pays adjacents. La porte est d'ailleurs ouverte à une annexion ultérieure des grands fonds, puisque cette Convention prévoit l'exploitation au-delà de la limite théorique des 200 m « jusqu'au point où la profondeur des eaux sus-jacentes permet l'exploitation des ressources naturelles desdites régions ». Rappelons, en terminant, que l'exploitation des ressources minérales de l'Océan ne saurait être aveugle et que, tôt ou tard, se poseront des problèmes de sauvegarde des équilibres naturels du milieu marin. La pollution, la diminution de concentration de certaines substances, l'érosion des plages, la destruction des fonds chalutables qui résulteraient d'une exploitation industrielle menée sans discernement, ne pourraient, en fin de compte, que nuire à l'intérêt général.

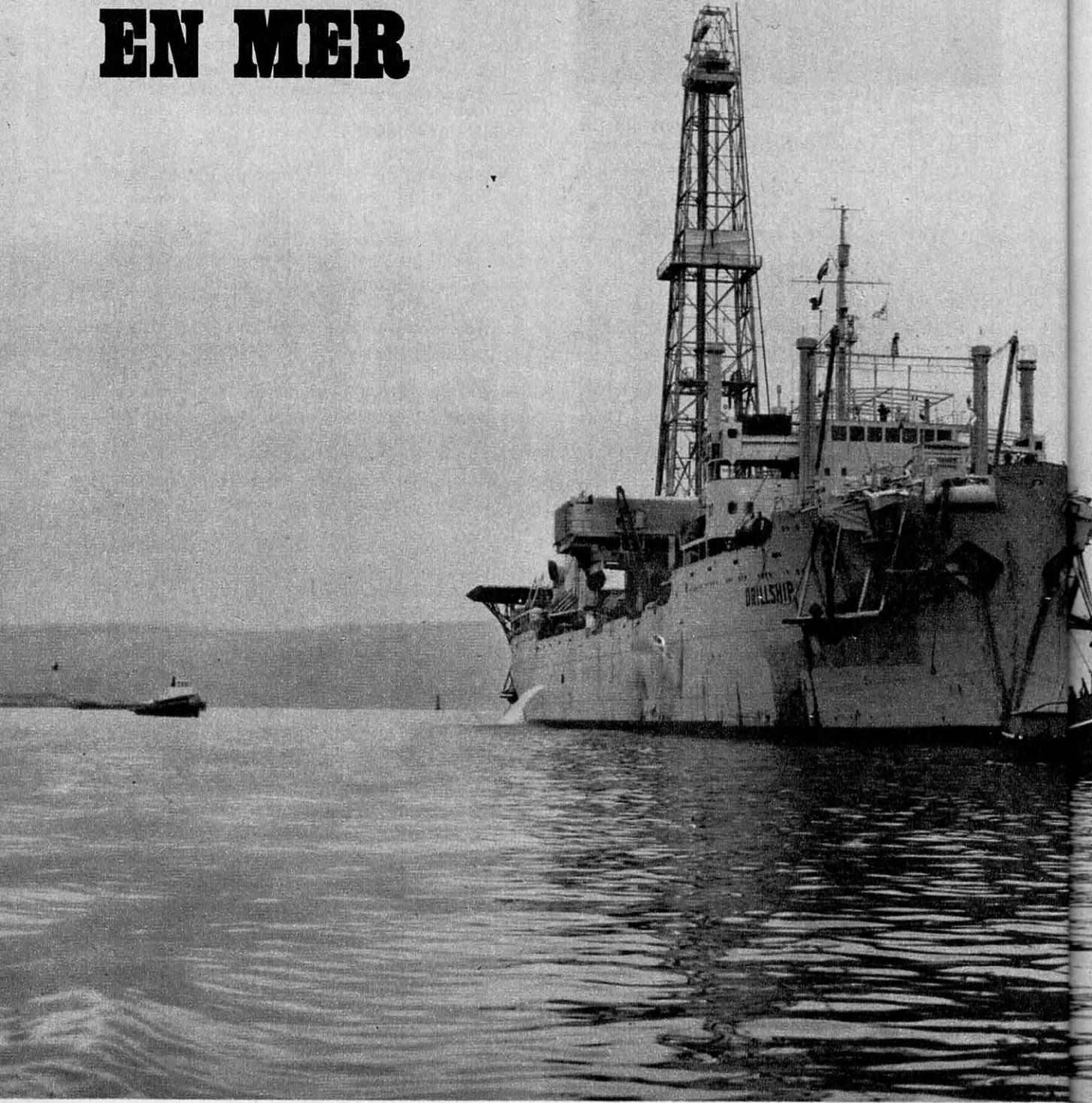
La demande accrue de l'industrie en produits de base, l'amélioration constante des techniques de récupération et des procédés d'extraction, la perte de certaines « colonies économiques », ne peuvent que contribuer à rendre compétitifs les gisements sous-marins. Autant de raisons qui nous permettent de faire preuve d'optimisme quant aux chances réelles d'une exploitation rentable, à plus ou moins long terme, des richesses minérales de l'Océan.

Philippe Bouysse et Robert Horn

Ingénieurs au Bureau de Recherches Géologiques et Minières

(1) Convention à laquelle la France a adhéré le 14 juin 1965, et dont la loi « relative à l'exploration du plateau continental et à l'exploitation de ses ressources naturelles » a été votée le 30 décembre 1968.

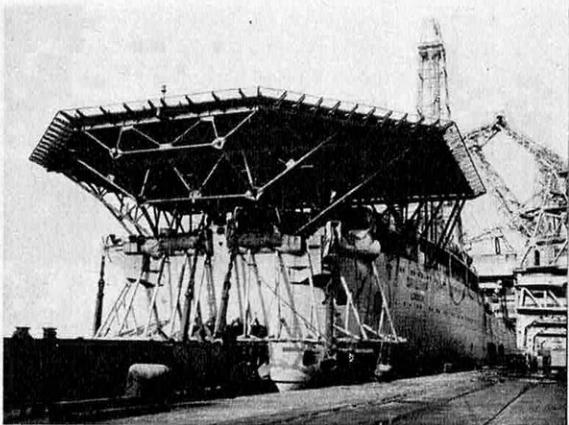
PROSPECTION ET EXPLOITATION DES HYDROCARBURES EN MER





Avant d'aborder la description des différentes techniques utilisées dans la mise en valeur des gisements sous-marins d'hydrocarbures, il convient de préciser une notion fondamentale : pour le prospecteur pétrolier, il n'existe pas de différence notable, au niveau du gisement proprement dit, entre une accumulation profonde du type de celles que l'on exploite sous les terres émergées et un gisement en mer. On aurait pu imaginer cependant que l'origine très probablement marine du pétrole aurait donné aux gisements sous-marins, un rôle particulièrement favorable : nous allons montrer qu'il n'en est rien.

On sait que la matière première essentielle dont seraient issues les réserves actuelles d'hydrocarbures aurait été constituée d'organismes marins. En effet, parmi les nombreuses hypothèses émises pour expliquer l'origine du pétrole, celles qui en attribuent la formation à des causes volcaniques, ou à d'autres phénomènes plus ou moins complexes, ont été abandonnées. Seule subsiste actuellement la théorie qui fait inter-



PHOTOS FROTTIER - C.F.P.

Battant pavillon britannique et armé par un équipage international, le « Drillship » a entamé en novembre dernier une campagne de prospection dans le golfe du Lion, pour le compte de la Compagnie Française des Pétroles. Les forages, effectués soit par puits central, soit sur le côté du navire, ont lieu actuellement par des fonds d'une centaine de mètres. A la poupe est aménagée une plate-forme pour liaisons par hélicoptères (photo ci-dessus). A bord du « Drillship » sont en cours des essais pour la mise au point d'un système intégré de positionnement dynamique, capable de remplacer, pour de tels navires, l'ancre traditionnel.

venir la fermentation bactérienne de matières organiques, dont l'océan contient des tonnages considérables. C'est donc dans les bassins où la sédimentation marine est susceptible d'avoir accumulé ces déchets organiques que le prospecteur pétrolier portera son principal effort.

Ne nous hâtons pas d'en déduire que c'est à ce titre que les zones actuellement recouvertes d'eau présentent un certain intérêt. Cette remarque est particulièrement valable pour les profondeurs d'eau inférieures à 200 mètres, seules zones accessibles aujourd'hui pour planter les installations de production. Du point de vue morphologique, on trouve en effet sous le plateau continental le prolongement des grandes lignes structurales situées sous les continents. Du point de vue géologique, dans les zones maritimes relativement bien connues où l'industrie pétrolière a déjà foré de nombreux puits, on a pu établir des corrélations entre les données stratigraphiques terrestres et celles des carottes prélevées dans ces forages ainsi qu'avec celles des échantillons arrachés sur le rebord de la pente continentale.

Le gisement sous-marin ne diffère donc pas du gisement terrestre du point de vue strictement géologique.

Quant à l'aspect technique des problèmes posés à l'ingénieur de prospection ou d'exploitation en mer, on constate que les matériaux et les méthodes utilisés actuellement ne sont pas non plus fondamentalement différents de ceux utilisés à terre. Une adaptation a seulement été nécessaire pour tenir compte des conditions nouvelles imposées par la présence d'une tranche d'eau à traverser sur une hauteur plus ou moins importante, d'une surface de séparation eau-air souvent agitée, et d'une surface de séparation eau-fond aux caractéristiques le plus souvent inconnues.

La première partie de notre exposé nous fera parcourir les différentes étapes de la recherche du pétrole en mer, de la préreconnaissance à la production, en passant par la géophysique et le forage, en décrivant succinctement les techniques résultant de cette adaptation.

Mais les moyens dont nous disposons aujourd'hui sont encore trop limités vis-à-vis des conditions de travail de plus en plus difficiles rencontrées lorsque la profondeur d'eau augmente ou que les conditions météorologiques et océanographiques deviennent plus sévères. Les grandes sociétés de recherches se préoccupent actuellement de créer de nouvelles techniques, si possibles affranchies de ces limitations. En France, les pouvoirs publics n'ont pas voulu rester en dehors de

cet immense effort et, depuis 1963, apportent le concours financier du fonds de soutien aux hydrocarbures à un programme de recherches marines confié à l'Institut Français du Pétrole (pour l'aspect recherche scientifique et technique proprement dit) et à l'ERAP puis à la CFP (pour l'aspect promotion industrielle). Dans la deuxième partie de cet exposé, nous verrons comment les premiers résultats de ce programme permettent de penser que notre pays tiendra sa place dans une évolution qui ouvre une nouvelle page de l'histoire de la découverte et de l'exploitation des richesses des océans.

TECHNIQUES ACTUELLES

La préreconnaissance. La méthode de *préreconnaissance géologique*, très largement utilisée à terre pour orienter la première phase de l'exploration pétrolière, ne peut malheureusement pas être utilisée systématiquement en mer. Il faut tenir compte, d'une part, de la tranche d'eau d'autant plus difficile à traverser qu'elle est plus épaisse ; d'autre part, des sédiments meubles qui recouvrent la plupart du temps les reliefs du substratum immédiat. Jusqu'à présent, les zones de travail sur lesquelles se sont portés les efforts des explorateurs pétroliers ont été généralement déduites du contexte géologique terrestre dans la mesure où celui-ci présentait déjà des perspectives intéressantes.

Les méthodes géophysiques telles que *prospection gravimétrique*, *prospection magnétique*, *prospection électrique*, sont également d'une mise en œuvre et d'une efficacité bien plus aléatoire en mer qu'à terre. Sans nous attarder sur ces méthodes relativement peu employées, disons seulement que les gravimètres embarqués ne sont pas encore suffisamment précis, que l'aéromagnétisme est utilisé pour l'examen de vastes zones, mais que les sondages électriques ne peuvent pas être utilisés, désavantages qu'ils sont pas la conductibilité importante du milieu marin.

Pour localiser les structures susceptibles de renfermer des hydrocarbures, la prospection sismique constitue la méthode géophysique de reconnaissance la plus efficace. De plus, elle bénéficie en mer d'un certain nombre d'avantages sur la sismique terrestre.

Rappelons brièvement que le principe de la sismique consiste à émettre dans le sol des ondes sonores et à étudier les réflexions successives de ces ondes sur les surfaces de séparation de roches de nature différente. Les ondes sonores peuvent être engendrées par des explosions ou tout autre moyen, des sis-



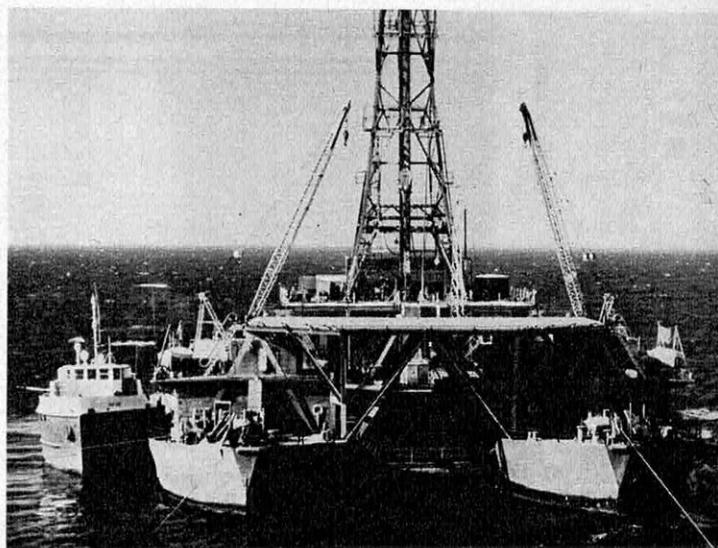
Plate-forme tripode à piles réglables en hauteur et en inclinaison, Neptune II, dite aussi, initialement, Neptune-Gascogne, a prospecté plusieurs mois durant la zone au large de la côte des Landes.

Conçue pour travailler par des fonds de 70 à 80 mètres, elle a depuis été remorquée vers la mer du Nord.

L'inclinaison des piles confère une plus grande stabilité à ce type d'engins, sous l'action de la houle ou des vents. C'est un peu dans le même but que l'on a expérimenté divers navires de forage à structure catamaran, tels que le C.P. Baker, ci-contre, aux États-Unis.

Il ne s'agissait en fait que d'une barge non autopropulsée. On note au premier plan, l'appontage pour hélicoptères.

PHOTO U.S.I.S.



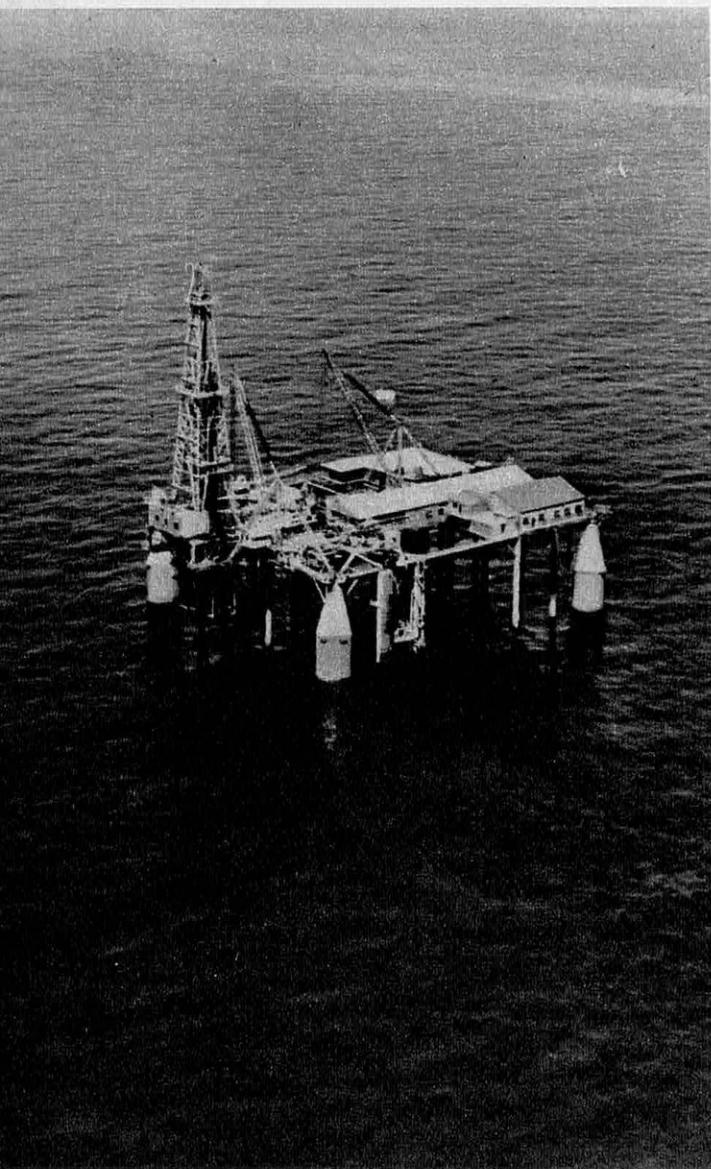
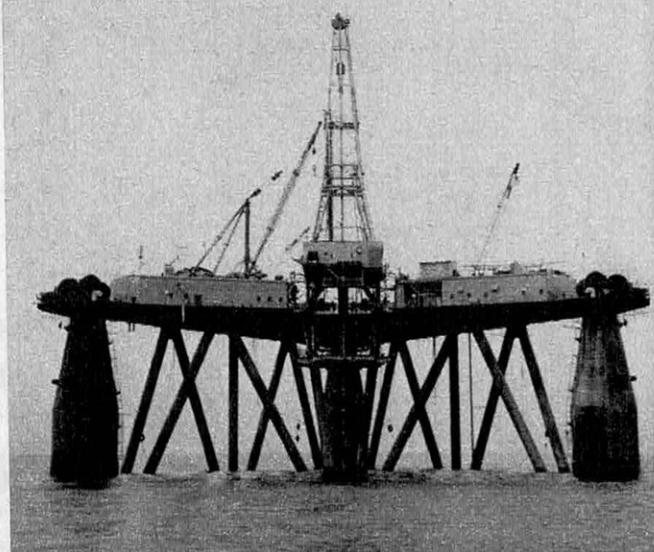
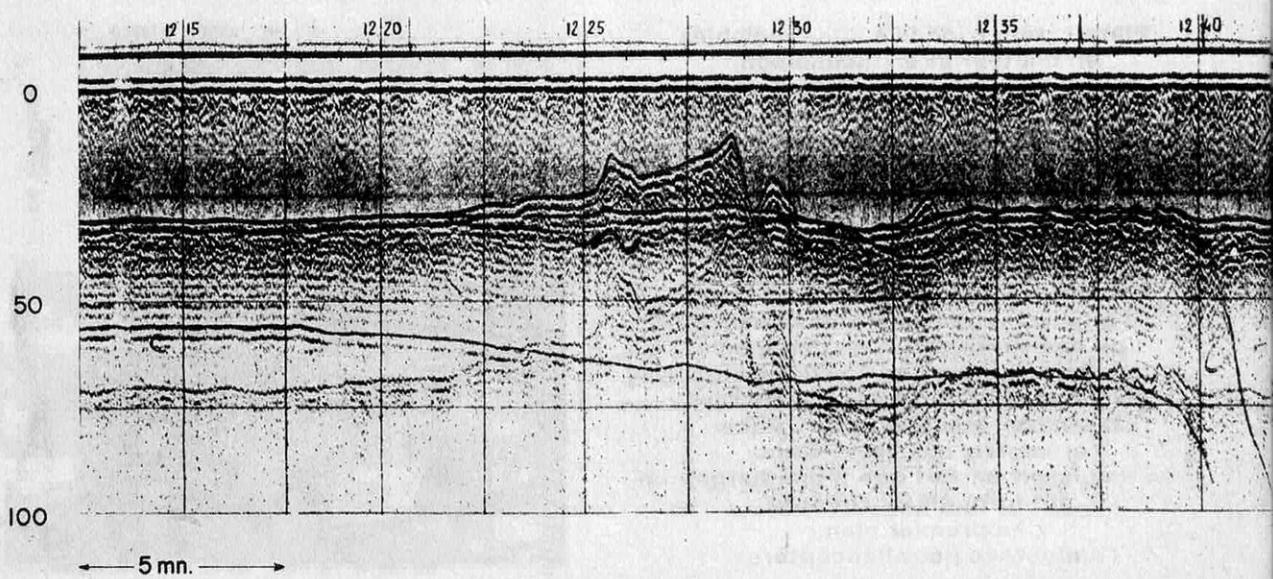


PHOTO S.N.P.A.



Au chapitre des barges semi-sous-marines, remorquables d'un point de forage à un autre, le prototype du genre semble être la « Blue Water N° 1 », ci-contre, de la Shell Oil Company. Ses ballasts d'angle en bouteille la rendaient largement insensible aux vents, aux vagues, aux courants... Des systèmes d'ancre dynamique sont actuellement à l'étude pour les successeurs de cet engin. De conception plus récente, la SEDCO 135, ci-dessus, est de forme générale triangulaire, avec trois ballasts d'angle terminés par des caissons à la partie inférieure. Elle est capable de forer par plus de 180 m de fond.

PHOTO U.S.I.S.



mographes détectant les temps d'arrivée des ondes réfléchies. L'interprétation des enregistrements permet de localiser les différents horizons rencontrés.

A terre, la prospection sismique nécessite de nombreux petits forages et l'utilisation de sismographes alignés un à un sur le sol. Tout un parc de camions est utilisé pour transporter le matériel : sondeuse, explosifs, appareillage de réception et d'enregistrement. La longueur de profil étudié journallement par une équipe ne dépasse pas 5 à 10 kilomètres. En mer, la mise en œuvre est notablement simplifiée. D'une part, il n'est plus besoin de faire des trous dans le sol, les charges pouvant être tirées directement dans l'eau. D'autre part, de nombreux hydrophones répartis sur 1 000 ou 2 000 mètres de longueur peuvent être remorqués derrière le navire qui transporte le matériel d'enregistrement. La prospection sismique en mer coûte ainsi environ cinq fois moins cher qu'à terre et elle est notablement plus rapide. L'activité des équipes sismiques marines est de plus en plus intense et la mise au point de nouvelles méthodes va sans doute encore accroître son extension.

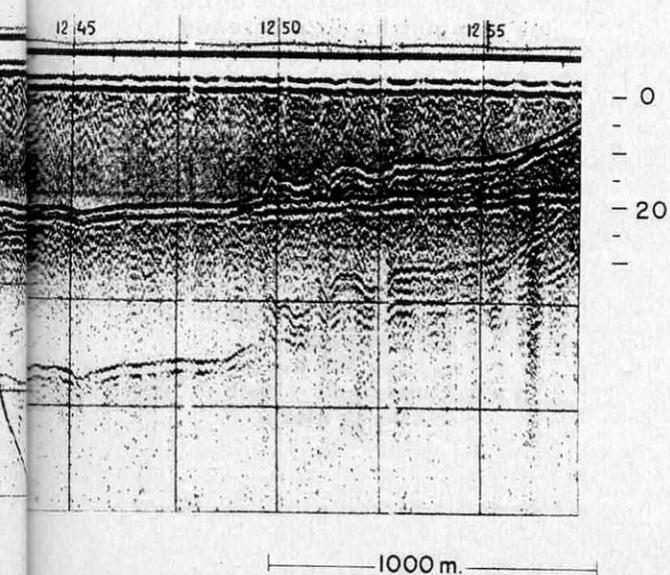
Le forage. L'étape suivante de la recherche, le forage ne bénéficie pas des mêmes avantages. Au contraire, le coût du forage en mer peut être estimé au moins à cinq fois le coût du forage à terre. Le forage en mer s'est cependant développé ces dernières années à une vitesse extraordinaire. La multiplicité des types d'engins employés pour effectuer des forages, d'exploration ou d'exploitation, mérite qu'on s'y arrête pour tenir une classification.

Le matériel de forage proprement dit ne diffère pratiquement pas du matériel utilisé

à terre. On connaît le principe du forage « Rotary » où l'outil, ou trépan, est entraîné en rotation au fond du trou par un train de tiges en acier (ou en aluminium), vissées les unes aux autres, par l'intermédiaire d'une table de rotation placée à quelques mètres au-dessus du sol. Des pompes font circuler la boue à l'intérieur de cette garniture pour graisser l'outil, remonter les déblais par l'espace annulaire compris entre les tiges et les parois, et accessoirement les colmater et empêcher une éruption en cas de découverte d'un gisement à pression élevée.

Le principal problème d'adaptation de cette technique aux conditions marines est celui du support de l'appareil de forage. On a d'abord travaillé à partir d'estacades construites au départ de la côte, de remblais, puis d'*îles artificielles*. Cette méthode est encore utilisée chaque fois que la profondeur de l'eau et la nature du sol le permettent. Des plates-formes de grandes dimensions, équipées pour plusieurs puits (jusqu'à 24), ont été récemment construites pour une hauteur de plus de 100 mètres d'eau.

On a ensuite essayé de rendre mobiles les structures, pour permettre leur déplacement d'un lieu de forage à l'autre, tout en les limitant à un travail au point fixe, posées sur le fond. Deux types de plates-formes répondant à ces conditions existent actuellement. Les premières, baptisées *barges submersibles*, ont été extrapolées des chalands submersibles utilisés en Louisiane : la plate-forme peut flotter, pour se déplacer, en vidangeant ses ballasts et reposer sur le fond, pour le forage, par remplissage de ces ballasts. Les secondes sont les *plates-formes auto-élévatrices*, transposition des engins utilisés par le génie civil pour les travaux portuaires ;



Profondeur
en m.

**Avant le temps du forage,
vient celui de la prospection,
géologique, magnétique ou sismique :
les méthodes récentes
de sismique réflexion
continue à faible profondeur
fournissent des enregistrements
à haute définition
dont nous donnons ici un exemple :
dunes de sable sur fonds rocheux
au large de La Rochelle.**



vue réduite

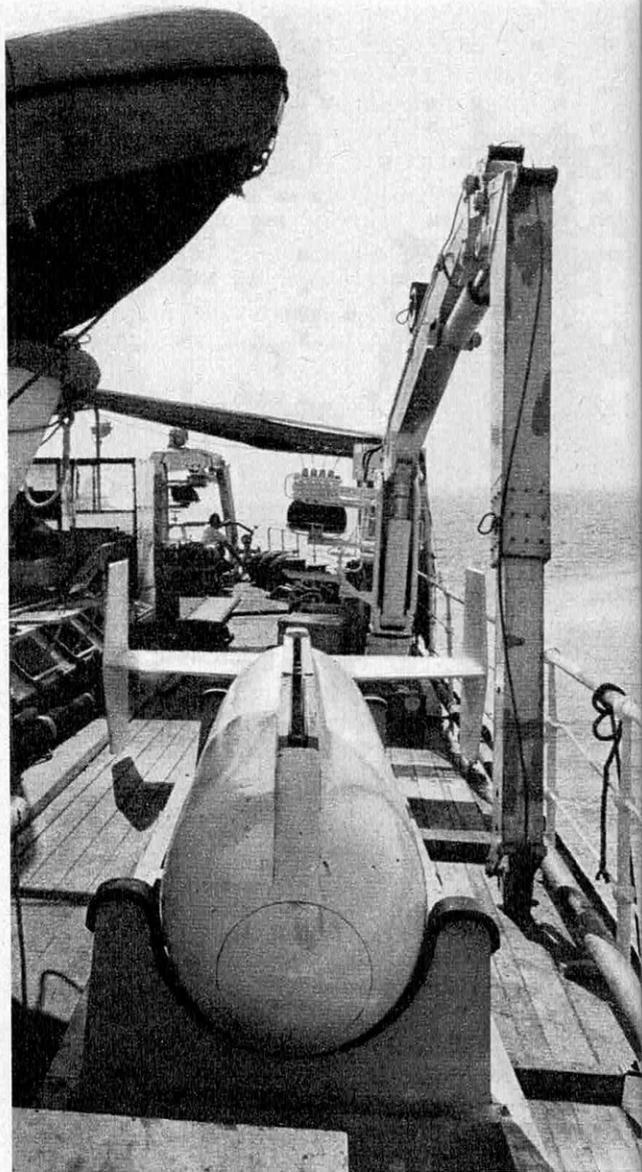
1 km.

— — —

vue normale



PHOTO I.F.P.



Corrigés par une méthode optique,
les enregistrements obtenus
au sonar latéral
fournissent de véritables
« photographies » des fonds marins,
sans distorsion. La méthode
consiste à remorquer un « poisson »
émettant sur une fréquence sonore
de plusieurs dizaines de kHz
et doté également d'un récepteur
des ondes réfléchies.
Le modèle présenté ci-dessus
mesure 4,30 m de longueur,
1,80 d'envergure
et pèse 650 kg.
La fréquence d'émission
est de 35 kHz.

leur mobilité est obtenue grâce au fait que les piles qui leur permettent de travailler en appui sur le fond peuvent être remontées par des dispositifs hydrauliques, électriques ou pneumatiques.

Enfin, pour augmenter la profondeur d'eau accessible, on a entrepris le forage à partir, soit d'un navire, soit d'une plate-forme flottante dite semi-sous-marine. Les premiers navires de forage ont été construits à partir de coques de récupération ; d'autres sont maintenant conçus à l'origine pour cet usage. Le forage se fait en général à travers un puits central. Les amplitudes de roulis et de tangage admissibles ne peuvent dépasser quelques degrés ; le pilonnement est moins gênant, des coulisses télescopiques pouvant être introduites dans le train de tiges. Par contre, l'ancrage doit limiter les débattemens horizontaux à moins de 5 % de la profondeur d'eau. L'utilisation de chaînes, ou de câbles à très haute limite élastique, et d'ancres pouvant peser jusqu'à 15 tonnes ne permet pas de dépasser actuellement la profondeur de 200 mètres.

En cas de tempête, le navire doit abandonner le forage et rentrer au port. Beaucoup ne sont pas autopropulsés et doivent être remorqués.

Un dispositif intéressant est celui du *Discoverer* équipé d'un touret central qui porte les treuils d'ancrage et autour duquel il peut tourner : le navire peut ainsi choisir le cap pour lequel les sollicitations dues aux éléments extérieurs sont les plus faibles.

Les plates-formes semi-sous-marines sont des engins flottants, donc mobiles, qui peuvent acquérir pour le forage une excellente stabilité grâce à l'augmentation de leur tirant d'eau par ballastage. L'ancêtre de ce type d'engin est le « Blue Water Rig N° 1 », à l'origine une barge sous-marine, que les Américains ont transformée pour son utilisation en plate-forme flottante.

Dans ce type d'engin, la réduction des mouvements de plate-forme est obtenue par une répartition judicieuse des volumes de carène immergés, qui permet un certain équilibrage de la structure dans les fortes houles. Une grande variété de dispositions existe : les engins les plus remarquables sont l'*Ocean Driller* de la Société Odeco, le type SEDCO de la Southeastern Drilling Corporation, l'*Ocean Prince*, etc. L'ancrage de ces plates-formes par grande profondeur pose encore de difficiles problèmes.

L'exploitation. L'étape suivante de la recherche du pétrole en mer consiste à définir le programme de développement et d'exploitation des gisements sous-marins découverts. Les installations correspondantes doivent évi-

demment être conçues pour durer toute la vie du gisement qui peut s'étendre d'une dizaine à une vingtaine d'années. Là encore, les techniques utilisées ont été simplement extrapolées des techniques terrestres : les têtes de puits sont ramenées en surface, sur des plates-formes fixes solidement ancrées sur le fond de la mer. Les stations de production (traitement, séparation) sont également placées à l'air libre, à proximité immédiate du champ, et les seules installations sous-marines de quelque importance sont à l'heure actuelle les conduites qui véhiculent l'effluent des puits producteurs jusqu'à la station centrale de production, puis de cette station jusqu'aux installations de stockage, généralement situées à terre.

TECHNIQUES NOUVELLES

Nous allons maintenant passer en revue les principaux résultats techniques obtenus en France pour ouvrir à la prospection et à l'exploitation pétrolière de nouveaux champs d'application.

Reconnaissance et localisation. Notre connaissance de la topographie et de la géologie superficielle des fonds marins, même limités aux plateaux continentaux, est encore pratiquement nulle. Les techniques océanographiques mises en œuvre jusqu'à ce jour ne permettent que des investigations sommaires dont nous pouvons donner immédiatement un exemple : les cartes bathymétriques tenues à jour par les services hydrographiques des différentes Marines sont établies à partir de profils de sondages qui, malgré leur précision, ne permettent pas d'interpoler entre ces profils. De plus, au-delà d'une certaine distance de la côte, lorsqu'on ne peut plus faire le point au cercle hydrographique, mais seulement, par exemple, par des moyens de radionavigation, le repérage de la position se trouve lui aussi souvent en défaut. La topographie des fonds sous-marins, dont la connaissance paraît constituer un préalable nécessaire à toute exploitation, reste ainsi largement imprécise.

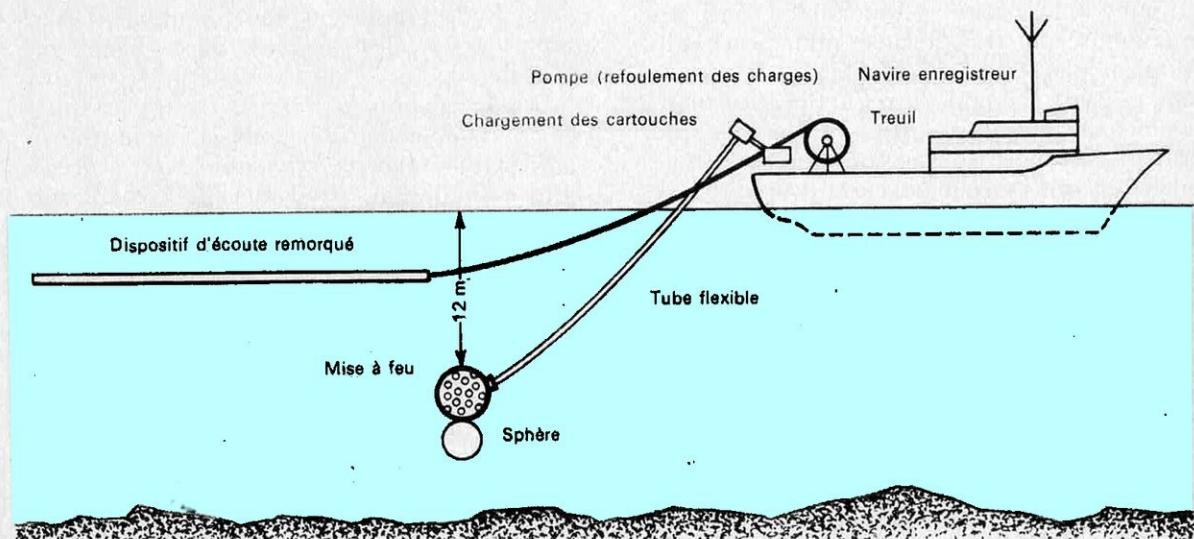
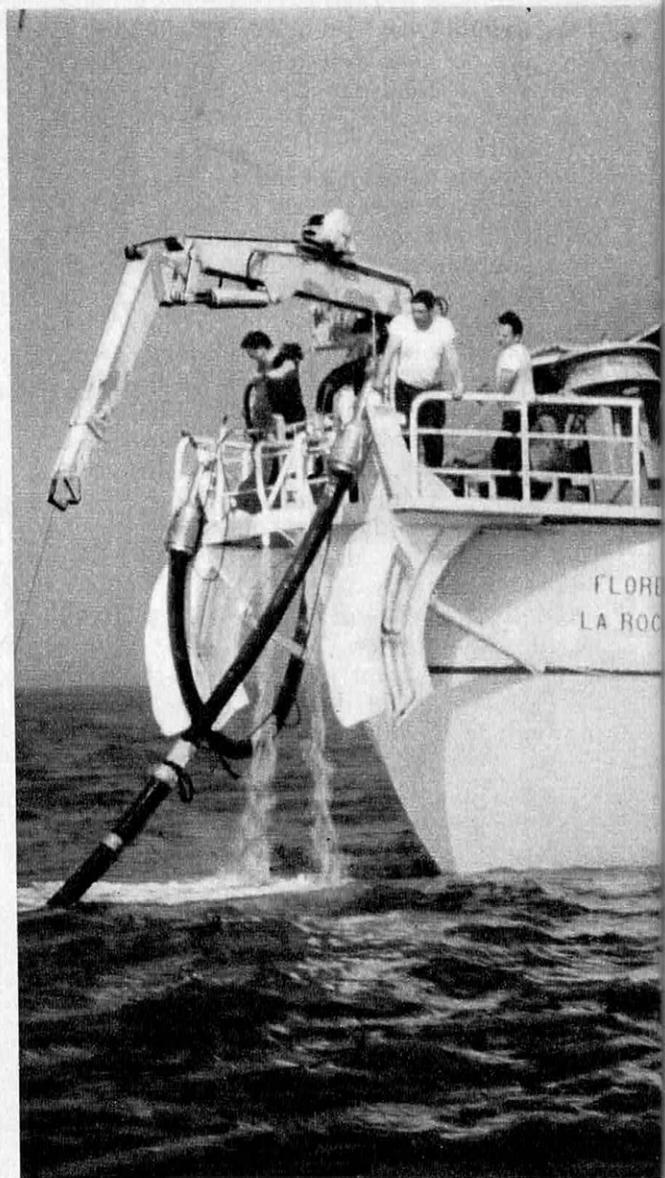
Quels sont donc les principaux problèmes qui se posent en cartographie sous-marine ? En premier lieu, il faut pouvoir se localiser. La précision et la portée des réseaux de radionavigation existants est loin de satisfaire tous les utilisateurs. Géologues et géophysiciens demandent à connaître leur position à quelques dizaines de mètres, sinon à quelques mètres près. On peut prévoir que l'avenir verra se généraliser la méthode de navigation par satellites artificiels. Les Etats-Unis ont déjà mis en place un réseau de

satellites de navigation à partir duquel il est possible de « faire le point » à une centaine de mètres près.

Pour obtenir une meilleure précision, en particulier dans le cas d'un sous-marin entre deux eaux ou au voisinage du fond, il est nécessaire de faire appel à des points de repère proches, au besoin créés pour la circonstance. Les ondes électromagnétiques ne pouvant être utilisées sous l'eau, on fera appel à l'acoustique sous-marine : des balises répondeuses à ultrasons immergées en des points déterminés et un émetteur-récepteur se trouvant à bord du navire ou du sous-marin, permettront grâce à un petit ordinateur une triangulation précise.

Une autre contribution de l'acoustique sous-marine consiste à mesurer par effet Doppler le chemin parcouru par rapport au fond. On réalise ainsi, par mesure de la vitesse et du cap, une estime qui n'est pas influencée par la dérive du navire. Pour les besoins des géophysiciens qui désirent pouvoir interpoler entre deux points calculés sur un réseau de satellites artificiels, un appareil de ce type est en cours de réalisation à l'Institut Français du Pétrole.

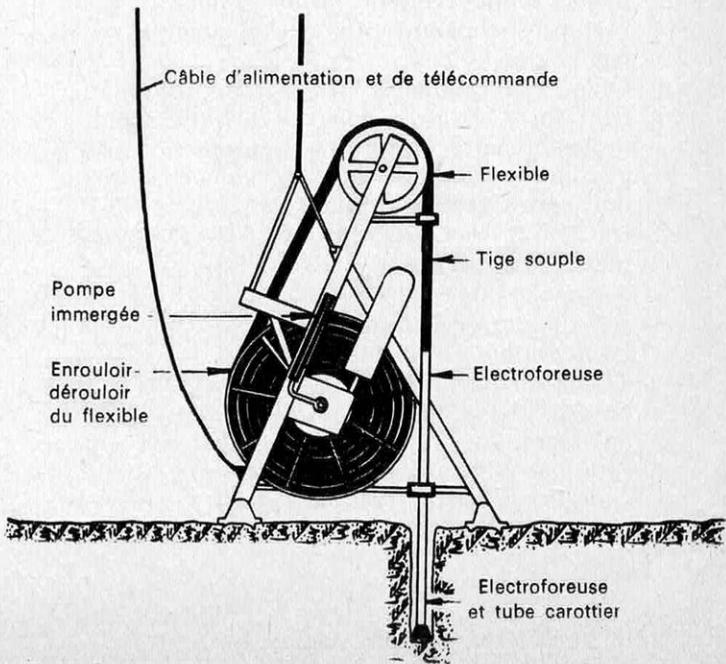
Le sondage sismique selon le procédé Flexotir, expérimenté à bord du « Florence » (photo ci-contre), ne met en œuvre que de faibles charges, non destructives de la faune, explosant en profondeur à l'intérieur d'une sphère d'acier. La sphère freine l'expansion de la bulle de gaz engendrée par l'explosion et interdit l'émission d'ondes de choc parasites. L'appareil récepteur est remorqué par le navire explorateur.





D'un poids voisin de six tonnes,
l'électrocarrotier sous-marin
peut travailler par 300 mètres de fond
et opérer des prélèvements
jusqu'à 40 m
à l'intérieur du sous-sol.
Il est entièrement télécommandé
depuis un navire de surface
non spécialisé.
Le prélèvement
de la carotte (1 m de longueur
et 9 cm de diamètre)
s'effectue à la profondeur désirée
à l'aide d'une électroforeuse
réliée au bâti-support
par une conduite flexible
(dessin ci-contre).

DOCUMENTS I.F.P.



En deuxième lieu, il apparaît nécessaire de disposer d'une méthode d'exploration rapide du plateau continental. Toute une panoplie de matériels est en cours de mise au point pour la reconnaissance indirecte de la géologie du fond. Des sondeurs acoustiques à basse fréquence ou des émetteurs à étincelles permettent en particulier une sismique réflexion continue peu profonde, qui indique les pendages des premières couches. Des sonars latéraux, dont un prototype vient d'être expérimenté avec succès à l'I.F.P., sont susceptibles de réaliser des « pseudo-photographies sonores » du fond de la mer, analogues aux photographies aériennes si précieuses en géologie terrestre.

On peut, enfin, avoir une indication relativement précise de la nature des terrains des premières couches en mesurant la vitesse du son dans ces couches ; les méthodes de sismique réfraction vont ainsi permettre une première identification des terrains cartographiés grâce aux deux méthodes précédentes. Sondeur acoustique, sonar latéral, mesures de vitesse peuvent donner lieu à des enregistrements simultanés, eux-mêmes traités par un ordinateur qui, recevant également les paramètres de position du navire, pourra tracer directement une carte de la morphologie du fond, qu'il faudra compléter par des prélèvements d'échantillons.

Nous voyons ainsi se dessiner une tendance moderne de l'océanographie qui utilisera largement les calculateurs électroniques et les méthodes de traitement de l'information.

Quant à la sismique à grande profondeur d'investigation, dont nous avons décrit plus haut le principe, elle présente encore d'assez gros inconvénients en mer :

-- l'importance des charges tirées (15 à 20 kg par tir) peut causer des dommages à la faune marine et se traduit par un panache d'une hauteur impressionnante, dont l'effet psychologique sur les pêcheurs n'est pas négligeable.

Quand l'explosion a lieu à une profondeur trop forte, la pulsation de la bulle de gaz qui en résulte perturbe sérieusement l'enregistrement. Du fait du faible amortissement des ondes sismiques dans la couche d'eau, les enregistrements en mer sont fréquemment perturbés par des répétitions ou des résonances dues aux réflexions multiples des signaux entre la surface et le fond de la mer. Pour éliminer ces inconvénients, la division « Géophysique » de l'I.F.P. a mis au point ces dernières années un nouveau procédé de sismique marine, le *Flexotir*. Ce procédé ne détruit pas la faune et a une énergie sismique comparable à l'explosion classique, ceci avec des charges beau-

coup plus faibles (100 g au lieu de 15 à 20 kg). Les petites charges explosent à une certaine profondeur au centre d'une sphère en acier percée de trous : la bulle de gaz produite par l'explosion se trouve freinée dans son expansion et ne trouve plus assez d'énergie pour émettre une deuxième ou une troisième onde de choc lors de la pulsation, comme c'était le cas en sismique classique. La contribution de la division « Forage » de l'I.F.P. à la reconnaissance géologique du substratum, ainsi qu'aux études de sols intéressants les travaux de génie civil sous-marin, s'est traduite par la mise au point de toute une panoplie d'appareils de prélèvements d'échantillons, électrocarottiers, vibrofoncemeuses, susceptibles d'apporter les renseignements nécessaires à l'implantation des structures sous-marines et à l'ancre des grosses plates-formes.

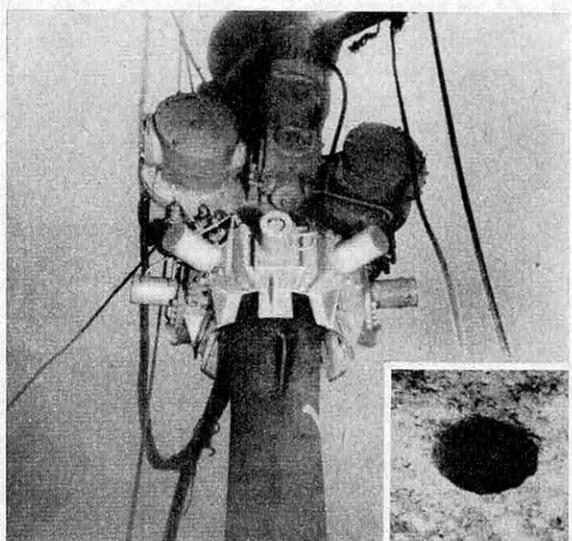


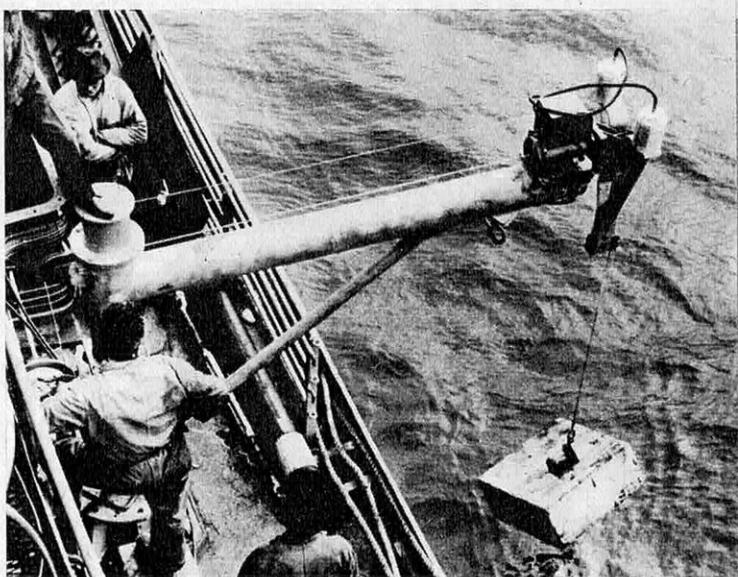
PHOTO I.F.P.

Dans l'arsenal des techniques d'exploration et de forage, la « vibrofonceuse », ci-dessus, est spécialement destinée au prélèvement de sédiments meubles jusqu'à 30 mètres de profondeur dans le sous-sol marin. Le diamètre du tube peut atteindre 35 cm. La même technique est utilisable pour la mise en place de pieux d'ancre en béton.

Forage. Pour opérer par grandes profondeurs d'eau, l'analyse systématique des conditions nouvelles du travail en mer a conduit les ingénieurs de l'I.F.P. à étudier les différentes solutions possibles aux trois problèmes fondamentaux suivants :

- maintien en position fixe par rapport au fond des engins flottants utilisés pour le forage et l'équipement des puits, la pose des conduites sous-marines et l'installation des différents auxiliaires de production ;
- élimination ou réduction des mouvements engendrés dans ces structures par l'action de la houle, des vents, des courants ;
- traversée de la tranche d'eau et mise au point d'appareils télécommandés qui seront appelés, chaque fois que cela est possible, à travailler directement sur le fond.

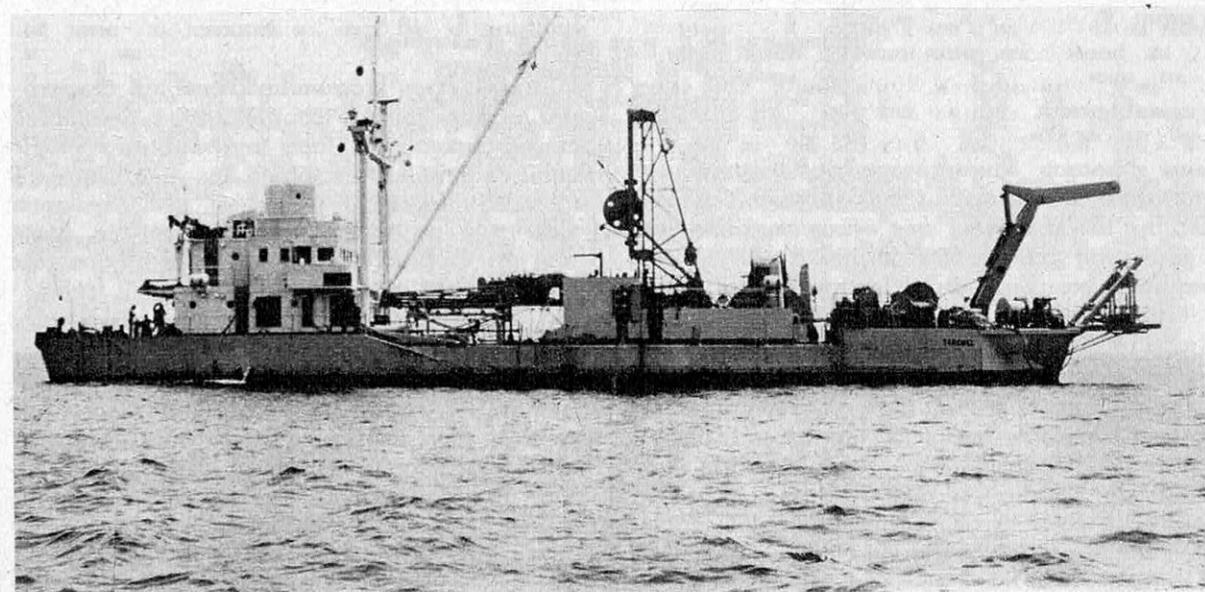
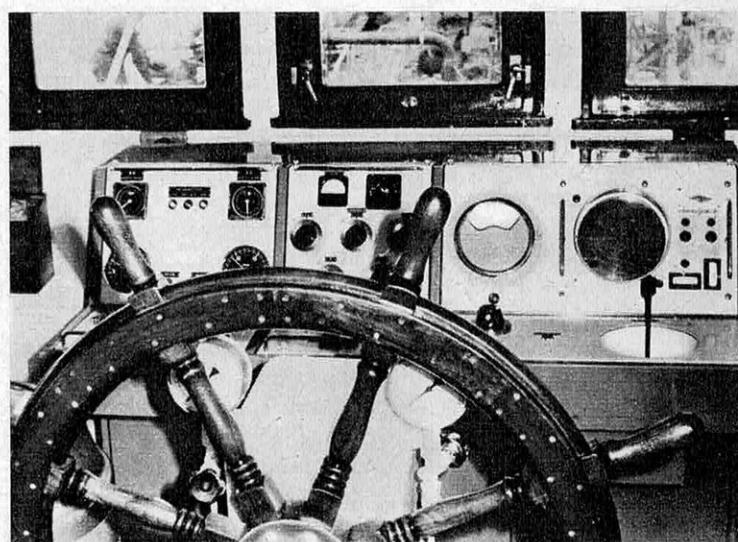
Pour le maintien en position des engins flot-



Le navire d'expérimentation des techniques pétrolières « Terebel » (photo en bas de page) a été doté d'un système d'ancrage dynamique, mis au point par Thomson-Houston, pour la stabilisation en cap et en position.

Le point de référence est une gueuse de béton immergée (ci-contre, en haut), reliée au navire par un câble à tension constante.

Un inclinomètre délivre une tension proportionnelle à l'écart du câble avec la verticale ; l'écart en cap est fourni par un gyrocompas. Ces données peuvent être visualisées sur un écran cathodique (photo ci-contre, à droite), et les corrections apportées à l'aide du « manche à balai » placé en face de l'écran, ou entièrement traitées par un calculateur analogique.



PHOTOS I.F.P. ET C.F.T.H.

tants, on a expérimenté et mis au point le procédé « d'ancrage dynamique » qui remplace l'ancrage funiculaire classique lorsque câbles et chaînes ne sont plus utilisables du fait des énormes efforts qu'ils auront à supporter (en particulier dans les conditions limites pouvant être atteintes pendant une tempête). Des propulseurs peuvent exercer poussée et couple nécessaires pour contre-carrer l'influence des éléments extérieurs. Ces propulseurs sont asservis à un détecteur de position qui peut être réalisé simplement par un appareil de mesure de l'inclinaison d'un fil tendu entre la surface et le fond (inclinomètre) ou, pour l'accès aux zones à grande profondeur d'eau et à forts courants, au moyen de balises ultrasonores (BREMIUS). Ces méthodes d'ancrage sont plus logiques que la méthode classique, qui n'a d'ailleurs jamais été prévue pour maintenir un engin flottant en position rigoureusement fixe et n'est justifiée que pour l'ancrage des navires sur rade.

Pour s'affranchir des mouvements de plates-formes, différents dispositifs peuvent être utilisés : amortisseurs de pilonnement, treuils à tension constante, tables de travail oscillantes asservies au roulis et au tangage, etc. Des formes de carène appropriées (comme celles des plates-formes semi-sabmersibles de forage) ou des citernes de stabilisation peuvent d'autre part réduire considérablement les déplacements et les mouvements angulaires provoqués par l'agitation de la mer. Dans ce domaine, l'Institut Français du Pétrole a étudié avec la société Neptune une plate-forme semi-sabmersible de forage adaptée aux conditions particulièrement sévères du golfe de Gascogne et de la mer du Nord. Son originalité réside dans la disposition des volumes de carène aux sommets d'un pentagone favorisant la régularité des réponses à la houle en pilonnement, débattement, roulis et tangage. Ces mouvements sont considérablement réduits grâce à l'optimisation des dimensions des éléments de carène en vue d'obtenir l'équilibrage de la structure pour les conditions de mer prévisibles. Des études théoriques et des essais sur modèles réduits en bassin ont permis d'assurer cet équilibrage. En outre, la forme des cinq flotteurs a été spécialement étudiée pour faciliter les remorquages au tirant d'eau « léger ».

Une plate-forme de ce type, le **Pentagone 81**, est en construction à la Compagnie Française d'Entreprises Métalliques pour la Société de Forage en mer Neptune, sous licence I.F.P. Cette plate-forme aura un déplacement léger de l'ordre de 9 000 tonnes, sa longueur hors tout sera de 101,5 m et sa

Dans les zones à grande profondeur d'eau, la détection des écarts de position de l'engin flottant par rapport au forage est avantagéusement réalisée au moyen de balises à réponse électromagnétique (photo ci-dessous), interrogées par ultrasons à partir du navire. Un système de quatre balises de ce type, associées à un calculateur électronique, a été expérimenté à bord du « Terebel ».

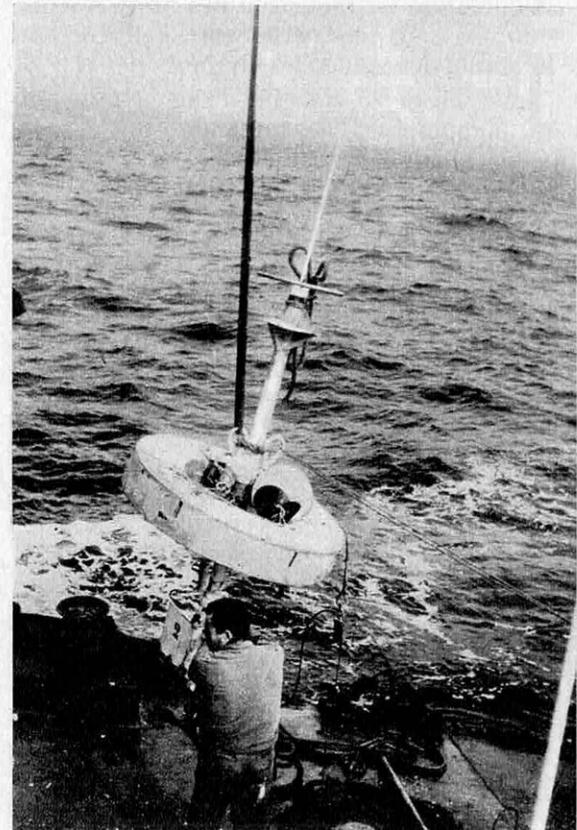


PHOTO I.F.P.

hauteur de 40,5 m au sommet du pont supérieur.

Pour traverser la tranche d'eau, on fera appel à des liaisons souples du type câbles électriques ou flexibles hydrauliques particulièrement bien adaptées aux conditions de mer difficiles.

Ces trois problèmes du maintien en position du support flottant, de la réduction des mouvements de plate-forme et de la traversée de la tranche d'eau ont été étudiés et résolus pour la réalisation du *Térébel*, navire expérimental qui a permis notamment l'expérimentation de la technique du *flexoforage* en mer. Le *flexoforage* utilise une garniture flexible, qui remplace la traditionnelle garniture rigide du *rotary*, à l'extrémité de laquelle est suspendu un moteur (moteur électrique ou turbine) attaquant directement l'outil de forage. Parmi les avantages du *flexoforage*

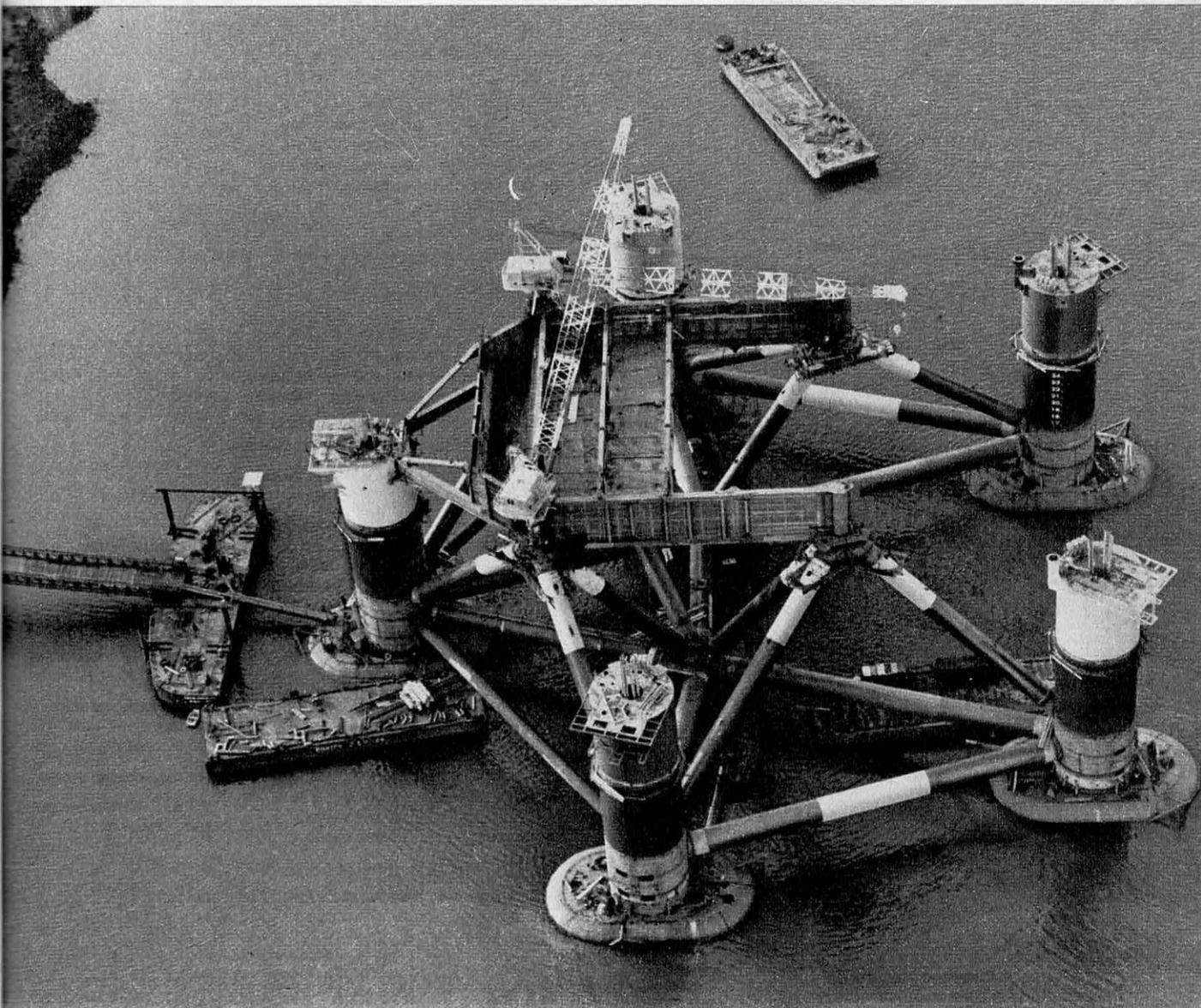


PHOTO C.F.E.M.

**Accroître la profondeur d'investigation
jusqu'à deux cents mètres,
en assurant à la plate-forme
une stabilité aussi grande que possible,
a conduit l'I.F.P.**

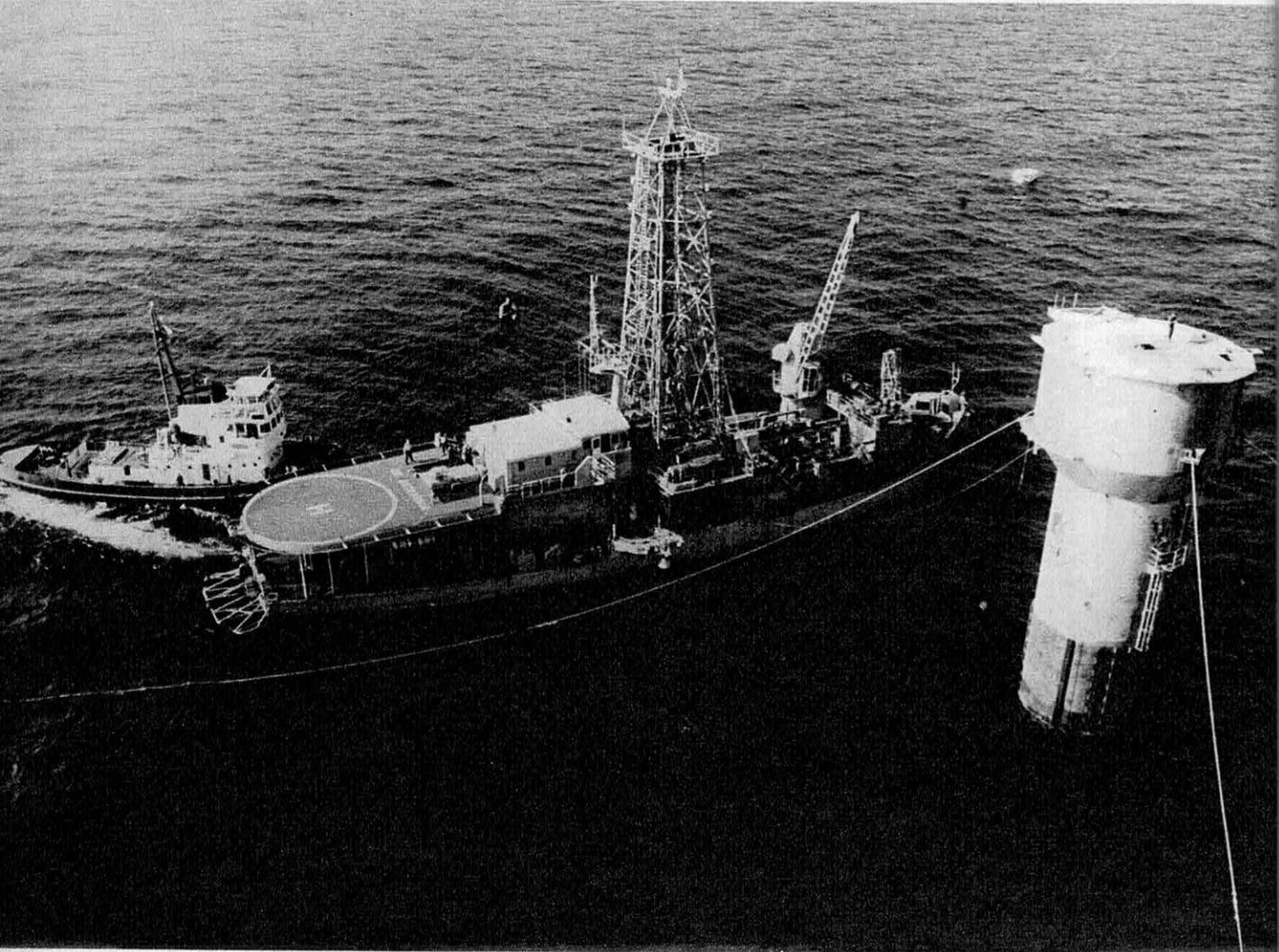
**et la Compagnie Française d'Entreprises Métalliques
à l'étude d'une plate-forme semi-sabmersible
de formule originale.**

**Cette plate-forme Pentagone 81, actuellement en voie d'achèvement au Havre,
a été définie quant à sa forme
et au dimensionnement de ses éléments,
à l'aide de modèles mathématiques
traités par ordinateur,
en envisageant tous les états possibles de la mer.**

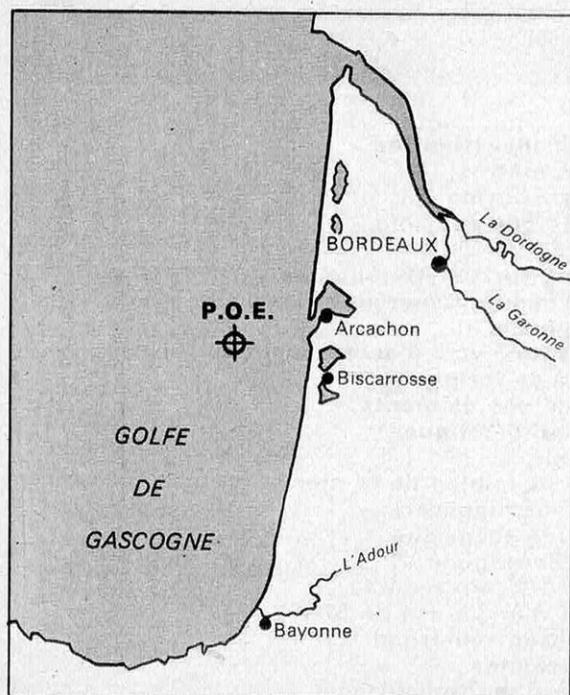
**Des essais en bassin sur maquette
ont complété cette étude théorique.**

**Le volume général de Pentagone 81
s'inscrira dans un cube de 100 m de côté;
la distance entre deux ballasts d'angle est de 81 m.**

**Le déplacement en position remorque
atteindra 11 000 tonnes
et environ 18 000 tonnes en position forage.**



DOCUMENTS ELF - ESSO - BRAP DE C. G. DORIS

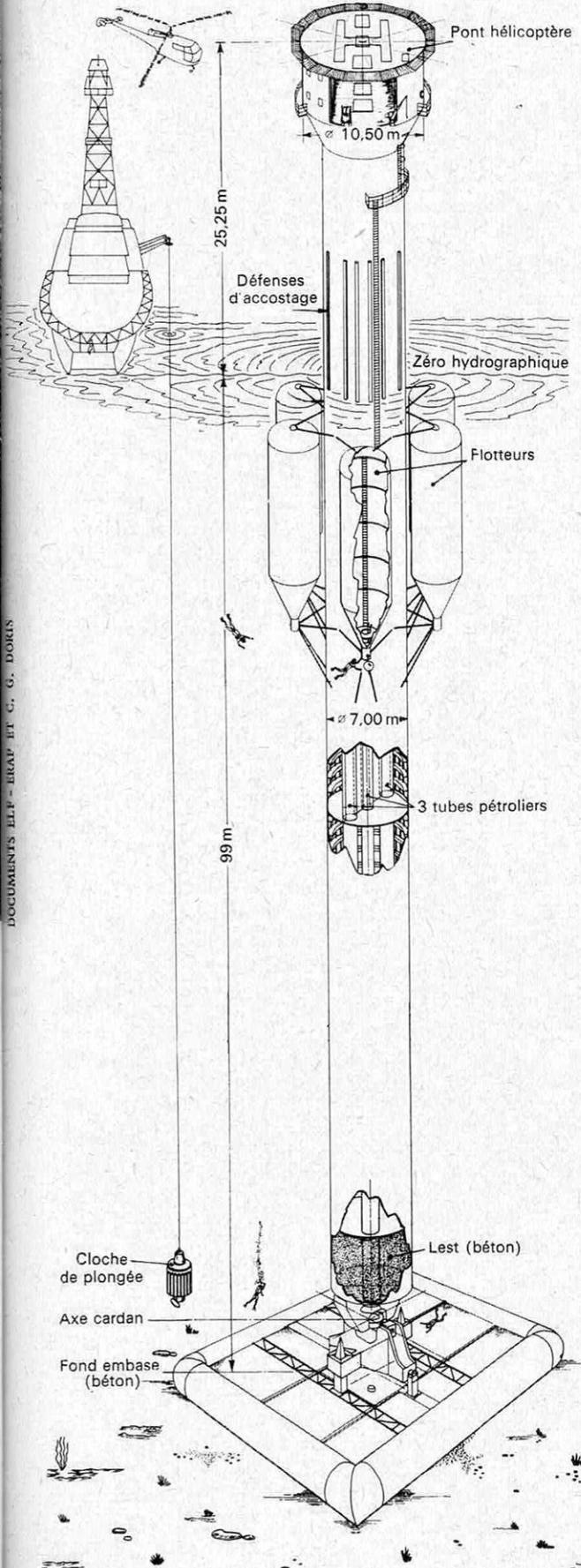


La P.O.E., plate-forme oscillante expérimentale, a été mise en place au cours des derniers mois au large de la côte landaise (carte ci-contre) avec le concours du navire « Astragale » de la Compagnie Doris (photo ci-dessus).

Sur le dessin en page de droite sont indiquées les principales dimensions de cette plate-forme en forme de fût cylindrique articulé à la base et fortement lesté de béton.

L'articulation à cardan autorise un débattement de l'ensemble sous l'effet de la houle ou des vents.

Les quartiers d'habitation sont installés dans la « tête » de la plate-forme.



en mer, il faut signaler la liaison souple qu'il réalise entre la surface et la tête de puits placée au fond et la continuité de la garniture qui permet de réduire considérablement les temps de manœuvre. De plus, la présence de câbles électriques incorporés à la gaine du flexible permet, par la connaissance des paramètres de fond, une automatisation complète du forage.

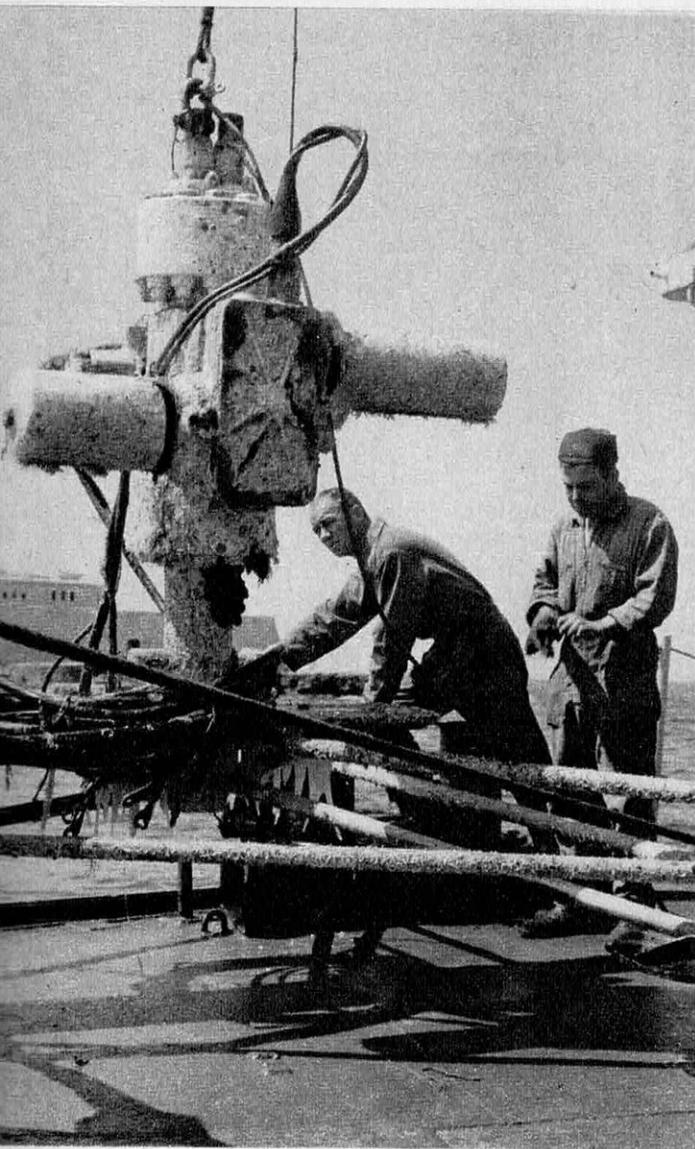
Production. Il faut citer tout d'abord l'expérimentation, entreprise dans le cadre du programme de recherche de l'ERAP, avec la participation de la S.N.P.A. et de la C.F.P., d'une tête de puits sous-marine de fabrication américaine (National), utilisant la technique TFL (des outils pompés à travers les conduites remplacent la méthode classique de travail au câble). Le navire d'intervention *Astragale* a été spécialement transformé pour procéder aux essais des différentes opérations possibles sur cette tête de puits. Le programme correspondant se déroule actuellement au Gabon, sur un puits du champ d'Anguille.

D'autre part, une plate-forme oscillante expérimentale (P.O.E.), étudiée et construite par la CFEM, a été mise en place récemment dans le golfe de Gascogne par 100 m de profondeur. Le fût cylindrique vertical est ancré au fond par un lest important et articulé sur ce lest par un dispositif à la cardan. Les efforts engendrés par la houle sur la plate-forme sont ainsi en partie compensés par le mouvement que prend celle-ci sous l'effet des sollicitations extérieures (il a fallu renoncer rapidement à s'opposer à ce mouvement par un quelconque système d'amarres). L'expérience dira si ce procédé préfigure la future liaison fond-surface qu'il est nécessaire de réaliser pour exploiter un champ sous-marin profond.

Une tête de production sous-marine de conception entièrement française a été également mise au point par l'Institut Français du Pétrole. Les systèmes de motorisation (hydraulique ou électrique) et de télécommande (ultrasons) sont en cours d'essai sur un puits expérimental foré sous 80 mètres d'eau par l'*Astragale* en Méditerranée.

D'autre part, les récents progrès réalisés dans la fabrication de flexibles armés en grande longueur continue et les hautes caractéristiques obtenues au cours de la mise au point du flexoforage permettent d'envisager l'utilisation de ces flexibles pour la constitution des réseaux de collecte. Ces canalisations, comportant des conducteurs électriques, permettraient en outre l'approvisionnement en énergie des têtes de puits, la télécommande ou la télémesure.

Interventions. Différentes méthodes d'in-



Une tête de production sous-marine expérimentale, remontée en surface après essais de longue durée sous les eaux de la Méditerranée.

Ce matériel, à moteurs hydrauliques et électriques, est télécommandé par ultrasons à partir de la surface.

Intervention sur ces têtes de puits ont été envisagées et essayées avec succès : travail au câble depuis la surface à partir d'une plate-forme stabilisée aérienne (P.S.A.) utilisant un prolongateur flexible du puits proprement dit et permettant de se ramener aux conditions de travail à terre ; treuil immergeable télécommandé mis au point par la Société Flopétrol.

Des robots télémanipulateurs non spécialisés (tel que le « Télénauta ») ou spécialisés (tels que le « Robot d'Immersion de Conduite »

(RIC) ou le « Robot d'Aboutement de Conduite » (RAC) ont été réalisés pour opérer sur le fond de la mer, quelle que soit la pression environnante, sans nécessiter d'intervention humaine.

On voit ainsi se dessiner la tendance actuelle. Si les techniques nouvelles d'exploitation des gisements sous-marins d'hydrocarbures par grande profondeur d'eau font un large appel à des matériels télécommandés depuis la surface, il ne faut pas en conclure que l'on dédaignera le recours aux plongeurs. L'intervention humaine directe sur le fond de la mer paraît extrêmement souhaitable, d'une part au moment de l'installation des têtes de puits, d'autre part pour procéder aux réparations indispensables lorsque les robots se trouveront en défaut. La profondeur accessible aux plongeurs sera toutefois considérablement limitée dans l'avenir par les problèmes physiologiques et même psychologiques. Il faut donc s'attendre à ce qu'au-delà d'une certaine limite, l'intervention humaine ne soit plus possible qu'au moyen de sous-marins à la pression atmosphérique.

Ces trois options, télécommande, plongeurs, sous-marins, ne sont d'ailleurs pas concurrentes mais complémentaires. Une synthèse des trois méthodes de travail a été tentée ces derniers mois et la construction d'un sous-marin transportant une « maison sous la mer », l'Argyronète, qui vient d'être confiée au Centre d'Etudes Marines Avancées par l'I.F.P. et le C.N.E.X.O., permettra de vérifier le bien-fondé de cette ligne directrice.

Ce tour d'horizon très incomplet des techniques de prospection et d'exploitation des gisements sous-marins d'hydrocarbures nous montre qu'il ne semble pas y avoir d'obstacle infranchissable à la mise en valeur des ressources pétrolières en mer, quelles que soit la profondeur d'eau et les conditions océanographiques et météorologiques.

L'activité des pétroliers en mer nécessitera encore un immense effort de recherche scientifique et technique. Cet effort porte déjà ses fruits, non seulement pour l'accroissement de nos réserves énergétiques, mais également dans le domaine plus général de l'océanologie. Au moment où la France vient de se doter d'un organisme de coordination des différentes activités en ce domaine, nous ne pouvons que souhaiter que la conjugaison des programmes de recherche, français, européens et même mondiaux, aboutisse à des résultats positifs pour l'exploitation des richesses océaniques.

Pierre WILLM

Directeur du Programme Marine
à l'I.F.P.

LES GISEMENTS PETROLIERS OFF-SHORE

Dans l'esprit du public, les chercheurs de pétrole ont été parfois assimilés aux pionniers partis vers l'Ouest, à la recherche de l'or. Il est vrai que le rêve de la chance, les risques de ruine, les enrichissements soudains résultant de découvertes surprenantes donnent encore à l'exploration pétrolière un visage particulier. Ingénieurs disciplinés au service de puissantes compagnies internationales, aventuriers jouant leur fortune personnelle ou celle de leur prochain, les techniciens du pétrole ont planté leurs derricks sur tous les continents, dans les rues de Los Angeles, dans la jungle indonésienne, dans les sables du Moyen-Orient. Depuis quelques années, c'est la recherche sous-marine qui retient l'attention du public. Par delà son caractère spectaculaire, on peut se demander ce qu'elle représente effectivement, quelle est son importance réelle dans la production d'hydrocarbures et son rôle dans la géographie économique mondiale.

On sait que dans les zones actuellement prospectées, la géologie sédimentaire sous-marine n'est pas très différente de celle des continents. Les lignes de rivage de nos plages, si elles paraissent stables à l'échelle humaine, se sont constamment déplacées au cours des temps géologiques. La recherche et l'exploitation des hydrocarbures en mer utilisent donc des techniques et des installations déjà connues à terre.

Pourquoi les pétroliers ont-ils tant tardé à s'intéresser au domaine marin ? A partir des indices de surface, ceux que connaissaient déjà les Mésopotamiens, ceux aussi qui ont attiré le colonel Drake quelques millénaires plus tard, les pétroliers ont toujours dû progresser vers des zones d'accès de plus en plus difficile. Animés par un goût du risque et une audace naturels à la profession, ils fournissent un effort à la mesure d'une consommation qui se développe à une cadence sans cesse accélérée. S'ils se sont attaqués aux jungles, aux déserts et aux glaces avant de s'aventurer en mer, c'est en raison des conditions spécifiques du milieu marin. Ils doivent y affronter de nouveaux obstacles, la houle, le vent, les courants, l'isolement.

Pour travailler dans ce milieu hostile, ils doivent bouleverser leurs habitudes, remplacer leurs camions par des bateaux, abandonner l'avion pour l'hélicoptère, installer les tours de forage sur des engins flottants fixes ou mobiles, placer les têtes de production sur des plates-formes solidaires du fond marin. En fait, ils se sont jetés à l'eau assez progressivement.

En 1894, ils ont reconnu le sous-sol de la mer par des puits déviés, puis ils ont construit des estacades. En 1933 eurent lieu les premiers forages dans le lac Maracaïbo et, en 1936, dans le golfe du Mexique. La première exploitation en mer s'est faite en Louisiane en 1938. Ce n'est qu'en 1945 qu'a commencé l'exploration sismique sérieuse du domaine marin et le forage par grande profondeur d'eau n'a débuté qu'en 1954.

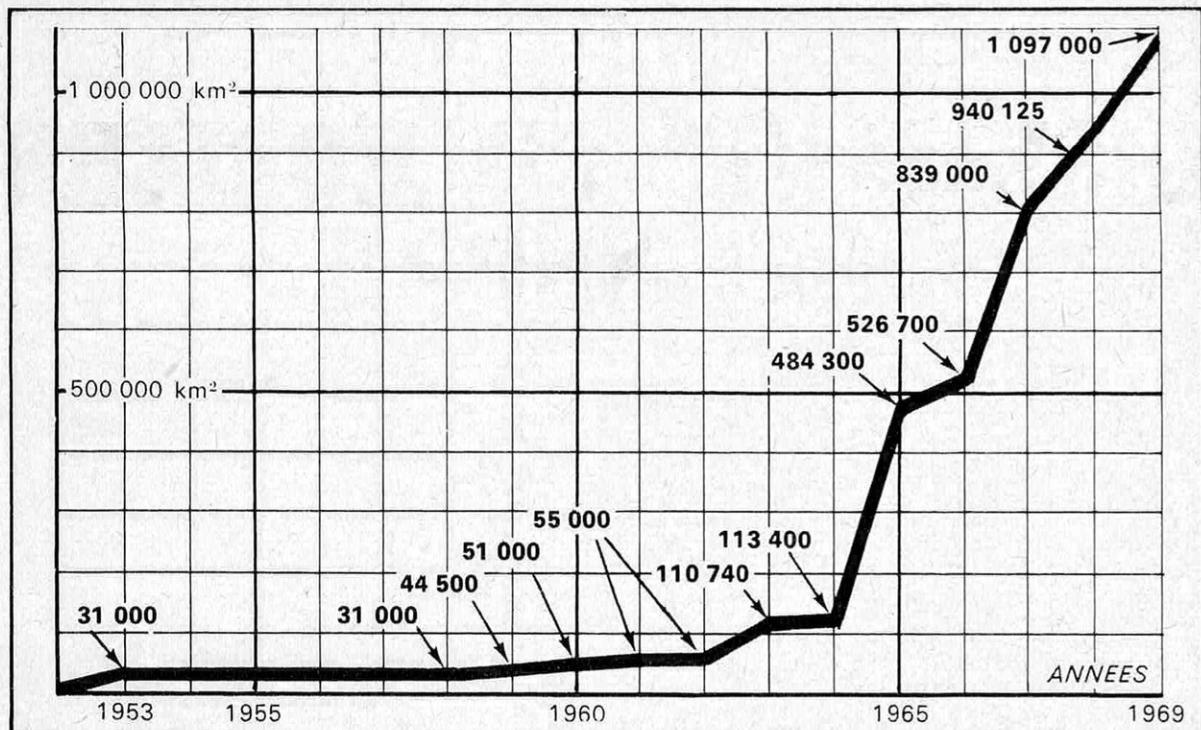
La recherche en mer

Rappelons quelques dimensions caractéristiques de notre planète :

- superficie des mers : 360 millions de km² ;
- superficie des terres : 150 millions de km² ;
- profondeur moyenne des océans : 3 800 m.

L'expérience a montré qu'un tiers seulement de la surface des terres renfermait des sédiments intéressants du point de vue pétrolier. Sur ces 52 millions de km², 25 millions seulement ont un intérêt réel. Si l'on examine maintenant le domaine marin, on peut observer que, comme à terre, une partie seulement du sous-sol présente un intérêt pétrolier. A cette première limite, géologique, se superpose une seconde limite, technique : la profondeur de l'eau. Il n'est pas question pour l'instant d'exploiter les fosses océaniques : les pétroliers doivent se limiter au plateau continental qui borde les 250 000 km de rivage. Les chiffres cités dans la littérature divergent selon la barrière de profondeur envisagée. Si l'on se limite à des fonds de 2 000 m, ce qui est déjà une vue futuriste, on peut avancer le chiffre de 32 millions de km² de superficie prospectable, dont 11 millions réellement intéressants.

LES AIRES PROSPECTÉES PAR LES GROUPES PÉTROLIERS FRANÇAIS.



Cette superficie est importante, mais sa valeur pétrolière réelle est pratiquement inconnue, sauf en de rares régions. Ceci explique que pratiquement tous les plateaux continentaux soient couverts par des titres miniers qui permettent de rechercher et d'exploiter les hydrocarbures, en accord avec les états riverains. Les rares zones restées libres ne le sont que pour des motifs d'ordre politique ou à cause d'une absence totale d'intérêt géologique.

Les grandes sociétés mondiales se sont taillé la part du lion dans le choix de ces zones. Les états ont généralement préféré accorder des droits miniers à des groupes ayant de grandes capacités financières et payant de forts « bonus » (droit au bail minier), ce qui, dans cette course au nouveau « Far-West », a pratiquement éliminé les « petits ». Comment se répartissent, à l'heure actuelle, les zones de prospection ?

AMÉRIQUE DU NORD

Etats-Unis. C'est dans la région du golfe du Mexique et particulièrement sur le plateau continental de la Louisiane qu'a porté l'effort le plus important d'exploration. L'intérêt pétrolier de cette zone se reflète d'ailleurs dans les prix de vente assez élevés qu'on peut noter lors des enchères concernant les droits miniers du sous-sol (60 millions de francs pour 20 km², chiffre record). En Californie, les premiers forages ont été

exécutés en déviation à partir de la côte. Du fait de l'approfondissement rapide des fonds dans cette zone, il a fallu attendre la mise en service de plates-formes capables de forer dans plus de 120 m d'eau pour assister à une augmentation rapide de l'effort d'exploration.

Canada. Les travaux débutent seulement. Les groupes français ont des intérêts importants dans la baie d'Hudson.

Alaska. Malgré des conditions climatiques très difficiles, les forages se poursuivent dans le golfe du Cook Inlet.

Mexique. Les gisements connus à terre ont été recherchés en mer, avec succès, dans le golfe du Mexique.

AMÉRIQUE DU SUD

Vénézuela. Une partie importante des gisements est située sous les eaux du lac Maracaïbo.

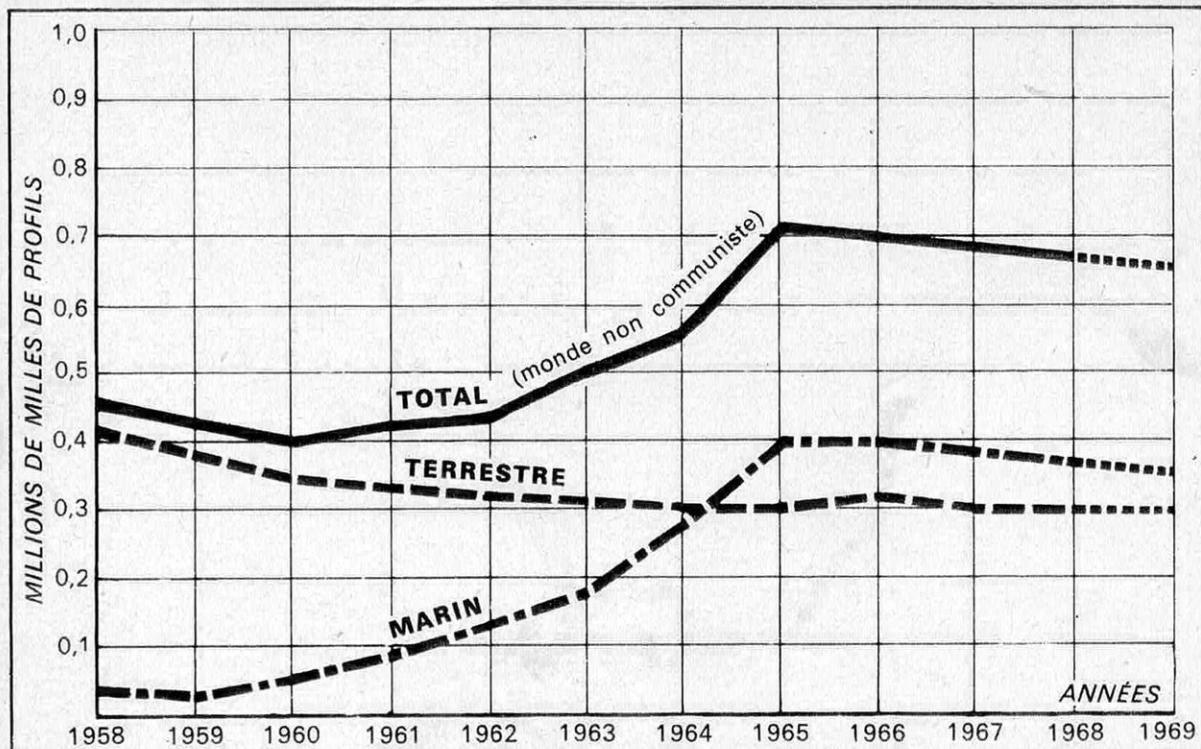
Guyanes. Au large des côtes des Guyanes, de nombreuses campagnes de géophysique ont été réalisées. Plusieurs forages ont été effectués sur le plateau continental de la Guyane française.

Brésil. Les recherches dans cette zone viennent d'aboutir à un nouveau succès.

Argentine. Ce pays a récemment offert aux groupes pétroliers des zones de prospection.

Autres pays. Le plateau continental péruvien, équatorien et colombien est couvert par des titres miniers et quelques forages ont déjà eu lieu.

COMMENT LA PROSPECTION GÉOPHYSIQUE S'EST DÉPLACÉE VERS LA MER.



EUROPE

Depuis de nombreuses années, l'Europe a le souci d'assurer son indépendance énergétique, et le premier moyen est bien de trouver des hydrocarbures à l'intérieur de ses frontières.

France. Plusieurs permis de recherche ont été attribués ou demandés dans le golfe de Gascogne et en Méditerranée. L'exploration s'y poursuit très activement ; une première campagne de forage dans le golfe de Gascogne s'est terminée sans découverte commerciale. La plate-forme semi-submersible *Pentagone 81*, en construction au Havre, s'apprête à reprendre les sondages à des profondeurs supérieures à 100 m. Un navire de forage travaille au large de Sète.

Mer du Nord. Des titres de recherche ont été attribués par les pays riverains, qui sont parvenus à s'entendre sur le difficile problème de la répartition de leur souveraineté. Rapidement, les travaux ont abouti à la découverte de gisements de gaz dont les réserves sont de l'ordre de 1 000 milliards de m³. Une fois de plus, la mer venait au secours de la Grande-Bretagne.

Italie. L'Adriatique a aussi répondu rapidement aux espoirs de l'industrie pétrolière.

U.R.S.S. L'activité marine est principalement développée en mer Caspienne, au large de la presqu'île d'Apscheron. L'exploitation se fait à partir d'estacades qui ont été construites sur plus de 200 km de longueur.

MOYEN-ORIENT

Le golfe Persique est la zone où l'exploration en mer présente les perspectives les plus favorables. L'activité pétrolière y est très importante.

AFRIQUE

Des sondages sismiques ont été réalisés dans la plupart des pays côtiers. Les plateaux continentaux qui paraissent les plus attrayants sont ceux d'Egypte (golfe de Suez), du Nigeria, du Gabon et de la Libye.

EXTRÊME-ORIENT

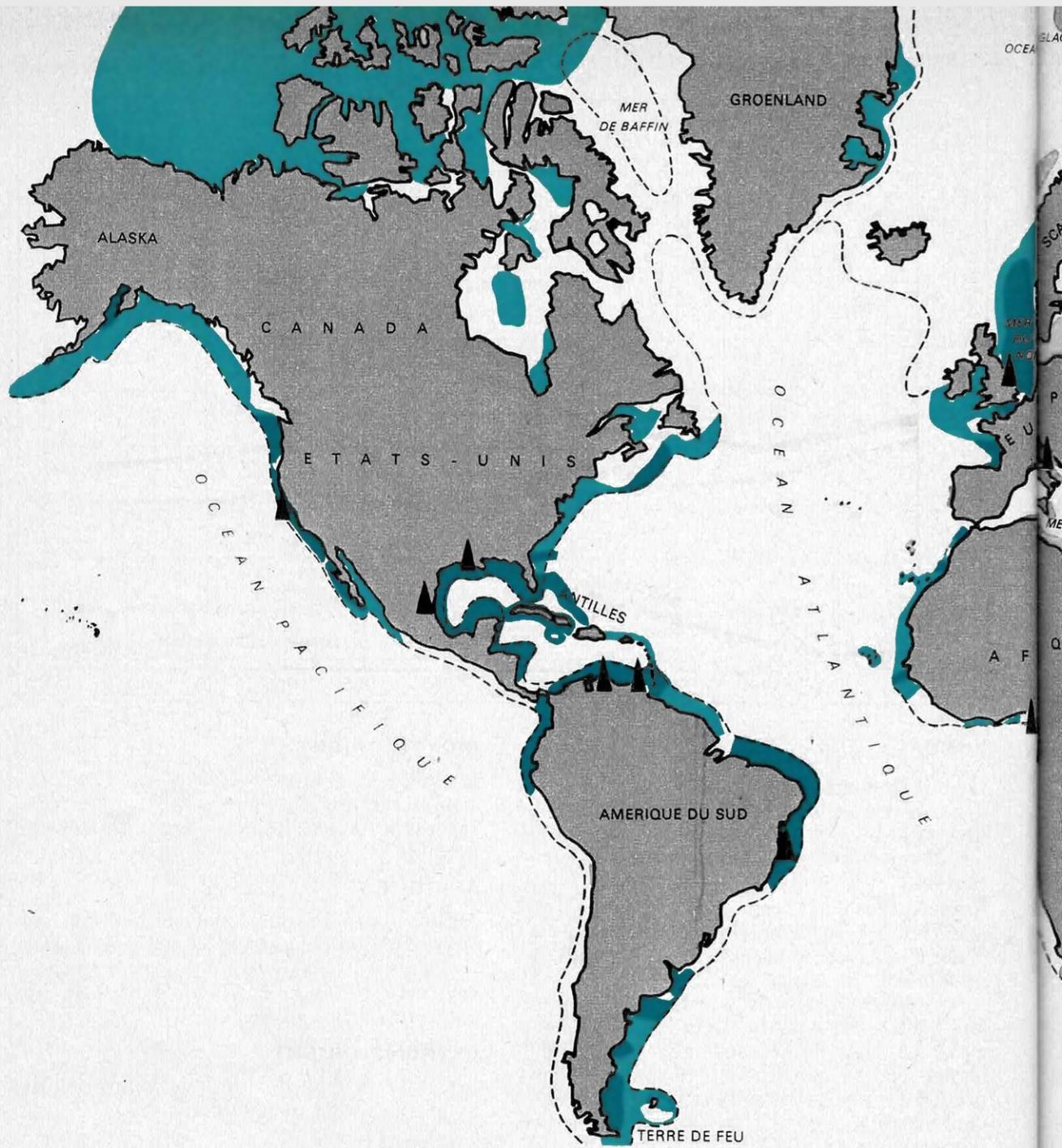
Les travaux n'ont débuté que depuis peu de temps dans cette région du monde.

AUSTRALIE

La prospection marine ne fait que commencer sur le plateau continental australien. La zone du détroit de Bass entre l'Australie et la Tasmanie a déjà donné lieu à plusieurs découvertes d'huile et de gaz. Les Français possèdent de larges superficies au nord-ouest de l'Australie dans le golfe de Bonaparte.

Dans cette compétition internationale, comme on a pu en juger au passage, les groupes français, la Compagnie Française des Pétroles, la Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine et le groupe ELF ne sont pas restés inactifs. Actuellement, l'aire prospectée est deux fois plus grande que la France.

Cette augmentation des périmètres de recherche marins a provoqué un véritable dé-



placement de l'activité de la géophysique. Le graphique en page 51 indique ce renversement de tendance et le caractère extrêmement récent de l'activité marine du point de vue de la géophysique.

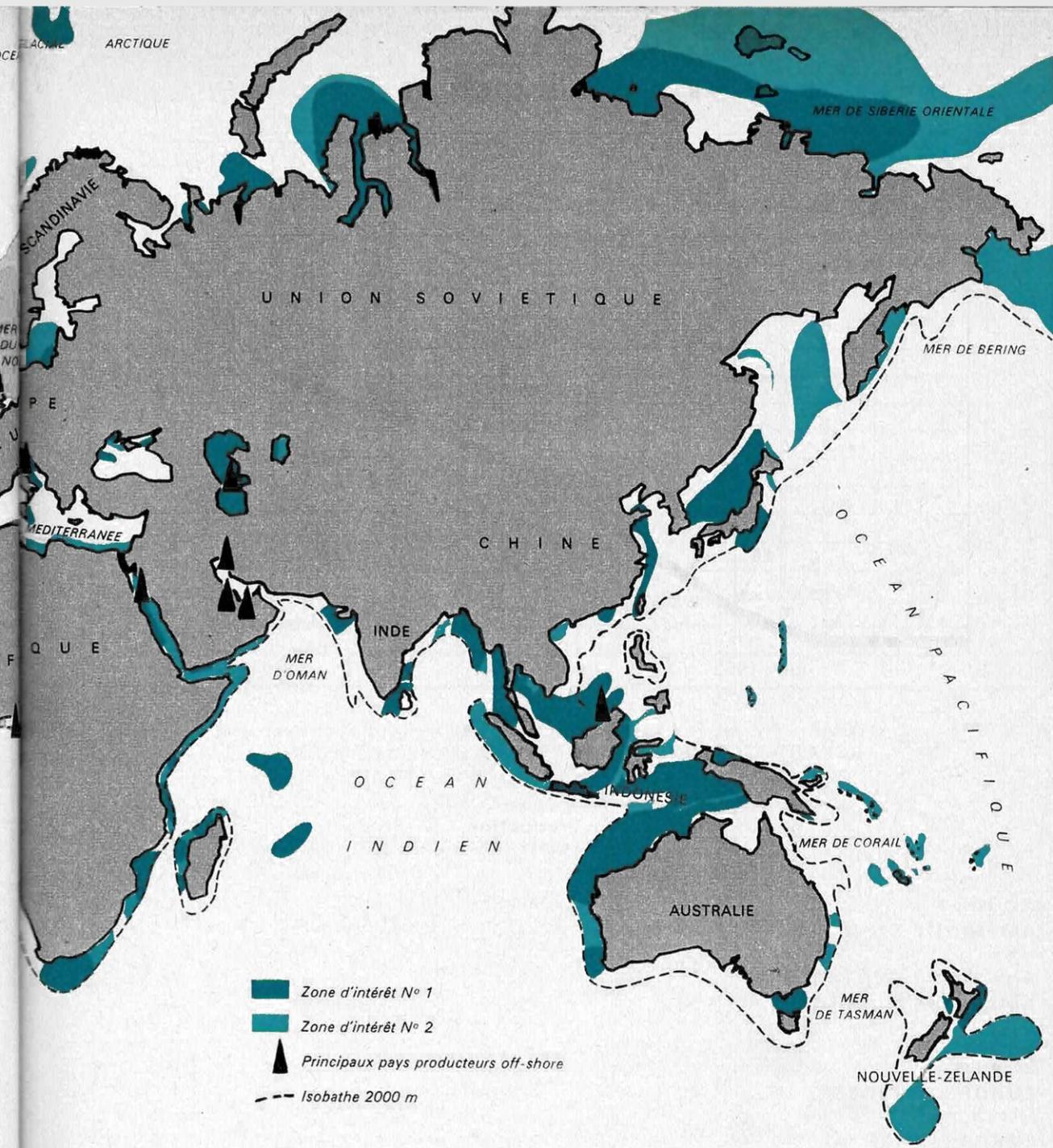
On constate des phénomènes analogues si l'on examine l'activité de forage proprement dite.

Les supports de forage fixes servent surtout à développer un champ en vue de sa production. Les efforts faits depuis 1954 ont porté principalement sur la mise au point d'engins mobiles plus adaptés à l'exploration. L'évolution de cette flotte donne une bonne représentation du développement de

l'activité de recherche et de production en mer (graphique page 54). Le chiffre de 200 engins mobiles de forage doit être actuellement atteint. Il est intéressant de signaler que les prix de tels engins s'échelonnent entre 25 et 50 millions de francs l'unité.

L'exploitation des gisements marins

La production mondiale s'est élevée à 1 738 millions de tonnes d'huile en 1967 : 234 millions de tonnes ont été extraits de la mer.



La répartition en millions de tonnes est résumée par le tableau page 54.

Ce tableau montre clairement que la production marine provient de trois zones : les Etats-Unis (30 %), le Vénézuéla (34 %) et le golfe Persique (26 %). Cette situation va se modifier d'ici 1971 : le rôle du golfe Persique va devenir prépondérant, avec 42 % de la production marine mondiale contre 17 % au Vénézuéla et 23 % aux Etats-Unis ; l'Afrique va jouer un rôle plus important avec 9 %.

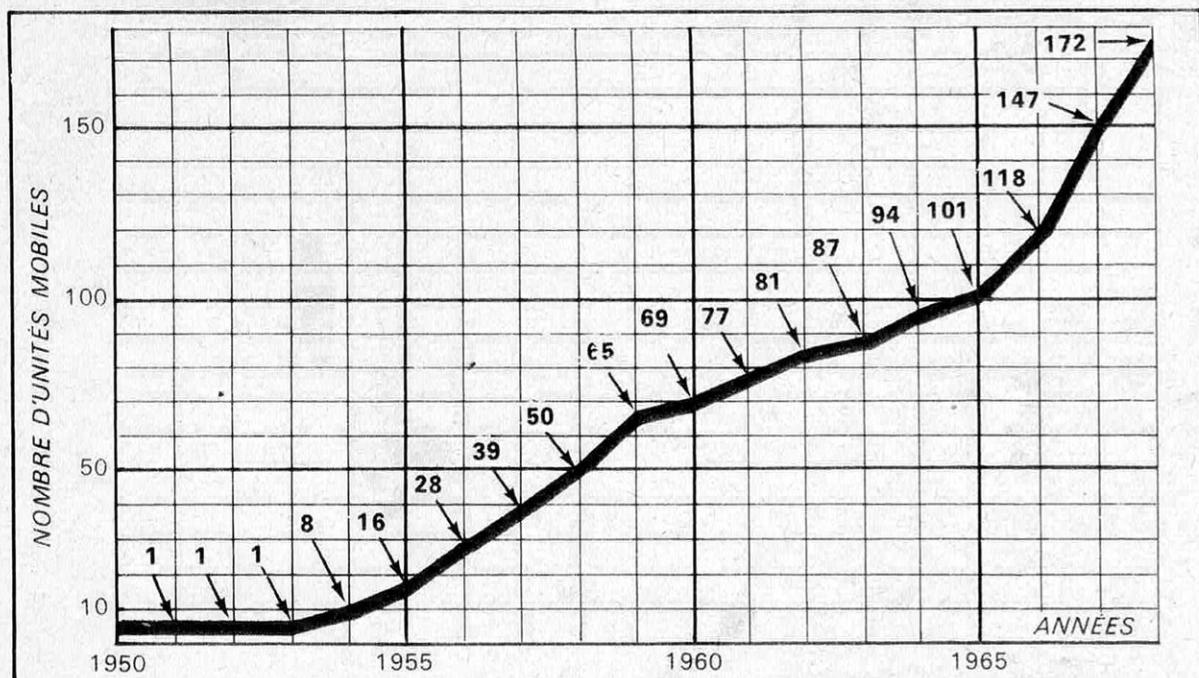
L'évolution de la production d'huile dans le monde non communiste montre nettement que l'accroissement actuel de la production

mondiale provient surtout du développement de la production terrestre. Mais cet état de fait va se modifier dans les dix prochaines années : en effet, le rapport en pourcentage production marine-production totale, qui était de 13,5 % en 1967, va atteindre 33 % en 1978.

Ces productions proviennent de réserves découvertes ou à découvrir ; le tableau page 56 résume l'état actuel de nos connaissances en ce domaine qui, il faut bien le dire, sont imprécises.

Le rôle prédominant du Moyen-Orient, avec 57 % des réserves mondiales, ressort nettement de ce tableau. L'Europe occidentale,

LA FLOTTE D'ENGINS MOBILES CONNAIT UN CONSTANT ACCROISSEMENT.



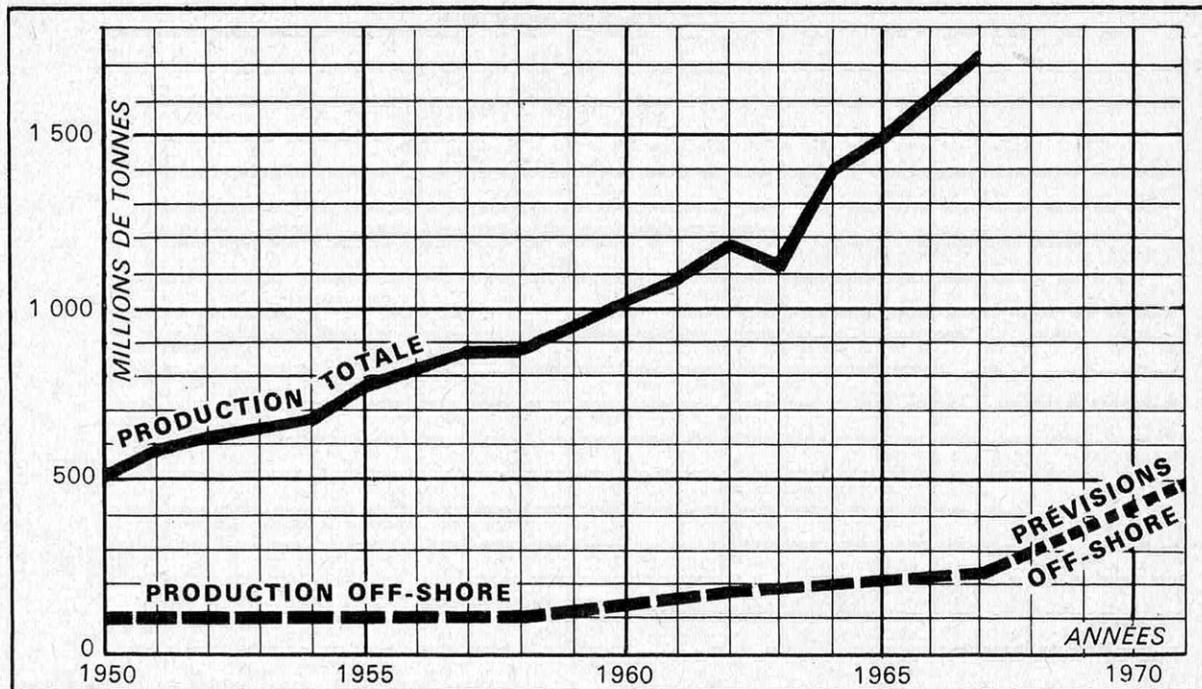
RÉPARTITION DES PRODUCTIONS DANS LE MONDE

En millions de tonnes d'huile

	Production totale 1967	Production marine 1967	Prévisions de production marine 1971
MONDE	1 738	234	464
AMÉRIQUE DU NORD	480	71	105
U.S.A.		71 (1)	105 (1)
AMÉRIQUE CENTRALE	18	—	—
AMÉRIQUE DU SUD	223	84	83
Brésil		0,5	1
Trinité		4	2
Vénézuéla		80	80
EUROPE OCCIDENTALE	16	—	15 (1)
Mer du Nord		—	15 (1)
EUROPE ORIENTALE	302	10	15
U.R.S.S.		10	15
AFRIQUE	154	7	45
Égypte		3	23
Gabon		0,5	2
Nigeria		3	13
Cabinda		—	7
MOYEN-ORIENT	494	60	193
Arabie Séoudite		27	76
Iran		6	48
Abu Dhabi		6	30
Zone neutre		15	23
Qatar		6	8
Dubai		—	5
Bahreïn		—	2
EXTRÊME-ORIENT	49	2	8
Brunei-Malaisie		2	2
Australie		2	2

(1) dont gaz: 1000 m³ de gaz = 1 tonne d'huile.

LA PRODUCTION OFF-SHORE VA SE DÉVELOPPER LARGEMENT.



qui ne comporte qu'une faible partie des réserves mondiales (4 %), possède 13 % des réserves situées en mer.

Quelques données économiques

Si la mer contient, à l'état potentiel, une grande variété de ressources énergétiques, de matières premières et de ressources alimentaires, on constate que seuls la pêche et le pétrole jouent à l'heure actuelle un rôle industriel sérieux. La pêche est une activité aussi ancienne que notre civilisation. Son chiffre d'affaires direct reste encore quatre fois supérieur à celui de la production pétrolière, mais le rythme d'accroissement de cette dernière étant nettement supérieur, il est probable qu'avant dix ans les chiffres d'affaires de ces deux industries seront équivalents.

Si l'on examine maintenant les investissements marins du monde non communiste, on remarque que le chiffre de 15 milliards de francs a été atteint en 1967, soit le tiers des sommes investies dans la recherche et l'exploitation des hydrocarbures dans le monde. Il faut noter que 80 % de ces investissements sont américains.

Citons quelques éléments significatifs des coûts des opérations :

La sismique marine est deux à cinq fois moins chère que la sismique terrestre, soit environ 2 000 francs au kilomètre ; ceci explique que des superficies considérables aient été rapidement couvertes par des titres

miniers, l'acquisition de connaissances étant peu coûteuse dans un premier stade.

En revanche, les engins mobiles de forage en mer sont très coûteux. Le prix de revient moyen d'un forage d'exploration est de 100 000 francs par jour, soit environ 10 millions de francs pour un puits moyen atteignant une profondeur de 3 500 mètres.

Le prix de revient moyen d'un forage de développement est de 60 000 francs par jour, soit 5 millions de francs pour un puits. Les coûts sont deux à trois fois plus élevés en mer qu'à terre. Les taux d'assurance des engins de forage, relevés jusqu'à 10 % à la suite des accidents de ces dernières années, sont un élément non négligeable de ces prix. A ces dépenses, il faut ajouter les investissements liés aux installations de production, les frais d'exploitation et de transport.

Si la géophysique est moins chère qu'à terre, le forage et l'exploitation sont donc nettement plus onéreux. Pour qu'un gisement marin soit rentable dans des conditions analogues à celles d'un champ terrestre, il faut que ces puits produisent beaucoup plus.

Dans ces conditions, pourquoi rechercher et extraire du pétrole en mer ?

Au rythme de la production actuelle, les réserves mondiales se montent à une trentaine d'années de consommation et ce rapport tend à diminuer. L'exploration doit donc se montrer assez active pour contrebalancer cette évolution. A terme, si les bassins terrestres peuvent encore fournir de nombreuses surprises, il n'en demeure pas moins qu'une part notable de l'accroissement des réserves

LES RÉSERVES MARINES COMPARÉES AUX RÉSERVES TOTALES

	Réserves totales au 1-1-68 En millions de tonnes d'huile	Réserves marines au 1-1-68 En millions de tonnes d'huile
MONDE	116 200	12 482
AMÉRIQUE DU NORD	28 077	1 300
U.S.A.		
AMÉRIQUE CENTRALE	1 145	1 627
AMÉRIQUE DU SUD	8 852	3
Brésil		24
Trinité		1 600
Vénézuéla		1 500
EUROPE OCCIDENTALE	5 322	1 500
Mer du Nord		1 500
EUROPE ORIENTALE	14 794	200
U.R.S.S.		200
AFRIQUE	9 358	421
Égypte		193
Gabon		8
Nigeria		150
Cabinda		70
MOYEN-ORIENT	49 959	7 074
Arabie Séoudite		2 561
Iran		1 425
Abu Dhabi		1 294
Zone neutre		1 405
Qatar		286
Dubai		101
EXTRÊME-ORIENT	1 702	360
Brunei		50
Australie		310

a pour origine le progrès technique qui permet une réévaluation des réserves des gisements connus. Les zones marines sont, quant à elles, des territoires vierges où de nombreux espoirs sont permis.

Perspectives

Les experts ont essayé d'évaluer le montant des réserves ultimes d'hydrocarbures qui existeraient sur notre planète. Les chiffres qui ont été avancés sont donnés par le tableau ci-contre, en haut. Pour ce qui concerne en particulier l'huile, qui est à l'heure actuelle la source d'énergie la plus recherchée, un calcul simple donne les chiffres en bas du tableau.

La surface marine concernée étant deux fois moins grande qu'à terre, la richesse estimée par km² est donc nettement plus importante. De plus, ce genre de calcul n'envisage que la marge continentale. L'amélioration des techniques d'exploitation conduira les pétroliers à s'intéresser aux bassins sédimentaires situés sur le talus continental et dans les fosses marines, ce qui augmentera de façon

ÉTAT DES RÉSERVES ESTIMÉES	Mer jusqu'à 300 m (milliards de m ³)	Terre (milliards de m ³)
Huile	100	215
Gaz	43	115
Récupération secondaire	43	140
Sables bitumineux	29	100
Schistes bitumineux	143	1 430
	358	2 000
 Réserves ultimes d'huile	100	215
Réserves déjà découvertes	12,4	85
 reste	87,6	130

sensible la surface offerte à la prospection. Le pétrole marin joue un grand rôle dans le domaine de la prospection, mais il ne participe que dans la proportion d'un sixième à la production. Il ne fait guère de doute que dans une dizaine d'années, le tiers de la production d'huile et la majorité des nouvelles réserves proviendront de la mer.

A. VARTANIAN
Comité d'Études Marines Pétrolières

L'HOMME ET LE MILIEU SOUS-MARIN

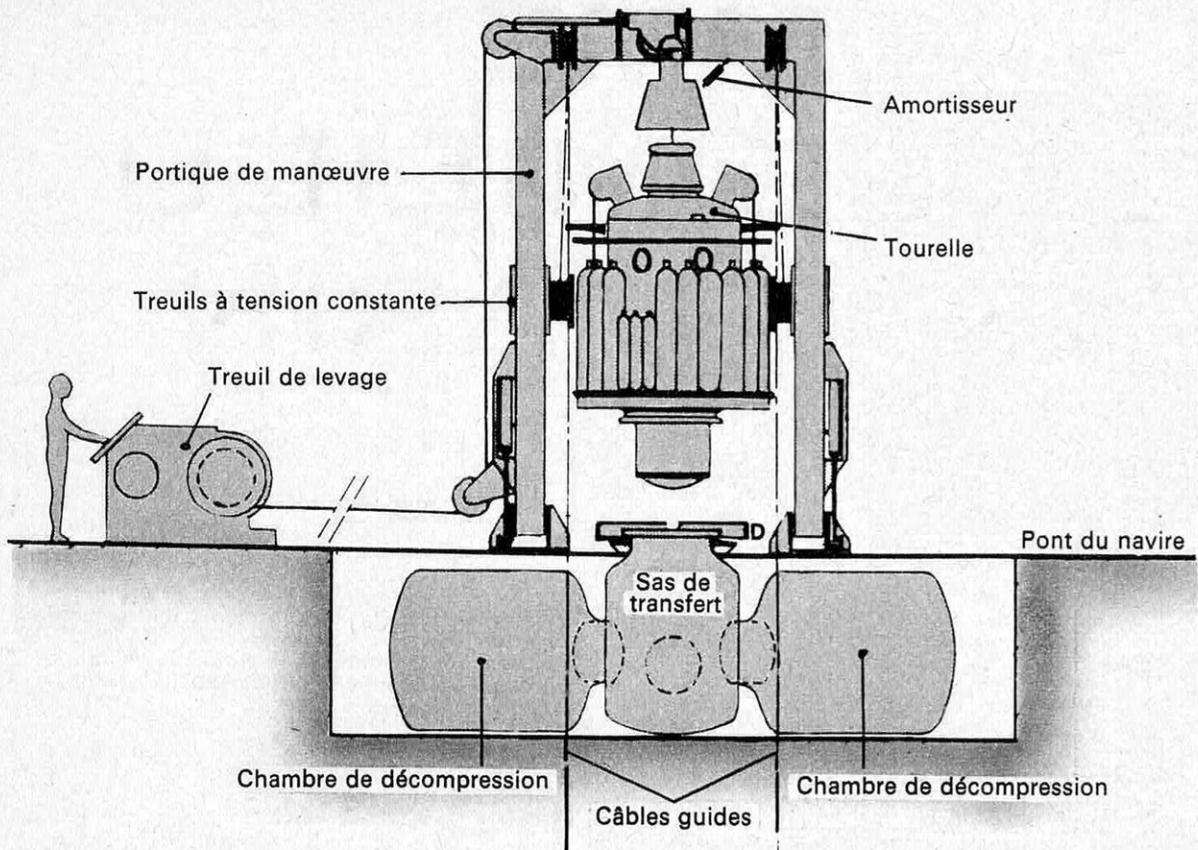
En octobre dernier, la tourelle de plongée de l'opération Hydra emportait trois hommes vers le fond. Par — 300 m, deux d'entre eux devaient expérimenter un nouveau mélange gazeux à l'hydrogène. Hydra fut toutefois interrompue vers — 250 m.

Le dernier coup, le plus audacieux, à demi réussi seulement, c'était Hydra, en octobre dernier, au large de Cassis. La Comex (une société de plongée marseillaise) visait les 310 mètres avec un mélange gazeux à l'hydrogène.

Ceux qui savait ce que cela veut dire en avaient un peu le souffle coupé. Jamais des plongeurs n'avaient atteint en mer une telle profondeur. La tentative pourtant ne semblait pas déraisonnable. En caisson hyperbare, c'est-à-dire en plongée simulée, la marine américaine avait atteint 315 mètres, le professeur Buhlman avait atteint 290 mètres à Zurich et la Comex elle-même avait envoyé des plongeurs à 335 mètres et 365 mètres. Toutefois, on pouvait, du point de vue physiologique, redouter des surprises du côté de l'hydrogène. Car toutes ces plongées avaient, bien entendu, été faites avec des mélanges oxygène-hélium (hélixo). La Comex, ici, allait tabler sur les résultats d'une série d'expériences encourageantes, menées par le professeur Ralph Brauer, aux Etats-Unis, avec des singes, et sur ceux de deux expériences humaines : en 1945, l'ingénieur suédois Arne Zetterstrom avait pu respirer sans inconvénients à 162 mètres un mélange oxygène-hydrogène (hydrox) et, tout récemment, au Texas, Peter Edel, directeur des recherches de la *J. and J. Marine Diving C°*, avait respiré un mélange semblable à 80 mètres en caisson, prenant un risque personnel énorme, le risque d'une explosion formidable. A cette profondeur, le pourcentage d'oxygène

PHOTO R. STENUIT





*Ainsi se présente l'ensemble tourelle de plongée-caisson de décompression installé à bord du navire Astragale.
Pour la mise à l'eau de la tourelle, le portique bascule vers l'avant, par-dessus bord (voir photo en page précédente).*

nécessaire à la respiration approchait dangereusement du rapport pour lequel oxygène et hydrogène forment un mélange détonant (vers 4 % d'oxygène).

Quant au matériel, l'ensemble cloche-caisson de plongée profonde Doris - Comex, sur le navire français « Astragale » (armé par Naval pour Elf), il avait été parfaitement rodé jusqu'à 150 mètres.

Le 28 octobre à 15 heures, la cloche traversait la surface. Une provision de réservoirs d'hydrogène y était frappée, puis elle commençait sa descente.

Le programme de plongée prévoyait :

- Pressurisation à bord jusqu'à 21 atmosphères, soit 200 mètres de profondeur, descente à 200 mètres et ouverture de l'écouille ;
- Sortie des plongeurs 1 et 2 (le plongeur 3 restant dans la cloche) qui prennent place dans une nacelle accrochée au flanc de la tourelle, la partie supérieure du corps engagée dans une caisse en plexiglas qu'ils remplissent d'hydrox ;
- La descente continue jusqu'à 310 mètres, tandis qu'un plongeur, puis l'autre, relève la

glace de son casque afin de respirer librement, dans l'aquarium renversé, le mélange hydrox qui s'y trouve. Ce plongeur est surveillé par l'autre qui continue à respirer dans son casque le mélange oxygène-hélium-azote envoyé depuis la cloche ; il se trouve sous la surveillance constante de l'équipe médicale qui, en surface, lit en permanence ses tracés d'électroencéphalogramme et d'électrocardiogramme.

Jusqu'à 214 mètres, tout devait se passer conformément aux prévisions. Mais, pour tous les observateurs de surface agglutinés devant les écrans de télévision, il apparut alors clairement que quelque chose n'allait pas. Un plongeur sortait puis rentrait, sortait à nouveau ; l'autre sortait puis rentrait ; les communications déformées par l'hélium n'étaient pas claires ; il y avait des conciliabules, des visages tendus, tandis que la cloche poursuivait sa descente jusqu'à 250 mètres.

Les plongeurs, c'était clair, ne suivaient pas le programme.

A 250 mètres, le plongeur numéro 3 fit signe à la caméra de télévision : remontez ! ... Un

peu plus tard, il faisait signe à nouveau : remontez, et vite !... On remonta donc les trois hommes. L'expérience avait avorté, mais la décompression au moins allait se faire sans aucun problème.

Qu'était-il arrivé ? Reconstituer exactement après coup ce qui se passe dans ces moments exceptionnels est toujours difficile.

La Comex a conclu que des problèmes de détendeurs avaient, dès le départ, rendu pénible la respiration d'un des plongeurs. Un robinet défectueux avait retardé ensuite le remplissage de la cabine vitrée en hydrox. Le froid extrême, malgré un vêtement à circulation d'eau gardée au bain-marie par une sous-combinaison chauffante électrique, contrastant avec la chaleur étouffante de la mise en pression (42°) avait aggravé l'inconfort et peut-être l'inquiétude d'un des plongeurs. Le retour des trois hommes dans la cloche n'était pas prévu et leurs respirations conjuguées, devenues haletantes, avaient rendu rapidement insuffisant le débit de l'appareil épurateur de gaz carbonique (une soufflante à chaux sodée) dont le débit n'était calculé à cette profondeur que pour le seul plongeur numéro 3.

L'opération Hydra n'en constitue pas moins un exploit car, avant les plongeurs de la Comex, en plongée réelle en mer, deux hommes seulement étaient arrivés plus bas. Hannes Keller et Peter Small avaient atteint 300 mètres en 1962 en Californie. Un seul, Keller, était remonté vivant et de justesse, mais même lui, vaincu par des défaillances mécaniques triviales, n'avait pu ni travailler ni même quitter la tourelle de plongée qui l'avait amené au fond.

En mer toujours, depuis lors, Comex elle-même avait fait travailler efficacement ses plongeurs à 150 mètres, la Royal Navy à 180 mètres, Ocean Systems à 200 mètres, mais les barrières formidables auxquelles tous les plongeurs se heurtaient, s'ils les repoussaient chaque fois un peu plus bas, étaient les mêmes qui avaient freiné depuis l'Antiquité tous les hommes qui plongeaient. De l'époque où Alexandre le Grand descendait sous la mer dans une cloche à plongeurs jusqu'à la Seconde guerre mondiale, l'art de la plongée avait fait peu de progrès, puisque les scaphandriers continuaient à porter la cloche sur leur tête. La cloche était plus petite, faite de cuivre, percée de trois hublots de verre et fixée à un vêtement étanche souple; pourtant ce n'était toujours qu'une cloche.

Pendant la Seconde guerre mondiale, le scaphandre autonome allait être parfaitement mis au point, en particulier grâce aux travaux du commandant Cousteau, mais le

plongeur soudain libéré de son cordon ombical était toujours aussi limité, dans son temps de travail au fond et dans la profondeur qu'il pouvait atteindre, par deux barrières physiologiques redoutables : les accidents de décompression et la narcose à l'azote.

Les accidents de décompression

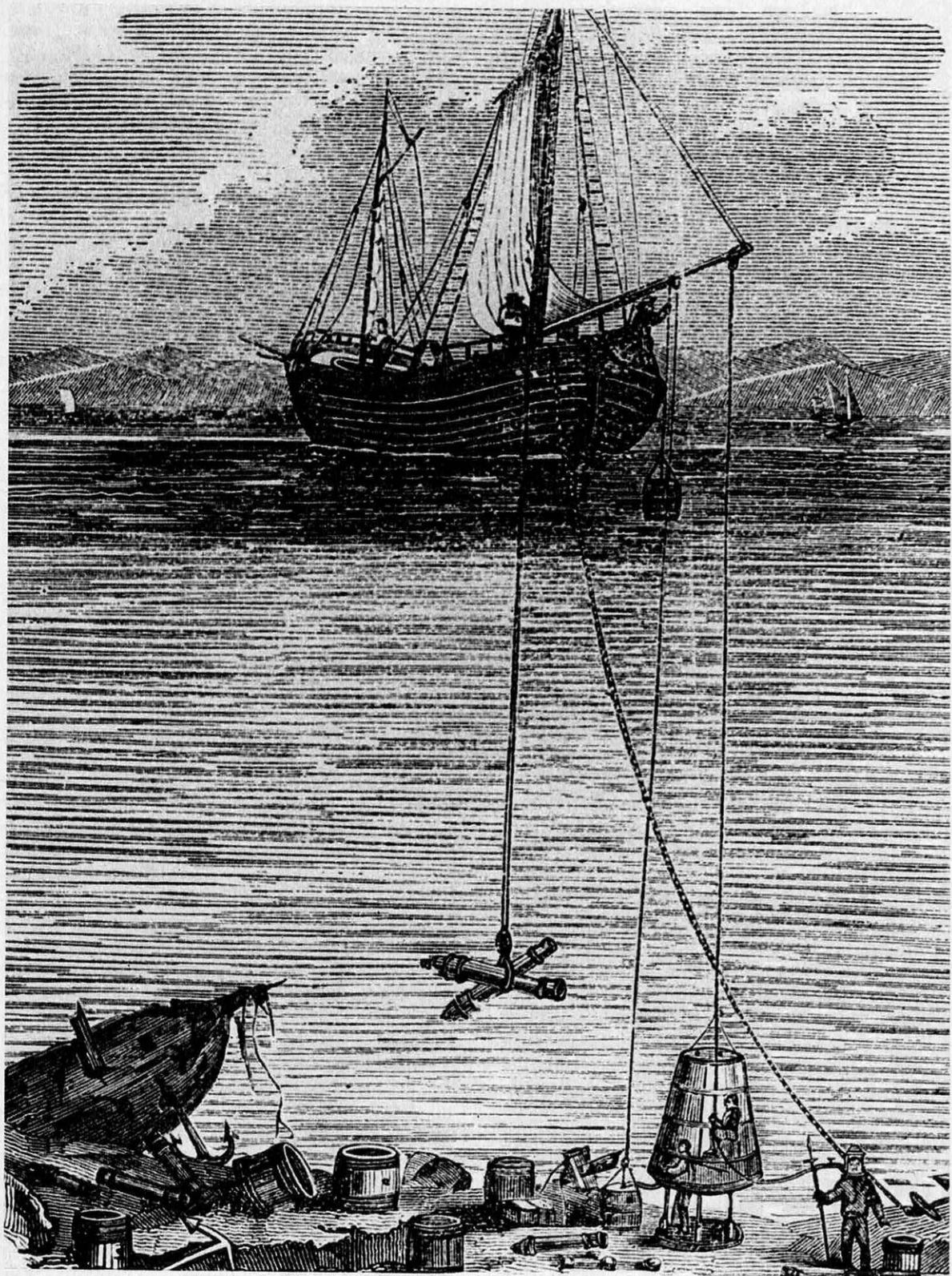
Les accidents de décompression, que les Anglo-Saxons appellent en bloc, à tort, les «bends» (courbatures), sont produits par l'effet mécanique des bulles de gaz inerte du mélange respiratoire (azote pour la plongée à l'air, hélium pour les mélanges classiques utilisés en plongée profonde), qui, dans certaines conditions, peuvent se former dans le sang ou les tissus du plongeur.

Lorsqu'un plongeur respire en profondeur, son sang se charge, à travers la paroi des alvéoles pulmonaires, d'azote ou d'hélium dissous dont la quantité augmente avec la pression à l'intérieur des poumons, égale à la pression hydrostatique ambiante. Par la circulation sanguine, ce gaz inerte est transporté et diffusé dans tous les tissus jusqu'à équilibre général des teneurs.

Si, après avoir séjourné en profondeur, le plongeur regagne trop rapidement la surface, son organisme va se trouver en état de sur-saturation. Les gaz dissous dans les tissus et dans le sang à la pression de la plus grande profondeur atteinte sont éliminés brutalement sous forme de bulles. Comme l'écrivait en 1860 déjà le professeur Leroy de Méricourt : « le plongeur est vraiment d'un point de vue physique semblable à une bouteille chargée de gaz carbonique ».

Les bulles accumulées peuvent obstruer un vaisseau, empêchant localement l'irrigation sanguine, ou ralentir la circulation générale, ou encore distendre et détruire certaines cellules. Les conséquences : malaises, douleurs cuisantes, lésions nerveuses temporaires ou permanentes avec insensibilité ou paralysie locale, ostéoarthrite tardive, etc. Dans les cas graves, heureusement rares, la mort est rapide. Le seul moyen d'échapper à ces accidents terribles est de se conformer strictement aux « tables de décompression » que tous les plongeurs possèdent.

Les tables indiquent les vitesses de remontée permises et la longueur des « paliers » qu'il convient de ménager à certaines profondeurs pour permettre une élimination normale des gaz dissous. Exemple : une heure de travail à 60 mètres (limite extrême à l'air) demande 3 heures et demie de décompression, réparties entre les paliers de 18, 15, 12, 9, 6 et 3 mètres, ce qui jusqu'à hier ren-



*On peut considérer la cloche de Halley,
modèle 1716, ci-dessus,
comme le premier engin de plongée
vraiment évolué.*

*L'air y était renouvelé
grâce à des tonneaux d'air envoyés de la surface.
La cloche de Halley fut utilisée
de façon courante pendant un siècle et demi.*

dait évidemment le travail sous-marin très peu rentable.

Cette barrière-là aussi, grâce à la plongée en saturation, nous sommes en train de la tourner. La rentabilité du travail du scaphandrier peut être multipliée aujourd'hui par 10, par 100 ou par 1000.

Comment ? A une profondeur donnée, les différents tissus du corps du plongeur ne peuvent absorber qu'un certain volume de gaz. Une fois la saturation atteinte, ce qui prend moins de 24 heures pour l'ensemble du corps, ce volume n'augmentera évidemment plus quelle que soit la durée du séjour. Donc, un plongeur vivant un mois sous pression dans une maison sous-marine et travaillant huit heures chaque jour sur le fond, ne devra pas subir une décompression plus longue qu'un plongeur qui n'y aurait vécu et travaillé qu'un jour ou deux. Donc, la relation temps utile de travail — temps perdu en décompression augmente immensément. Sans ce nouveau concept de vie et de travail en saturation, l'exploitation organisée et la colonisation à plein temps du plateau continental eussent été inconcevables.

La narcose à l'azote

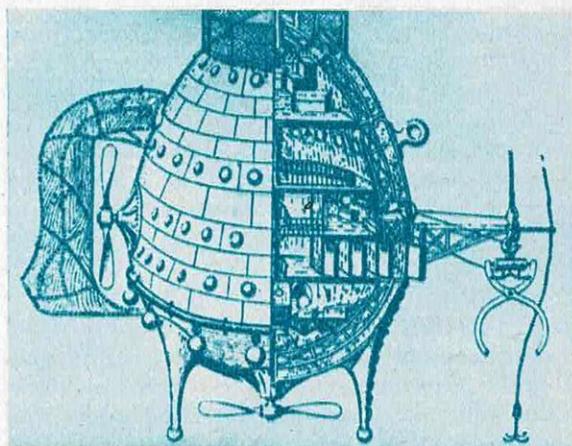
Sous ce terme quelque peu restrictif, on englobe une série de troubles nerveux et psychomoteurs liés à une haute pression partielle du gaz inerte dans le mélange respiratoire. Elle est le plus souvent observée à partir de 50 ou 60 mètres de profondeur dans la plongée à l'air. Il se produit une altération progressive des facultés mentales, avec parfois un sentiment d'euphorie, une hyperassurance qui risque d'entraîner le plongeur à commettre des fautes irréparables. La coordination motrice se trouve gravement affectée ; le plongeur, chargé d'exécuter une tâche précise, devient malhabile, inefficace. Dans les cas les plus graves, il peut y avoir perte de connaissance.

Les mécanismes de cette action « narcotique » n'ont jamais encore été clairement élucidés. On sait toutefois que les gaz inertes lourds, l'azote en particulier, sont les plus narcotiques. Le xénon, cinq fois plus lourd que l'azote, agit comme un anesthésique mélangé à 20 % d'oxygène, même respiré en surface, à la pression atmosphérique. On sait aussi que ces mêmes gaz lourds sont dotés des plus hauts coefficients de solubilité dans les graisses. On pourrait donc envisager une action propre des gaz lourds sur les graisses constitutives du tissu nerveux. L'hélium et l'hydrogène, beaucoup plus légers, ont un coefficient de solubilité dans les

graisses beaucoup plus faible. De fait, la barrière physiologique de la narcose est aujourd'hui reculée à environ 300 mètres avec des mélanges respiratoires à l'hélium, sept fois plus léger que l'azote et quatre fois moins soluble dans les graisses. Dès 1925, ces mélanges furent utilisés sans dommage à grande profondeur par des scaphandriers de l'*US Navy*. Les Marines d'autres états, puis les sociétés de plongée commerciale devaient ensuite confirmer ces résultats mais, à l'époque, pour de courtes plongées seulement.

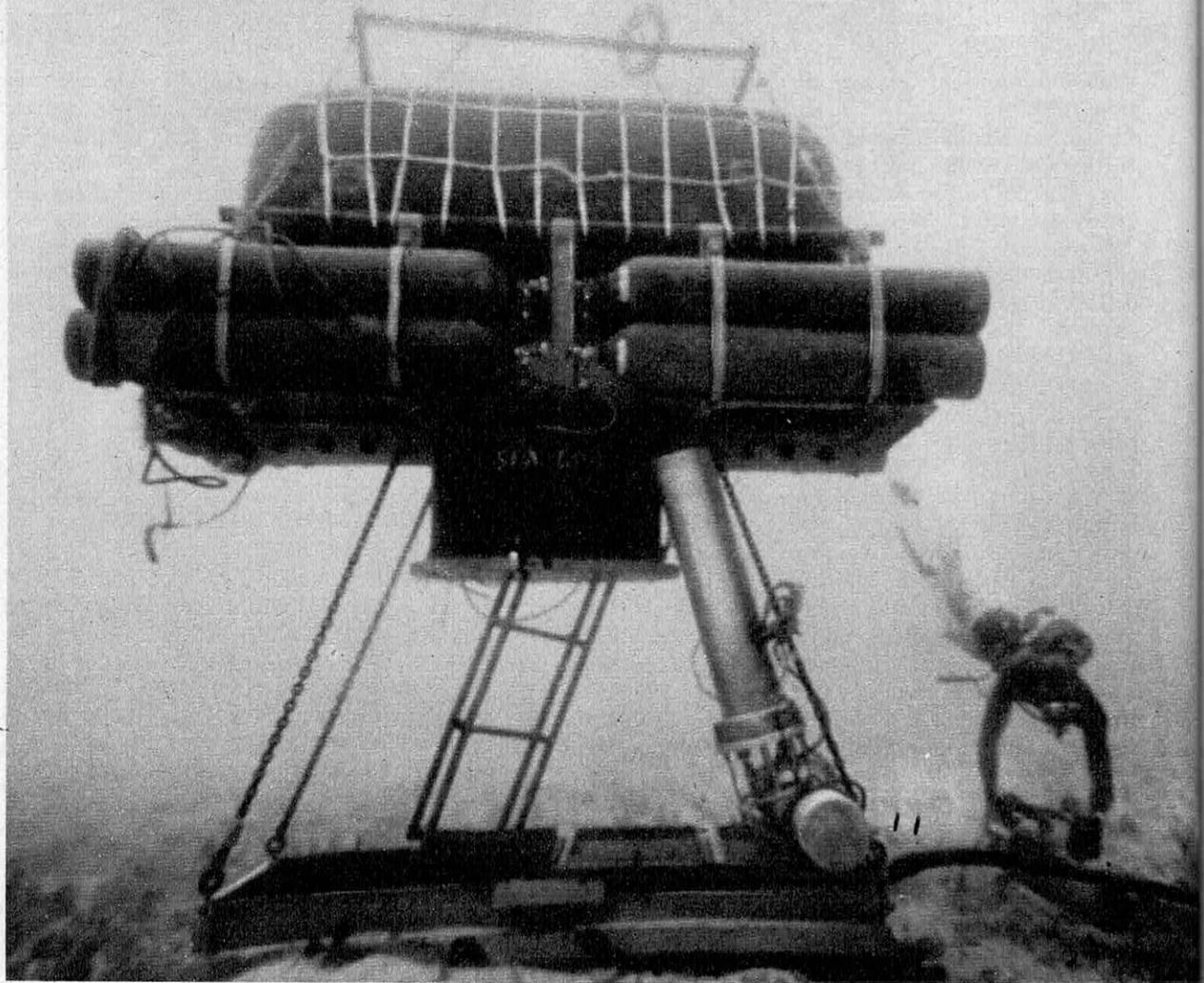
Le syndrome nerveux des hautes pressions

C'est la troisième barrière et elle vient d'être découverte. On n'aurait pu la découvrir plus tôt puisqu'on ne l'aperçoit qu'à partir de 300 mètres. Ce syndrome avait été suspecté par de nombreux chercheurs. Ces dernières années, le professeur Brauer l'a mis clairement en relief sur des singes : à 250 mètres, ses sujets respirant de l'héliox commencent à trembler ; à 350 mètres, leurs électro-encéphalogrammes montrent des troubles graves qui sont absents sur les tracés de sujets, singes ou hommes, en état de narcose à l'azote. À 550 mètres, on observe des convulsions parfois fatales. Or, en introduisant de l'azote dans le mélange, ou mieux encore de l'hydrogène (l'hydrogène est deux fois plus léger encore que l'hélium, mais il est trois fois plus soluble dans les graisses ; il devrait donc, du strict point de vue narcotique, se situer quelque part entre l'hélium



DOCUMENTS R. STÉNUTT

*La première maison sous la mer,
au sens des Précontinent,
Sealab, etc.,
fut probablement celle
proposée par Louis de Rigaud
en 1899.
Il s'agissait plus d'un immeuble
que d'une maisonnette.*



et l'azote), les symptômes et les convulsions sont reportés beaucoup plus bas, à 1 300 mètres, par exemple, pour des souris.

L'équipe médicale de la Comex (les docteurs Xavier et Pierre Fructus, avec la collaboration du docteur Naquet pour les électroencéphalogrammes) a décrit ce syndrome chez l'homme respirant de l'héliox à grande profondeur. Les observations ont été réalisées au printemps de l'année dernière, lors de la célèbre opération « Physalie » de plongée en caisson qui allait battre un record du monde de profondeur. Jusqu'à 300 m, les troubles sont à peine sensibles. À 320 m, l'excitation nerveuse est nette. De 330 à 365 mètres, le tracé électroencéphalographique montre un ralentissement général des ondes, apparition d'ondes dites « thêta », et autres modifications annonçant, selon le docteur Naquet, des convulsions ou un coma. Or, sur les singes, ces manifestations s'étaient produites vers 400 m, les convulsions apparaissant à 500 m. Les médecins jugèrent prudent d'arrêter l'expérience.

On pouvait en conclure que, pour plonger en sécurité au-delà de 300 m, le mélange oxygène-hélium ne suffisait plus et qu'il faudrait

recourir à l'hydrogène. En caisson, toutefois, les risques d'explosion semblaient trop grands et l'expérience en mer s'imposait. Ce fut l'opération Hydra.

Maisons sous la mer et sous-marins « crache-plongeurs »

Pour coloniser le plateau continental, l'homme devra y vivre et pouvoir ensuite en revenir impunément. C'est ce que visent les recherches actuelles de nouveaux mélanges respiratoires. Cela suppose aussi qu'il puisse travailler efficacement, rentablement, et que la durée de la décompression lors du retour du plongeur à la surface ne soit pas prohibitive par rapport au temps passé au fond. C'est pourquoi il est souhaitable de mettre à la disposition du plongeur une «maison sous la mer», à la pression du milieu ambiant, qui lui offrira, au sec, confort, possibilité de se reposer et de s'alimenter, de telle sorte qu'il puisse travailler au fond plusieurs heures ou plusieurs jours. Le plongeur n'aura à subir qu'une seule décom-

pression, à la fin de son programme, pour regagner la surface.

C'est là un problème de matériel, car la technique est toujours en retard sur les rêves de conquêtes. Ces rêves, d'ailleurs, sont fort anciens et les premières « maisons sous la mer » réalisées depuis quelques années à titre d'expérience sont les héritières des innombrables « cloches à plongeurs », imaginées, et parfois réalisées, au cours des siècles passés.

La première habitation sous-marine réellement « moderne » fut celle de Sir Edmund Halley, construite d'abord en 1690, perfectionnée et expérimentée en 1716 par 18 mètres de fond sous les eaux de la Tamise. « La cloche que je construisis, écrit-il, était faite de bois... doublée de plomb... et j'y distribuai le poids de telle façon tout autour du bord qu'elle descendit dans une situation perpendiculaire et aucune autre. Au sommet, j'usai d'une forte glace en guise de hublot pour laisser pénétrer la lumière d'en haut et, de même, je disposai une vanne propre à évacuer l'air chaud qui avait été respiré... » C'était là la première « maison sous la mer » moderne. En effet :

- l'air pollué pouvait être renouvelé au moyen de tonneaux remplis d'air, lestés et envoyés au fond ;
- les plongeurs pouvaient quitter la cloche, un casque de bois sur la tête, en marchant sur le fond et travailler aux alentours aussi

loin que leur tuyau de cuir le permettait;

• ils pouvaient regagner rapidement leur abri en cas d'incident ou rentrer de temps à autre pour se réchauffer, manger un morceau et se reposer sur un banc.

Il existe en fait aujourd'hui deux approches originales au problème du travail prolongé sous l'eau. Ce sont :

— la maison mobile, le sous-marin « crache-plongeurs », un submersible autonome duquel des plongeurs peuvent émerger par un sas pour aller travailler sur le fond ;

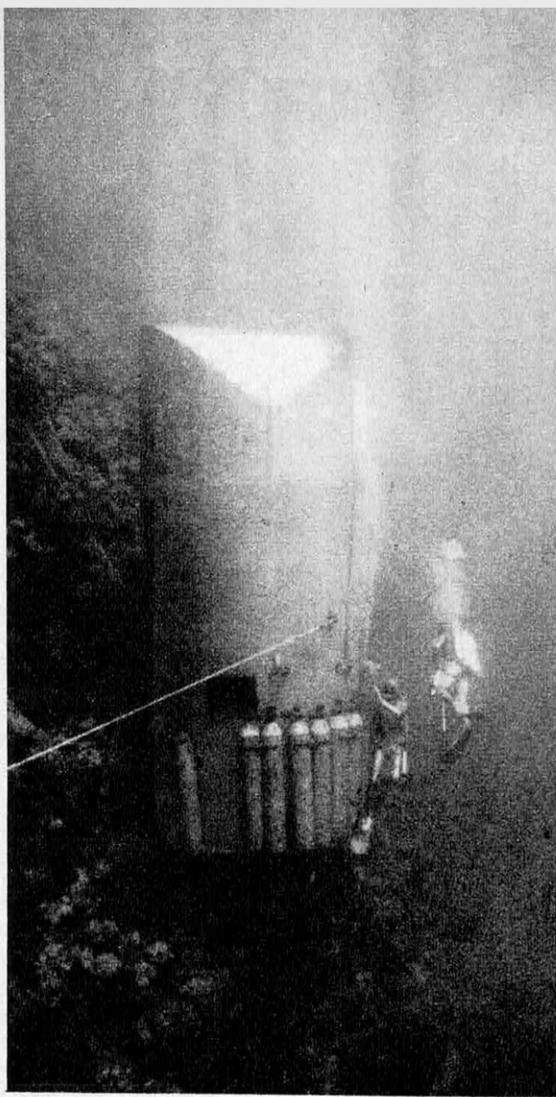
— la véritable « maison sous la mer » fixe, en équipression, avec porte ouverte au fond. Plusieurs siècles avant Jules Verne, l'évêque anglais Wilkins imaginait le sous-marin crache-plongeurs. Dans son « Mathematical Magic » de 1648, il décrivait un tel vaisseau dans lequel « toute chose ou personne peut être envoyée à l'extérieur... ou prise à l'intérieur... grâce à un système de sas fait de sacs de cuir ». Ce visionnaire de génie écrivait que « plusieurs colonies pourraient donc habiter sous la mer où elles mettraient au monde et élèveraient leurs enfants sans qu'ils aient jamais la connaissance du monde terrestre... »

A la fin du 19^e siècle, l'ingénieur Simon Lake construisit et essaya plusieurs sous-marins de ce type. Son « Argonaut Junior », lancé en 1894, était construit en bois et roula sur le fond sablonneux de la mer sur des roues en bois. Il était muni à la partie in-

*En 1964,
« Man in Sea »
faisait vivre
deux hommes en équipression
par 130 m de fond,
dans une « maison » gonflable en caoutchouc
monté sur armature d'acier.
La photo en page de gauche
montre l'habitation
telle qu'elle fut mise en place
sur le fond,
fortement lestée à la base
et entourée de ses réserves
de gaz respiratoires.
L'accès se faisait par l'écouille
à la partie inférieure.
Ci-contre, à droite,
essais de gonflement
de l'habitation en surface,
depuis le navire Sea Diver
qui assurait
le soutien de l'opération.*



DOCUMENTS R. STENUIT



**Fixée par 25 m de fond sous la mer Rouge,
la station profonde de l'opération
Précontinent II, ci-dessus,
abrita deux hommes
pendant sept jours.
La maison principale,
beaucoup plus vaste
(voir page 68),
était installée à 11 m.
Cinq hommes y vécurent
pendant un mois.**

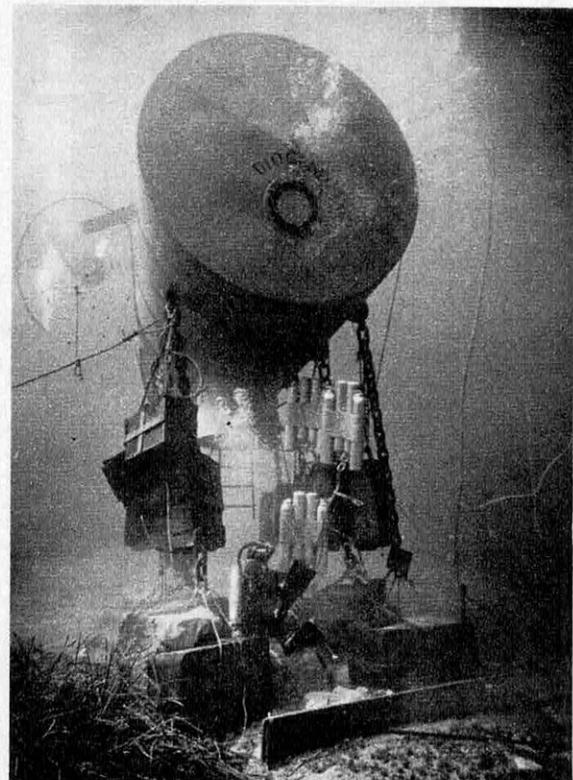
**En septembre 62,
moins d'un an
avant Précontinent II,
Précontinent I ne comportait
qu'une seule habitation,
une structure métallique
(ci-contre).
où deux aquanauts
vécurent une semaine,
travaillant à l'extérieur
plusieurs heures par jour.**

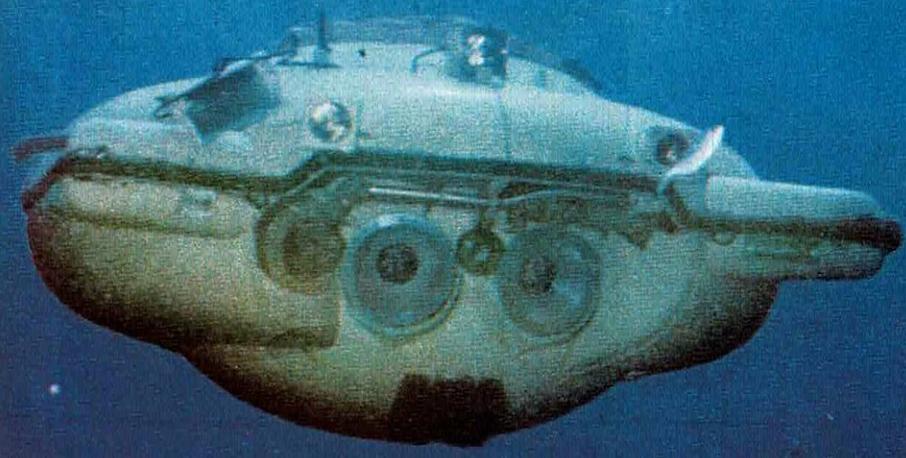
férieure d'une écoutille rabattable au moyen de laquelle Lake et ses plongeurs pouvaient quitter le sous-marin, en eau peu profonde, après en avoir pressurisé l'intérieur, pour pêcher des huîtres, travailler au dehors, saboter des navires ou relever le plan d'un champ de mines. Plus tard, il envisagea même de construire sur le fond de la mer des stations d'approvisionnement secrètes pour ses submersibles. Méconnu aux Etats-Unis, Lake vendit son invention à la Marine Impériale russe. Avec trois quarts de siècle de retard, la marine américaine met aujourd'hui ses idées à exécution.

Le concept de la véritable « maison sous la mer », abri sûr où le travailleur sous-marin trouverait aux heures des repas et le soir venu tous les comforts de la surface, fut breveté en premier lieu par le Français Louis de Rigaud. En 1899, il présentait le plan d'une énorme structure métallique en forme d'œuf, véritable hôtel particulier sous-marin. Il semble que ses plans prévoient quatre sas à air comprimé par lesquels des plongeurs pouvaient sortir et rentrer.

Dix années de recherches intensives

Ces dernières années, quatre groupes de pionniers se sont attachés à démontrer qu'il est possible de vivre et de travailler sur le





LES REQUINS ASSOCIÉS.

Opérationnelle depuis 1959, la « soucoupe plongeante » S.P. 350 (pour 350 mètres) du commandant Cousteau est un des tout premiers engins autonomes de plongée. Elle a effectué, à ce jour, des centaines de plongées un peu partout dans le monde. Dotée d'une autonomie en mélanges gazeux respiratoires de 24 heures avec deux hommes à bord, elle est à l'origine de la série des « Deepstar » américains et, en France, des soucoupes S.P. 500 et S.P. 3 000 en cours de développement ou de mise au point.

S.P. 350 a participé à l'opération Précontinent II, en 1963, en mer Rouge, au cours de laquelle cinq hommes vécurent un mois par 11 mètres de fond. La photographie ci-contre montre l'engin rentrant dans son « garage » érigé à proximité de l'habitation principale.

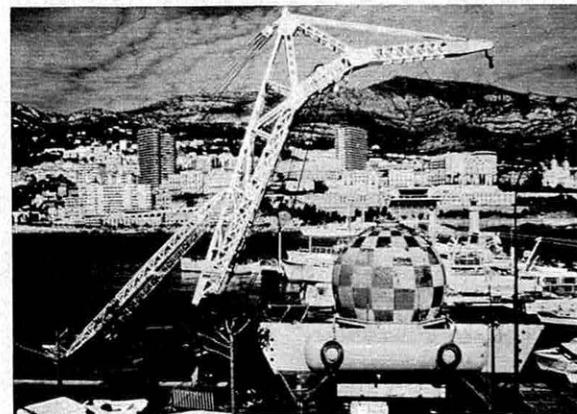


plateau continental ou au moins sous la pression régnant au niveau du chantier sous-marin. Il s'agit :

- du projet « Man in Sea » (l'Homme dans la Mer), lancé en 1956 par Edwin A. Link, le célèbre industriel et océanologue américain, et qui fut le premier à démarquer. Avec la collaboration de l'auteur, il a débouché depuis, sous la bannière de la société *Ocean Systems*, sur de profitables opérations industrielles ;
- de l'opération « Sealab », lancée en 1957 par le Dr George F. Bond (capitaine dans le corps médical de la marine américaine). C'est un projet remarquablement bien planifié reposant sur une méthode scientifique stricte et sur un contrôle médical attentif. Pionnier incompris pendant sept ans, le docteur Bond a reçu depuis le soutien illimité de la toute puissante *US Navy*. L'opération « Sealab III », la plus ambitieuse de la série, connaît toutefois quelques incidents.
- du commandant Jacques-Yves Cousteau et de l'OFRS (Office Français de Recherches Sous-marines), qui ont attaqué leur spectaculaire programme « Précontinent » en 1962. Ils ont obtenu de beaux succès, d'abord en eaux peu profondes, puis par 96 mètres de fond ;
- d'Henri Delauze et de sa société marseillaise Comex, qui sont les derniers venus dans la course aux grands fonds ; ils y font des pas de géant grâce à leur dynamisme. Les docteurs Xavier et Pierre Fructus, assurent la direction scientifique des programmes.

Qu'ont réalisé, à ce jour, ces quatre groupes de chercheurs ?

Après une première historique, la saturation de l'organisme humain sous sept atmosphères (60 m, Villefranche, 1962, Stenuit), « Man in Sea » a placé à grande profondeur une petite équipe de travailleurs, basée dans une habitation flexible en caoutchouc gonflée à l'hélium. L'auteur et John Lindbergh ont vécu ainsi deux jours et deux nuits par 130 m de fond au large des Bahamas en 1964. Ils ont démontré l'immunité physiologique de l'homme à la saturation à cette profondeur et la rentabilité économique du travail réalisé à frais modérés à partir d'un navire indépendant léger. Depuis cette date, le groupe de recherches de *Ocean Systems* a mené à bien une longue série d'expériences : calculs de tables de décompression par ordinateur et vérification humaine en caisson. Dernier record du groupe : une plongée de travail réel pour une grosse société pétrolière par 200 m de fond, avec 6 heures de travail effectif sur une tête de puits pour une

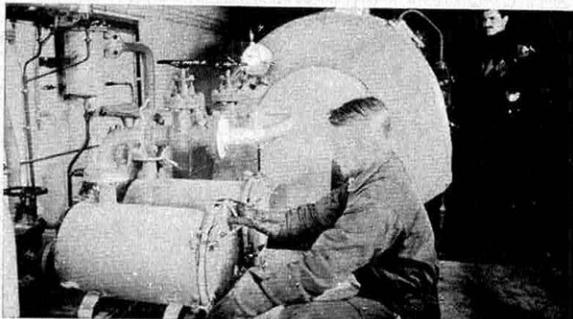


PHOTOS LES REQUINS ASSOCIES

période de saturation de 2 jours à 21 atmosphères ; c'est un record d'efficacité. Le docteur Bond a commencé par de longues séries d'expériences en caissons sur des animaux, puis sur des hommes : le projet « Genesis » de 1957 à 1964. « Sealab I » (4 hommes à 56 m pour 11 jours aux Bermudes dans une maison cylindrique de 11 m sur 3,50 m) et surtout « Sealab II » (plusieurs équipes commandées par Scott Carpenter, par périodes de 15 jours, dans un énorme cylindre d'acier à 61 m en Californie) ont montré l'efficacité d'une organisation puissante qui concentre sur un projet tous ses efforts et de gros moyens techniques et financiers. Pendant « Sealab III » enfin, qu'un accident a obligé à interrompre, 40 aquanautes devaient deux mois durant séjourner par 180 m de fond par équipes successives pour des périodes de 12 jours. Pour comprendre la portée de cette expérience, il faut se rappeler que 180 m est la profondeur moyenne de tout le plateau continental et qu'il s'agit déjà là d'une véritable colonisation.

Les expériences du commandant Cousteau sont connues de tous grâce à la grande presse et à un film admirable, « Le monde sans soleil ». Durant « Précontinent I » (2 hommes, 1 semaine à 11 m près de Marseille) et « Précontinent II » (un vrai « village sous la mer », confortable et même luxueux, en mer Rouge, à 11 m et 25 m), ce sont les perturbations psychologiques résultant de la vie sous la mer qui devaient occuper le premier plan. « Précontinent III » (6 hommes, 3 semaines, 96 m, dans une maison sphérique en baie de Villefranche) s'attaquait avec succès aux grands problèmes physiologiques et à l'amélioration des techniques de vie en profondeur. Depuis lors, le professeur Chouteau a poursuivi sur des boucs des expériences de vie à très grande profondeur. Tout récemment il les envoyait à 1 000 m de fond en caisson.

*Depuis l'opération
Précontinent III en 1965
(en page de gauche,
la maison, hissée sur le quai
du port de Monaco
au terme de l'expérience)
qui abordait
les problèmes physiologiques
de la vie en équipression
à grande profondeur,
l'équipe du commandant Cousteau
a multiplié
les expériences
de plongée profonde
en caisson sur des animaux,
moutons et chèvres.*



La Comex, dans ses caissons de plongée simulée qui sont les plus « profonds » du continent, a mené à bien ces toutes dernières années un remarquable programme de recherches hyperbariques. Ce programme culminait en 1968 par des plongées simulées de saturation avec travail à 150 m et vie à un niveau moyen de 90 m (Ludion 3) et d'autre part des plongées simulées brèves d'intervention jusqu'à 335 et 365 m de fond (seuls des animaux ont été plus bas). Un contrôle médical et scientifique très strict fait la grande valeur de ces travaux qui ont débouché sur les expériences en mer en plongées réelles :

— expérience « Janus », depuis le navire « Astragale » : une équipe de deux plongeurs vivant en saturation à 90 m, en caisson de pont, a travaillé efficacement 1 heure $\frac{1}{2}$ par jour à 150 m, sur un prototype de tête de puits mouillé spécialement sur le fond ;
— expérience Hydra, dont nous avons parlé.

Le plateau continental s'ouvre à la colonisation

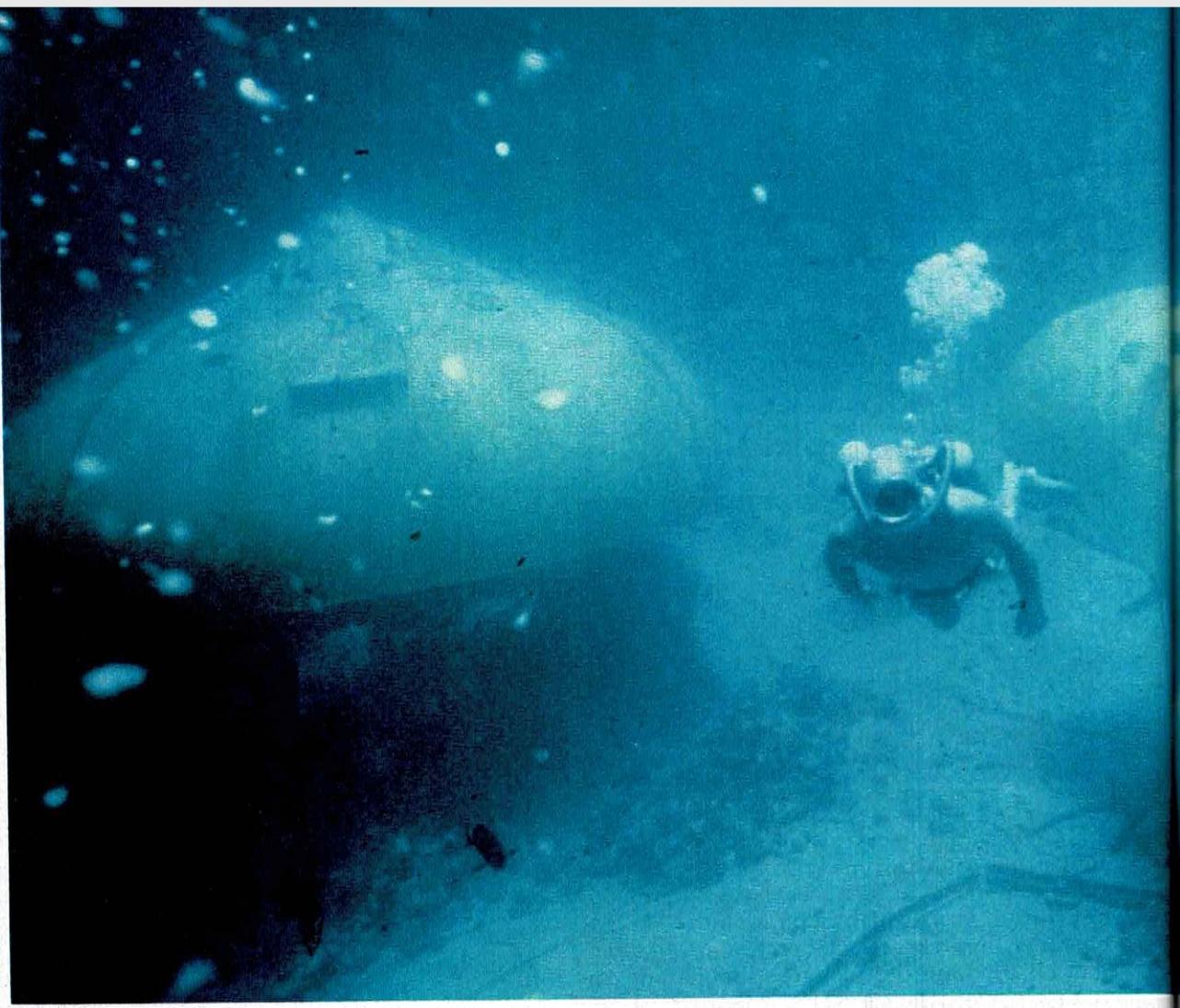
Pour travailler à grande profondeur, il existe aujourd'hui quatre méthodes dérivées directement des programmes de recherches dont nous venons de parler.

Pour des interventions brèves (quelques minutes à quelques heures selon la profon-



deur), on utilisera une ensemble cloche-caisson de décompression de surface. La cloche emmènera les plongeurs au fond, comme un ascenseur, leur servira de base d'opération sûre à proximité, et les reprendra ensuite à bord pour qu'ils soient décompri-més sur le pont dans une chambre de décompression confortable multiplace. Un compartiment séparé, dans certaines nouvelles cloches, qui reste à la pression atmosphérique et est percé de hublots, permet parfois aux non-plongeurs, par exemple à des scientifiques ou des ingénieurs pétroliers, de descendre observer le travail des plongeurs ou de les diriger. De tels ensembles sont employés quotidiennement sur la plupart des plates-formes « off-shore » jusqu'à 120 ou 150 m. Pour des travaux de plusieurs jours, de plusieurs semaines ou de plusieurs mois (grands travaux, ouvrages d'art, observations scientifiques, etc.) une ou plusieurs habitations autonomes complètement équipées et éventuellement spécialisées peuvent être installées sur le fond à côté d'ateliers et de garages, permettant donc une présence ininterrompue sur le fond. Les maisons sous la mer n'ont toutefois pas connu encore d'applications commerciales.

Pour des interventions brèves mais répétées, à grande profondeur et en divers endroits, (observations scientifiques, entretien d'un champ pétrolier « off-shore », assemblage d'un pipe-line, etc.), les plongeurs sont emmenés vers le fond et remontés ensuite dans une tourelle ; ils passent la nuit et leurs heures de repos dans un caisson de pont communiquant mais toujours sous pression. Ils vivent donc en saturation, en surface comme au fond pendant autant de jours ou de semaines qu'il est nécessaire. Cette technique est aujourd'hui d'emploi routinier (travaux sur barrages, récupération, construction ou réparation de structures pétrolières profondes, etc.). Une solution hybride expérimentée en mer par la Comex fait vivre les plongeurs



en surface à une « profondeur » inférieure à celle du chantier sous-marin. Cette solution, expérimentée lors de l'expérience « Janus », maintient le caisson à la pression 90 m pour un travail à 150 m.

Pour libérer les plongeurs de l'inconvénient grave d'être liés à la surface et à son mauvais temps, avec les difficultés de mouillage et les manœuvres dangereuses de récupération des cloches, *Ocean Systems* a construit un « sous-marin crache-plongeurs », submersible d'où les scaphandriers peuvent sortir pour travailler et où ils reviennent pour y être décomprimés dans un caisson interne. Le reste du sous-marin est maintenu à la pression atmosphérique normale. En plus des avantages d'un tel engin pour l'industrie pétrolière « off-shore », la discréption des opérations lui donne une valeur militaire évidente. La Marine américaine vient d'ailleurs d'affréter « Deep Diver ».

En France, enfin, l'OFRS, en association avec l'Institut Français du Pétrole, a mis en chantier l'« Argyronète » qui est un engin du même type où les plongeurs pourront vivre dans un plus grand confort en caissons multiplaces.



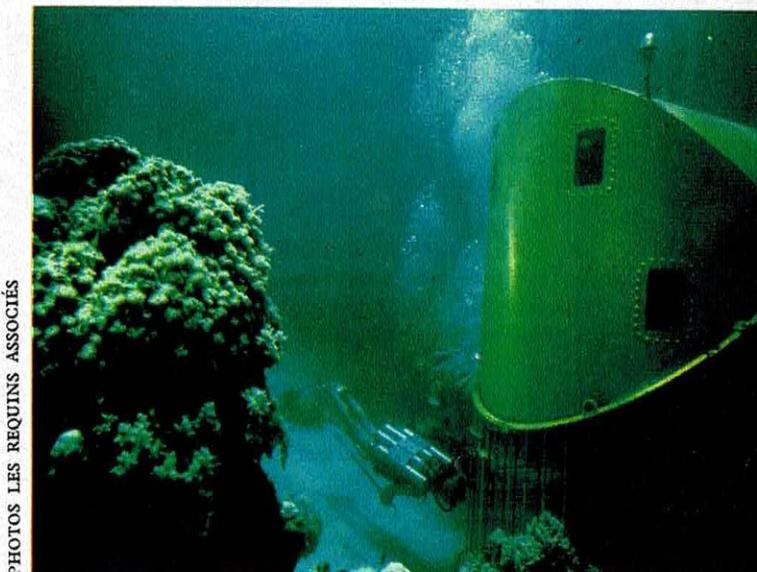
*Avec le « Deep Diver »
du groupe américain *Ocean Systems*
(ci-dessus,
lors de la mise à l'eau;
ci-contre, reposant sur le fond),
nous abordons une catégorie d'engins hybrides.
Ces submersibles
« à chambre humide »,
véritables maisons sous la mer,
mobiles, sont capables de lâcher des plongeurs
à la pression du milieu ambiant
et de les récupérer, leur mission accomplie.
Sur le même principe
a été construit le « Deep Quest » américain
et est étudié en France
l'« Argyronète ».*

MAISONS ET TAXIS SOUS-MARINS

Une partie seulement de l'habitation principale de Précontinent II est visible sur la photo à gauche, où l'on distingue le « garage » de la soucoupe SP 350.

Précontinent II comportait d'ailleurs une station « profonde » (30 mètres environ) qui servit de base durant 7 jours à deux plongeurs.

Précontinent I, conduite l'année précédente (1962) près de Marseille ne comportait qu'une seule « maison » (photo ci-dessous).



PHOTOS LES REQUINS ASSOCIÉS



AGENCE TASS

« Tchernomor », le maître des abysses des contes de Pouchkine, désigne aujourd'hui un laboratoire sous-marin construit en U.R.S.S. et expérimenté à partir de l'été dernier. Il s'agit d'un cylindre d'acier de 8 m sur 3 m de diamètre, au déplacement de 62 tonnes, capable, dit-on, d'évolutions verticales et horizontales et pouvant abriter quatre chercheurs ou techniciens.



Les incidents de l'opération Hydra ont souligné une fois de plus les besoins les plus urgents de l'aquanautique : recherche physiologique de base d'une part, développement accéléré de la technologie d'autre part. L'excès de gaz carbonique, dû notamment à une purification insuffisante, a sans doute aggravé l'inconfort des plongeurs. On sait qu'une augmentation de tension du gaz carbonique dissous dans le sang aggrave toujours la narcose et accélère l'apparition des accidents hyperoxiques. Elle favorise aussi la formation des bulles lors de la décompression. Mieux comprendre le mécanisme de cet effet synergique permettrait de mieux y remédier.

Ce n'est qu'un exemple parmi beaucoup d'autres des recherches qui restent à faire.

Les recherches de demain

Pourtant, dans le monde, des expériences très nombreuses sont réalisées tous les jours. Des programmes de recherches naissent et s'éparpillent dans toutes les directions. Les centres de plongées expérimentales se comptent aujourd'hui aux Etats-Unis par dizaines. Ce qui manque d'une façon générale à toutes ces recherches, c'est une codification et une systématisation.

Le groupe de recherches d'*Ocean Systems* que dirige le docteur Schreiner a suggéré, par exemple, que l'étude de la narcose des gaz dits inertes et de ses effets visibles soit codifiée. On pourrait envisager une mesure objective des degrés de narcose, soit sur électroencéphalogrammes, soit d'après la détérioration des réponses à une série de tests standards.

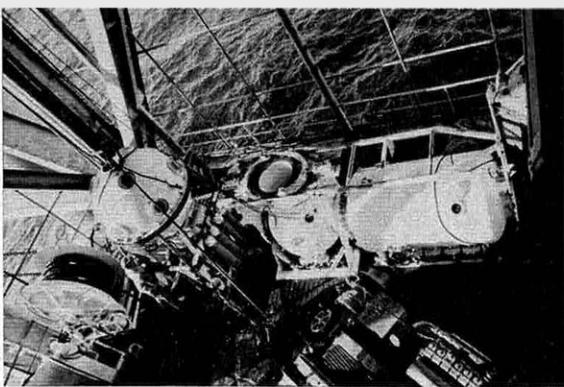
Les troubles de coordination, la somnolence, etc. qui déterminent les limites tolérables des gaz inertes pourraient alors être comparés scientifiquement par tranche de profondeur chez des sujets, intellectuels ou manuels, respirant de l'hélium, du néon, de l'hydrogène ou de l'azote. On pourrait en même temps mesurer l'effet de telle substance chimique susceptible d'inhiber la narcose, sous telles tensions d'oxygène et de gaz carbonique. Peut-être parviendrait-on ainsi à une vision plus claire des problèmes médicaux de la plongée.

La toxicité de l'oxygène sous une pression partielle élevée mérite aussi une étude attentive. Comme la quantité de gaz inerte dissous dans le corps d'un plongeur est fonction de sa pression partielle dans le mélange respiré et que son rythme d'élimination lors de la décompression augmente avec la différence de sa concentration dans le sang et

dans le mélange respiratoire, il serait évidemment souhaitable de maintenir une pression partielle élevée d'oxygène. Malheureusement, un plongeur inhalant de l'oxygène sous une pression partielle de deux atmosphères est tôt ou tard victime de convulsions de type épileptique dont l'issue peut être fatale. Des expériences menées sur des rats ont montré que l'injection de certains composés chimiques leur permettait de résister sans mal à des concentrations élevées d'oxygène (oxygène pur à la profondeur équivalente de 50 m) alors que les animaux témoins sont tués. L'effet de l'oxygène hyperbare sur le système nerveux central de l'homme pourrait peut-être être jugulé de la même façon, permettant une réduction massive des temps de décompression.

Des modèles mathématiques soumis aux calculatrices électroniques permettent d'établir des tables de décompression plus « profondes » et d'une plus grande exactitude théorique. Les données fournies à la calculatrice sont les volumes de gaz dissous dans une dizaine de « tissus types » imaginaires lors d'une plongée X et le degré de sursaturation acceptable pour chacun de ces tissus sans formation de bulles. La calculatrice fournit la vitesse de remontée permise et la durée des paliers nécessaires en fonction du mélange respiratoire.

L'étude théorique systématique des accidents de décompression pourrait être utilement aidée par un simulateur de formation de bulles. Le docteur Schreiner songe à un modèle physique, d'abord statique ; des mélanges gazeux y seraient dissous sous la pression d'une plongée X. Pendant la décompression, les bulles formées dans un aquarium traversé par un rayon lumineux seraient projetées sur un écran calibré. On pourrait ainsi mesurer avec précision le volume et la vitesse de formation des bulles pour une saturation donnée, ou encore la vitesse de résorption des bulles au cours du traitement de décompression simulée. Les résultats et leurs comparaisons seraient plus significatifs encore avec un simulateur plus complexe faisant intervenir les modifications dues aux tissus et à la circulation du sang, sous la forme d'un système artéioveineux simulé, mettant en communication des récipients contenant des fluides et des « tissus » à caractéristiques d'absorption différentes. Les lois physiques, ainsi précisées théoriquement, seraient utiles à la mise au point des futures tables de décompression et des thérapeutiques de recompression. Ce serait l'instrument idéal pour mesurer l'efficacité de certains agents chimiques à inoculer aux plongeurs à titre préventif ou curatif pour freiner



**Tourelle Doris,
Cachalot de Westinghouse,
ADS IV du groupe Ocean Systems,
le principe est le même. Il s'agit
de systèmes tourelle de plongée-chambre
de décompression. Ci-dessus,
l'ADS IV, homologué par l'U.S. Navy.**

le développement des bulles. L'héparine, par exemple, a déjà donné des résultats encourageants sur l'homme comme sur l'animal. D'autres substances sont aujourd'hui à l'étude.

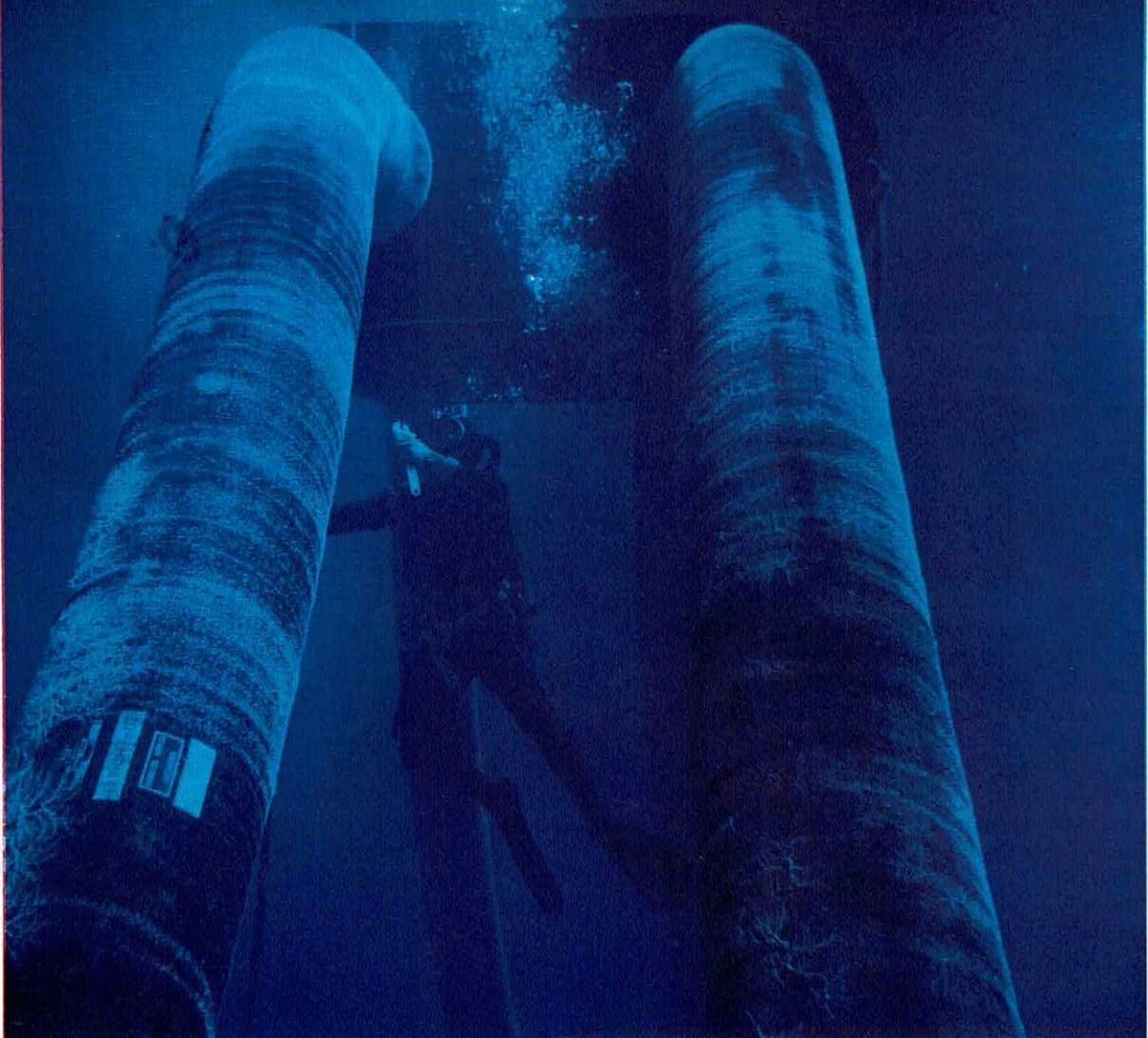
Le docteur Bond, au cours du projet « Genesis », le docteur Cabarrou en France et d'autres auteurs, ont démontré l'apparente innocuité d'une exposition prolongée d'animaux de laboratoire à des atmosphères artificielles sous diverses pressions. En ce qui concerne l'homme, les informations que nous possédons sont encore squelettiques. Le record de durée est détenu par Scott Carpenter avec 30 jours à 60 m de profondeur. La tendance est, à l'heure actuelle, à envoyer les hommes de plus en plus bas et de plus en plus longtemps. C'est pourquoi il importe, au moins, que les travaux de laboratoire soient multipliés et systématisés, sous diverses pressions et atmosphères. Ainsi pourrait-on comparer à des souches témoins, des souches d'animaux exposés pendant de nombreuses générations à des conditions artificielles d'atmosphères et de pressions, et déceler d'éventuelles modifications de leur organisme.

Quelques problèmes immédiats

Si nous en revenons aux difficultés immédiates, le froid reste l'ennemi n° 1. Comme Hydra, toutes les expériences de plongée réelle mentionnées ici ont été contrariées par le froid. L'hélium possède une conductibilité thermique six fois plus grande que celle de l'azote et ce gaz « pompe » littéralement les précieuses calories du plongeur, par l'extérieur, via la peau, et par les poumons. En profondeur, quand la pression écrase le vêtement isolant ou le remplit

d'hélium, une source artificielle de chaleur devient indispensable. Divers modèles de vêtements chauffants ont été imaginés, la plupart encore au stade expérimental. Les uns sont à résistance électrique, d'autres à circulation d'eau (fournie par la surface, chauffée par cartouche chimique, ou même par pile nucléaire). A signaler l'équipement Piel, fabriqué en série en France, et composé d'une combinaison électrique à conducteurs de mercure sous tubes flexibles, d'un vêtement isolant regonflable à l'air en profondeur et d'un survêtement de protection. Les exemples de ces petits problèmes triviaux dont la solution se fait souvent attendre sont légion. Songeons, pour l'hélium, au célèbre effet « Donald Duck » qui perturbe gravement les communications fond-fond et fond-surface à partir d'une cinquantaine de mètres de profondeur. On a commencé à expérimenter des dispositifs électroniques capables de corriger cette distorsion des sons en milieu à l'hélium.

Pour combattre la fatigue pulmonaire, due à la plus grande densité du mélange respiratoire en profondeur, et responsable d'un taux de gaz carbonique élevé, les aquanautes auront besoin de détendeurs beaucoup plus souples et d'appareils respiratoires à recirculation assistée : il leur faudra des appareils d'analyse et de contrôle des gaz beaucoup plus précis et automatiques. C'est un problème de plus en plus délicat puisque les marges de tolérance de l'organisme au gaz carbonique et aux autres polluants de l'atmosphère diminuent dangereusement au fur et à mesure qu'augmente la profondeur. Soulignons, là encore, que c'est sur des détails aussi prosaïques, quand ce n'est pas sur un robinet qui fuit ou sur un ressort bloqué par la rouille, que sont venues ces dernières années buter d'ambitieuses expériences, mieux préparées du point de vue scientifique que du point de vue de la plomberie. Il existe toutefois de nouvelles directions de recherches susceptibles de résoudre de telles difficultés. D'ores et déjà, les aquanautes ont trouvé des alliés précieux dans quelques espèces d'animaux mieux adaptées au milieu marin : les dauphins, les otaries, les phoques. Les résultats obtenus par les plongeurs de « Sealab II » qui ont travaillé avec un dauphin indiquent que ces animaux, intelligents et bienveillants, sont tout à fait dignes de confiance. « Sealab III » porte au rôle de l'équipage deux dauphins, deux phoques et des otaries. En outre, les recherches actuelles sur l'extraordinaire immunité des mammifères marins aux accidents de décompression et à la narcose ouvriront peut-être de nouveaux horizons.



PHOTOS SPAF



**En Méditerranée,
une équipe de plongeurs procède
(photo ci-dessus)
à l'arrimage sur le fond d'un « sea-line »
amenant le pétrole brut
vers une bouée de chargement.**

**En haut de page,
un plongeur inspecte
les « flow-lines », flexibles
garnis de flotteurs
reliant le terminal sous-marin du sea-line
à la bouée de chargement.**

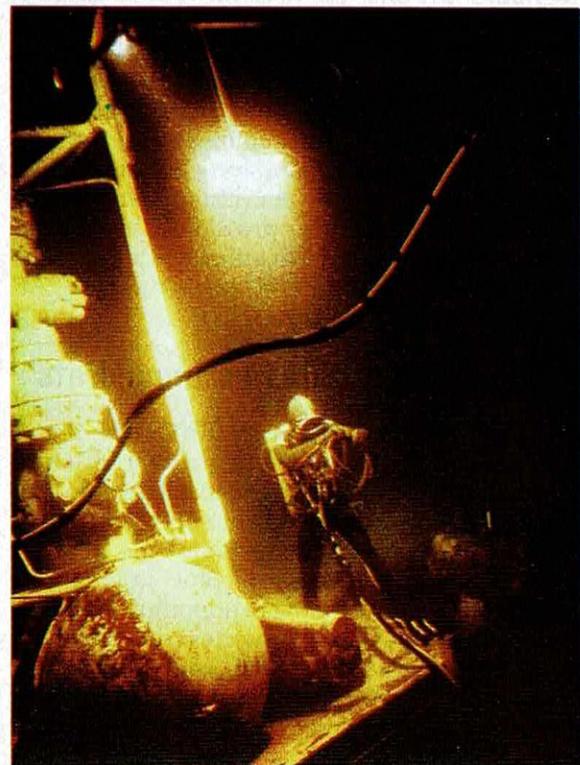


PHOTO LES REQUINS ASSOCIÉS

TRAVAIL SOUS-MARIN PAR PLONGEURS AUTONOMES

*Au large d'El Alamein,
une bouée géante (ci-dessous)
pour l'accostage et le chargement
des pétroliers de fort tonnage.
Elle dispose de huit points d'ancre
aménagés sur le fond
(photo en bas de page)
par des équipes de plongeurs
autonomes.*



PHOTOS SPAF



*Ci-contre,
en page de gauche,
expérience de travail sous-marin
conduite à grande profondeur
(plus de cent mètres)
par des plongeurs du groupe
Cousteau,
lors de l'opération Précontinent III.
Il s'agissait d'installer
et de réparer une tête de puits
de pétrole fictive.*

Par ailleurs, des chercheurs américains ont réussi à garder vivants des souris et des cobayes dans une capsule hermétique submergée faite d'une très mince membrane de silicium à perméabilité sélective (étanche à l'eau mais permettant à l'oxygène de pénétrer dans la capsule et au gaz carbonique d'en sortir). Les chercheurs soulignent qu'il n'est théoriquement pas impossible de fabriquer une membrane semblable fournissant à des aquanautes dans leurs maisons sous la mer toute la quantité d'oxygène nécessaire (l'évacuation du gaz carbonique pose un problème moins grave, il est absorbé en partie à l'interface eau-gaz par l'océan). Ils parlent même de construire sur ce principe un appareil respiratoire de plongée autonome grâce auquel le mélange gazeux serait purifié et réoxygéné automatiquement par l'eau de mer. Dans l'état actuel de la technique, un tel appareil reste une vue de l'esprit. Mieux encore, un chercheur hollandais, le docteur Johannes Kylstra, qui travaille actuellement aux Etats-Unis, a fait respirer pendant plus d'une demi-heure à des souris et à des chiens immergés un liquide suroxygéné. Des chiens ont survécu sans effets fâcheux au retour à la respiration aérienne. Il n'est pas exclu que l'homme puisse un jour respirer un liquide semblable. S'il faisait cela, c'est-à-dire s'il respirait un mélange oxygène-solution isotonique au lieu d'un mélange oxygène-gaz inerte, il s'affranchirait d'un coup et de la narcose et des accidents de décompression et il serait capable enfin de plonger librement à des profondeurs qui sont aujourd'hui hors de sa portée. La seule limite serait alors l'effet mécanique de la pression sur les tissus. De nombreux malades soumis à des lavages pulmonaires thérapeutiques, parfois répétés, ont montré qu'aucun effet fâcheux ne résulte de l'inondation du poumon. Un plongeur américain, Francis Faleczik, s'est soumis volontairement au même traitement en 1968. Tandis qu'il respirait normalement par un poumon, l'autre était rempli d'une solution isotonique. C'est la première étape, sans échange gazeux bien entendu, mais qui ouvre la voie. Si les problèmes chimiques sont résolus un jour (l'élimination du gaz carbonique reste insuffisante), si l'appareil respiratoire nécessaire (qui sera un chauffe-bain distributeur à dosage automatique) est jamais mis au point, si l'homme accepte ce nouveau comportement biologique, alors la révolution définitive aura été accomplie et l'homme, au lieu de pénétrer le milieu sous-marin en visiteur maladroit, s'y sera véritablement intégré.

Robert STÉNUIT

TRAVAILLER SOUS LA MER

Les articles précédents ont montré les besoins qu'il y avait — ou qu'il y aura — de travailler sous la mer, et présenté certaines des techniques étudiées ou mises au point pour y parvenir : plongeurs, machines spécialisées guidées par câbles, engins plus ou moins universels et télécommandés, sous-marins scientifiques, etc. Il est intéressant de réfléchir sur ces diverses possibilités de travailler sous la mer et d'essayer d'établir ce qu'on pourrait appeler une « méthodologie de l'intervention » en milieu sous-marin. On se rend alors vite compte que la spécificité des outils, des méthodes, est liée à l'hostilité du milieu sous-marin vis-à-vis de l'homme (distance, pression, température, obscurité, danger) et à l'agressivité physicochimique de ce même milieu vis-à-vis des matériaux, ce dernier problème étant en somme purement technologique.

Cette notion générale d'hostilité, valable pour un certain nombre d'environnements, ne s'est dégagée que lentement. Elle n'est pas propre seulement au milieu sous-marin ; on la rencontre d'une façon très similaire dans l'exploration spatiale et, d'une façon plus sévère peut-être encore, dans le milieu nucléaire où la manipulation de corps fortement radioactifs conduit à définir un « espace hostile » où règnent des rayonnements intenses et particulièrement dangereux. Il est intéressant de constater qu'il est possible de dégager des principes généraux d'intervention dans ces milieux, d'où découlent des « retombées technologiques » réciproques, des équipements qui profitent mutuellement des progrès effectués dans les domaines correspondants (1). Dégager les principes d'une méthodologie de l'intervention dans le milieu sous-marin suppose que l'on distingue d'emblée et bien nettement cette notion d'intervention de la simple observation. Cette dernière opération, passive, est généralement beaucoup plus simple.

Nous exclurons de notre propos l'automatisation ou la programmation complète, préparée en surface et installée sur le fond. On

peut évidemment concevoir d'installer un jour au fond des océans des usines complètement automatisées, mais ceci est encore lointain, ne s'appliquera pas à tous les cas d'exploitation sous-marine, et posera d'ailleurs des problèmes d'entretien et de réparation.

Une première possibilité d'action sur un équipement immergé est d'envoyer sur le fond une machine très spécialisée, guidée par exemple par un ou plusieurs câbles, dimensionnée de façon rigoureuse pour l'équipement à opérer, et dont la séquence de fonctionnement est programmée ou, le plus souvent, commandée à partir de la surface (à terre ou à bord d'un navire). C'est, on le sait, une des solutions étudiées par l'Institut Français du Pétrole, qui a déjà réalisé et expérimenté avec succès plusieurs machines de ce genre : le RIC (ou Robot d'Immersion de Conduite), le RAC (ou Robot d'Aboutement de Conduite) et, en cours actuellement, le REC (ou Robot Echangeur de Composants). Cette méthode est intéressante, relativement insensible à la profondeur, et conduit à des machines assez simples dans la mesure où l'opération à effectuer l'est également. Elle dépend, par contre, de moyens de surface, un navire le plus souvent, lui-même tributaire de l'état de la mer. Elle risque, d'autre part, de conduire à la prolifération d'un parc de machines dont chacune est spécifique, pour peu que les tâches à effectuer se multiplient ou portent sur des équipements particulièrement complexes. Elle manque donc un peu d'universalité par rapport aux autres méthodes que nous allons maintenant décrire.

PLONGEURS, SOUS-MARINS, OU ENGINS ROBOTS?

La plus connue et la plus ancienne des méthodes de travail sous-marin, c'est l'intervention directe de l'homme plus ou moins protégé, scaphandrier ou plongeur. L'impossibilité physiologique d'extraire l'oxygène vital directement du milieu où il se trouve alors plongé a amené l'homme à interposer une barrière entre ce milieu hostile et lui-même, et à essayer de garder autour de lui son « milieu naturel ». Cette notion de barrière, de protection, est essentielle dans tous les cas d'intervention en milieu hostile, qu'il soit sous-marin, spatial ou nucléaire.

(1) Cette analogie est si marquée aux Etats-Unis qu'on parle souvent de l'« espace », sans distinguer entre « espace extérieur » et « espace intérieur » (l'Océan), et que ce sont bien souvent les mêmes sociétés qui travaillent dans les deux domaines : Westinghouse, Lockheed, Grumman, North American Aviation, etc...

Des plongeurs de la firme américaine Ocean Systems s'affairent à contrôler le fonctionnement d'un outil de travail sous-marin.

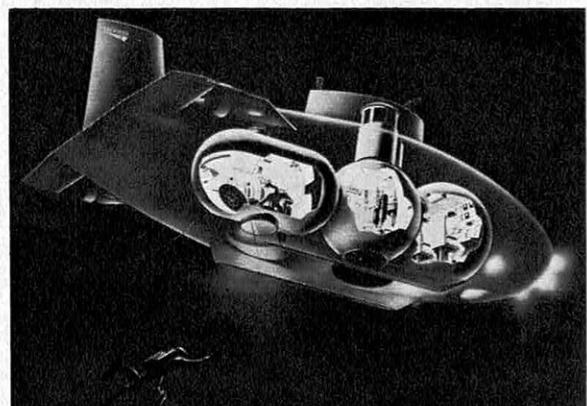
Il s'agit du prototype d'un bras manipulateur destiné au sous-marin d'intervention Beaver IV.

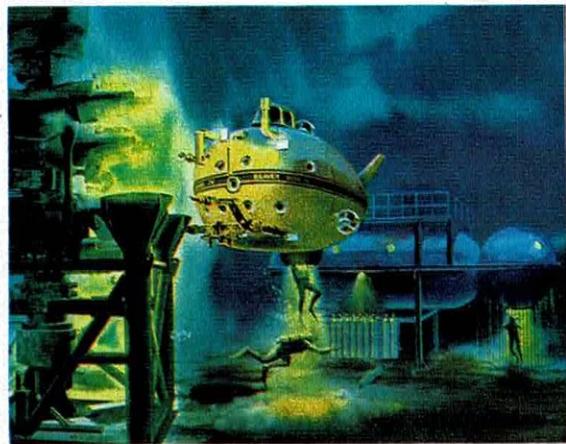
Il est équipé ici d'une tête en U et on tente de lui faire actionner la vanne d'une tête de puits sous-marine scilive.





Le sous-marin Deep Quest, de la Lockheed Missile and Space Company, aux essais dans la baie de San Diego (Californie), va quitter son « navire-mère », le catamaran « Transquest »; ci-contre, une vue d'artiste de l'engin montrant les trois compartiments : pilotage à l'avant, instrumentation scientifique au centre, chambre « humide » pour plongeurs à l'arrière. Quant au « Star II » de General Dynamics, petit sous-marin à l'autonomie d'une dizaine d'heures en plongée, on le voit, ci-dessous, inspectant des canalisations immergées.



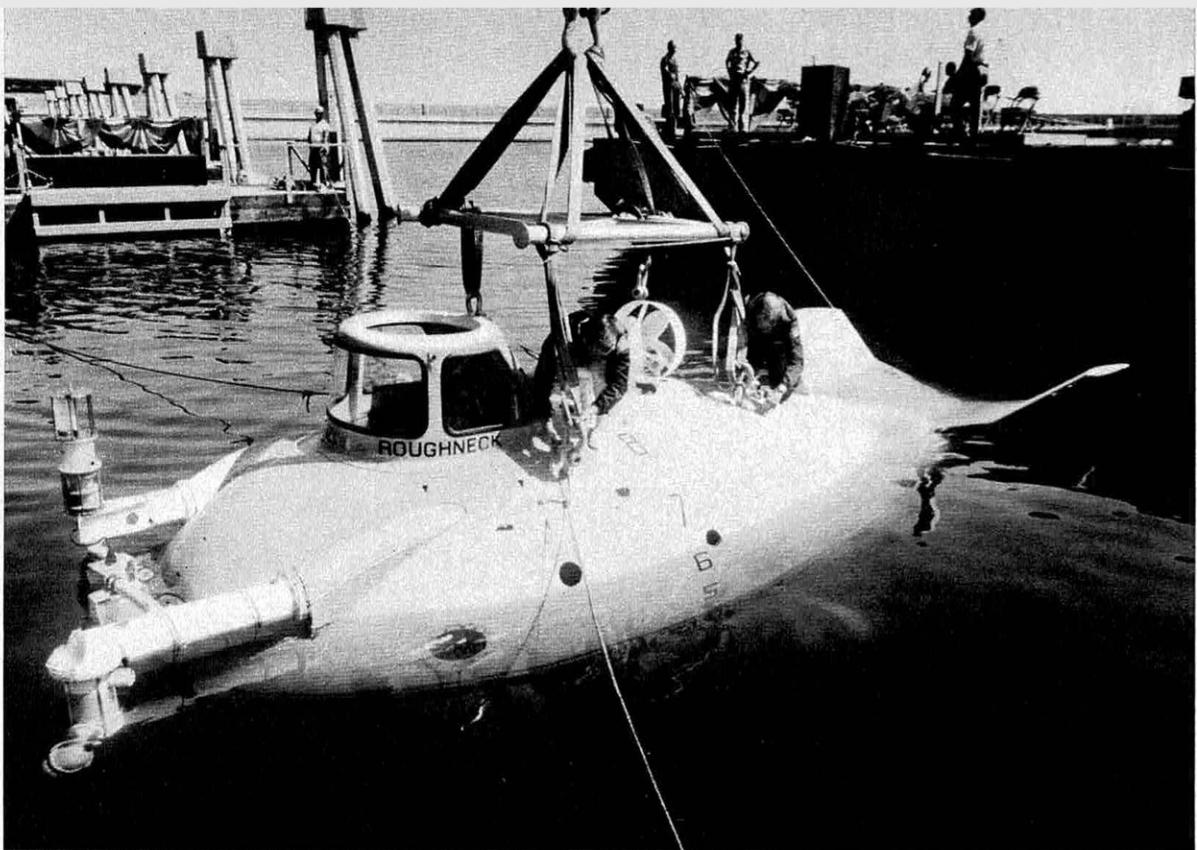


Le Beaver Mk IV, équipé de deux bras manipuleurs à têtes interchangeables, de caméras de télévision, projecteurs, etc., est destiné à l'exécution d'une grande variété de tâches, en particulier pétrolières. La composition ci-dessus en donne un aperçu.

Elle représente d'ailleurs une version dite « Roughneck » de l'engin, avec compartiment humide pouvant lâcher des plongeurs sur le chantier sous-marin.

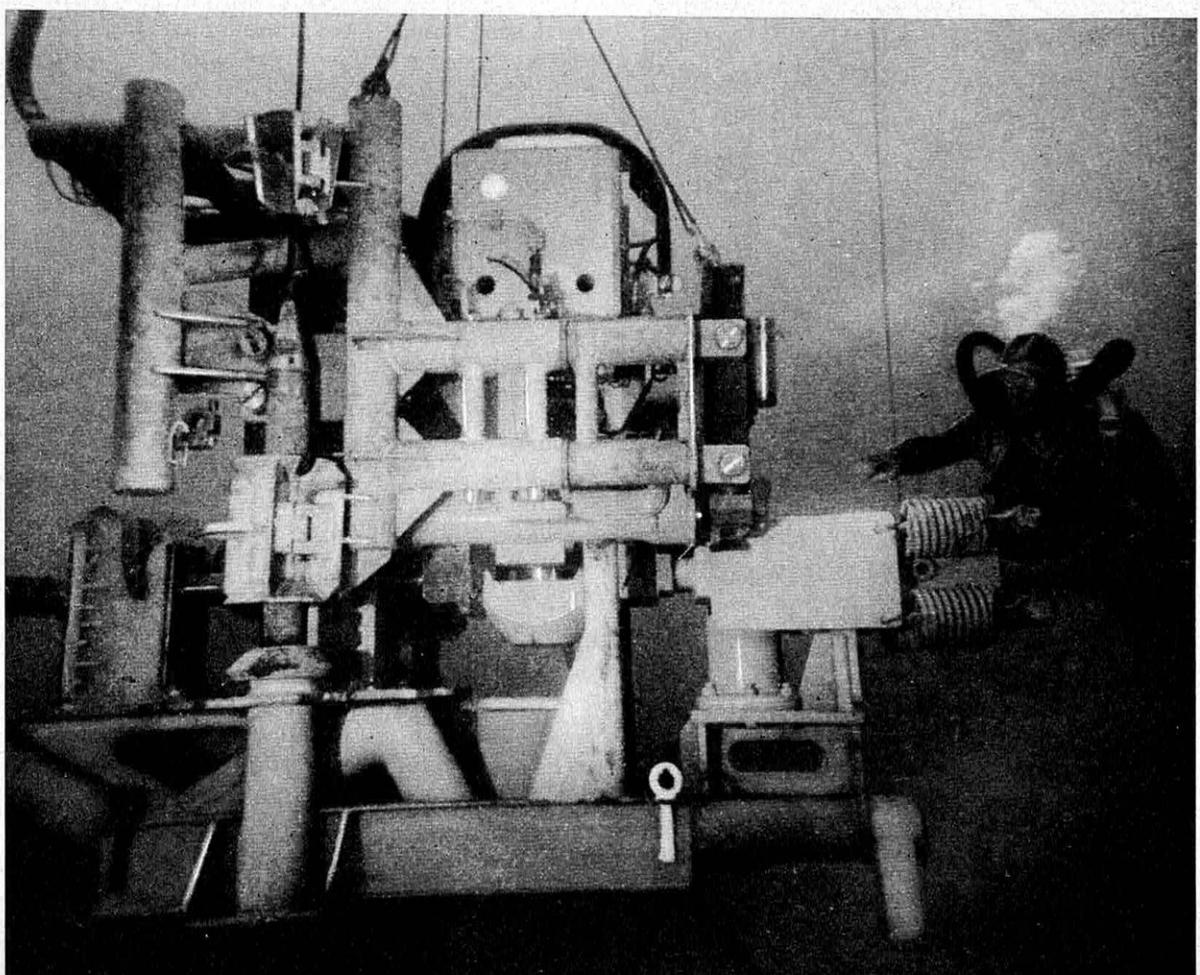
Le domaine utile du plongeur qui n'est ni protégé ni équipé n'est qu'une pellicule de quelques mètres d'épaisseur à la surface des océans. Nous ne nous y attarderons donc pas. La méthode d'intervention par plongée et « scaphandre » est actuellement la plus utilisée, la seule même véritablement « industrielle ». Elle progresse d'une façon spectaculaire vers des profondeurs croissantes qui étaient à peine pensables il y a quelques années (remarquables expériences, en France, de la Comex et du G.E.R.S.). Mais on peut penser qu'elle est tout de même limitée, tant du point de vue physiologique que quant aux possibilités réelles d'intervention prolongée de l'homme. Elle nécessite une infrastructure non négligeable, et laisse peser une menace sur la vie humaine.

Ces dernières limitations ou contraintes ont amené à explorer les possibilités de ce qu'on appelle les « engins », qu'ils soient habités, comme les sous-marins, ou entièrement télé-commandés. Il y a là deux grandes options qui méritent qu'on étudie d'un peu plus près leurs avantages et inconvénients respectifs. L'engin sous-marin habité d'intervention est appelé, selon les cas, sous-marin scientifique ou sous-marin de travail. Deux exemples extrêmes en sont la soucoupe plongeante du commandant Cousteau d'une part, les bathyscapthes d'autre part, tels que l'Archimède de la Marine nationale et du C.N.R.S. Entre les deux, on peut placer toute une première



Lancé à Long Beach en Californie en septembre dernier, le Beaver IV, version à compartiment humide, doit pouvoir opérer jusqu'à 700 mètres de fond. L'habitacle est prévu pour deux hommes, pilote et opérateur des outils télécommandés, par exemple.

A l'opposé des engins habités à grande souplesse d'utilisation, les robots tels que le R.A.C., ci-dessous, exécutent une tâche bien spécifique. Descendu le long de câbles-guides, le RAC assure la jonction et l'étanchéité entre une tête de production sous-marine et les conduites de collecte.



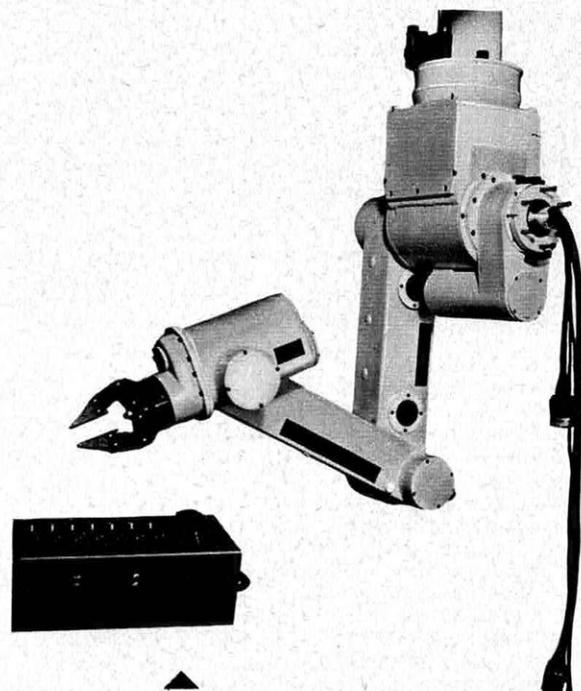
génération de petits sous-marins, comme l'*Alvin*, le *Beaver*, le *Deep Quest* (américains), le projet SARE du CNEXO, engins que nous présenterons un peu plus en détail ultérieurement. Un tel engin sous-marin habité comporte essentiellement une « cabine » pouvant résister aux pressions des profondeurs de travail, cabine dans laquelle sont logés un ou plusieurs opérateurs (pilotes, navigateurs, etc.) constituant l'équipage. Cet équipage, protégé du milieu ambiant par une coque, peut ainsi vivre et se maintenir dans son milieu « naturel ».

On aperçoit immédiatement une des premières servitudes de ces engins habités : assurer la vie normale et, dans certains cas, la survie de l'équipage, implique des réserves d'atmosphère respirable ou une régénération de l'atmosphère de l'engin. Comme on le comprend aisément, il ne peut y avoir là de demi-mesure ; la protection et la sécurité des hommes doivent être absolues.

Liés à l'engin, et logés selon les cas dans la cabine habitée ou autour d'elle et protégés par une carène, on trouve les équipements nécessaires aux déplacements (réserves

d'énergie, systèmes propulsifs, système de navigation), nécessaires à la vie de l'équipage, comme nous l'avons dit, nécessaires aux communications avec la surface, à l'observation et au repérage, nécessaires enfin pour effectuer la tâche, objet de la mission.

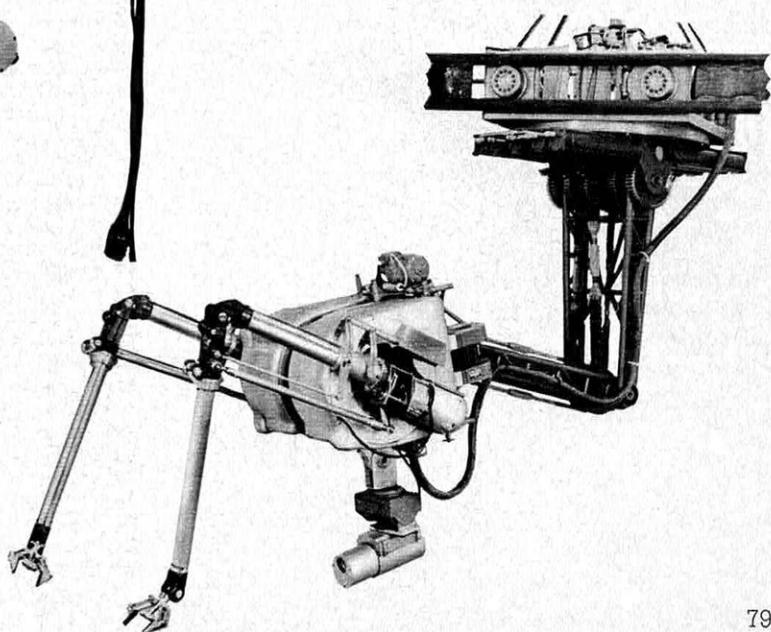
Ces derniers équipements sont des outils de travail ou, plus souvent, des télémanipulateurs ou outils de manipulation à distance. Nous y reviendrons dans la suite de cet article, non seulement à cause de leur relative nouveauté, mais principalement à cause du rôle croissant qu'ils sont appelés à jouer dans le domaine sous-marin, comme ils l'ont fait dans le développement du génie nucléaire qui a imposé leur mise au point. La solution « engin habité » est actuellement bien au point et il existe des solutions techniques valables pour la majorité des problèmes posés. On dénombre dans le monde entre quarante et cinquante petits sous-marins de ce genre. Malgré cette relative prolifération, il est encore un peu prématûr d'en conclure que cette méthode sera préférée pour l'exploitation des océans. Il manque encore la sanction d'une réelle expérience (la

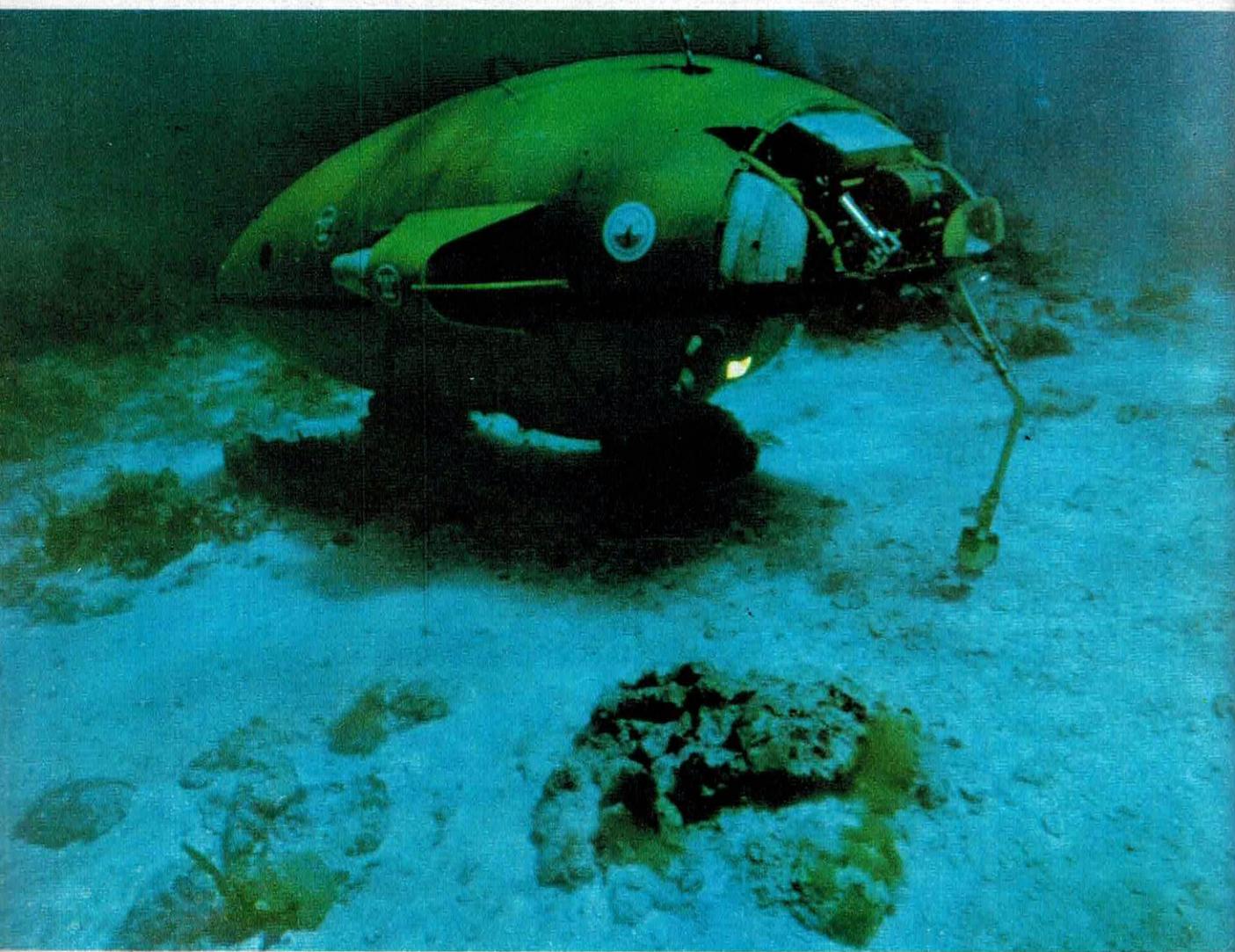


Dans le domaine sous-marin, les manipulateurs sont du type télécommandé hydraulique ou électromécanique.

C'est le cas de cette version du PaR, électromécanique, de conception américaine, qui peut opérer à des profondeurs de 200-300 m.

Très largement utilisés dans l'industrie nucléaire, les télémanipulateurs maître-esclave tel que le *Mascot* italien, ci-dessous, sont dotés de transmissions mécaniques ou électroniques complexes entre bras-maîtres (non visibles ici) et bras-esclaves.





Première née d'une série d'engins étudiés par Westinghouse à partir des travaux du commandant Cousteau, la soucoupe Deepstar 4000 est surtout destinée à l'exploration scientifique et au prélèvement d'échantillons, stockés dans une corbeille extensible à la partie inférieure de l'engin.

Le dessin en page de droite et le commentaire ci-contre en indiquent les principaux organes.

- 1 Bourrelet pare-chocs
- 2 Sondeur à échos vers le haut
- 3 Pompe et commande des circuits hydrauliques
- 4 Cylindre d'équilibrage à mercure arrière
- 5 Fusibles de la distribution électrique
- 6 Ballast
- 7 Passage de conducteurs électriques (bâbord et tribord)
- 8 Attache pour levage
- 9 Panneau d'accès
- 10 Bordé gonflable
- 11 Antenne radio de surface
- 12 Lampe-éclair au xénon
- 13 Batterie avant largable
- 14 Cylindre d'équilibrage à mercure avant
- 15 Lest de remontée (largable)
- 16 Lampe extensible de prises de vues
- 17 Bras manipulateur à commande hydraulique
- 18 Caméra photo 70 mm ou cinéma 16 mm
- 19 Hublots d'observation (bâbord et tribord)
- 20 Panier à échantillons extensible
- 21 Habitec
- 22 Moteurs de propulsion et d'orientation (bâbord et tribord)
- 23 Lest fin
- 24 Ballast
- 25 Compensateur de pression à huile pour batteries
- 26 Batteries arrière (bâbord et tribord)
- 27 Transformateurs-inverseurs de courant (bâbord et tribord)
- 28 Sondeur à échos vers le bas
- 29 Lest de descente (largable)

majorité de ces engins sont récents et n'ont pas encore accumulé une longue pratique) et la connaissance détaillée des conditions économiques de leur exploitation. Tout au plus connaît-on le prix de revient, souvent élevé, pour ne pas dire prohibitif, de ces prototypes. L'avantage principal de ces engins sous-marins est leur polyvalence, et plus encore le fait que l'opérateur est à proximité de la tâche à accomplir, sur le chantier, pourrait-on dire. Là, il voit (à travers des hublots, télescopiques, ou par télécaméras), il voit et il juge, c'est-à-dire qu'il est bien placé pour décider. Certains aspects psychologiques ne sont d'ailleurs pas à négliger : que ce soit dans les océans, dans l'espace ou en manipulant des objets radioactifs (et pour autant que la tâche ne soit pas purement répétitive, domaine de la machine), l'homme est attaché à sa propre présence, fut-elle soumise à nombre de contraintes, sur le lieu de son intervention. Mais cette présence n'est possible qu'au prix de servitudes importantes pour l'engin qui doit assurer la sécurité et les conditions de vie de l'équipage.

Les engins d'intervention non-habités, entièrement télécommandés depuis un poste qui peut être fort éloigné, en surface ou aussi bien à terre, échappent évidemment à de telles servitudes. Les engins relativement universels que nous appelons « robots » sont généralement reliés au poste de commande par un câble porteur d'informations, et, le plus souvent, d'énergie. Ils comprennent, comme un sous-marin habité, des systèmes de propulsion, de navigation, d'observation (télécaméras) et de télémanipulation. En plus, leur

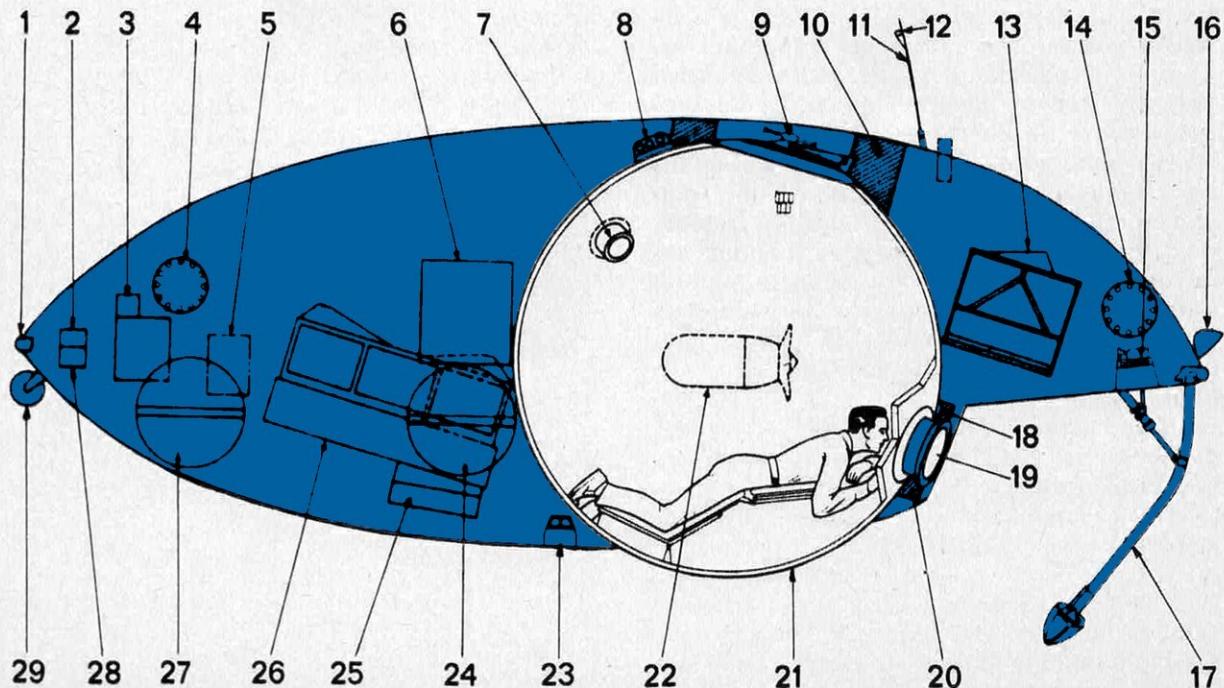
sécurité est, pourrait-on dire, limitée à leur coût, puisque leur perte n'a que des conséquences matérielles ou financières. Ils ne sont pas plus complexes que les sous-marins ; leur taille est indépendante de celle de l'homme et ils n'ont donc pas de dimensions minimales ; mais ils ne permettent pas la présence effective d'un opérateur sur le chantier sous-marin.

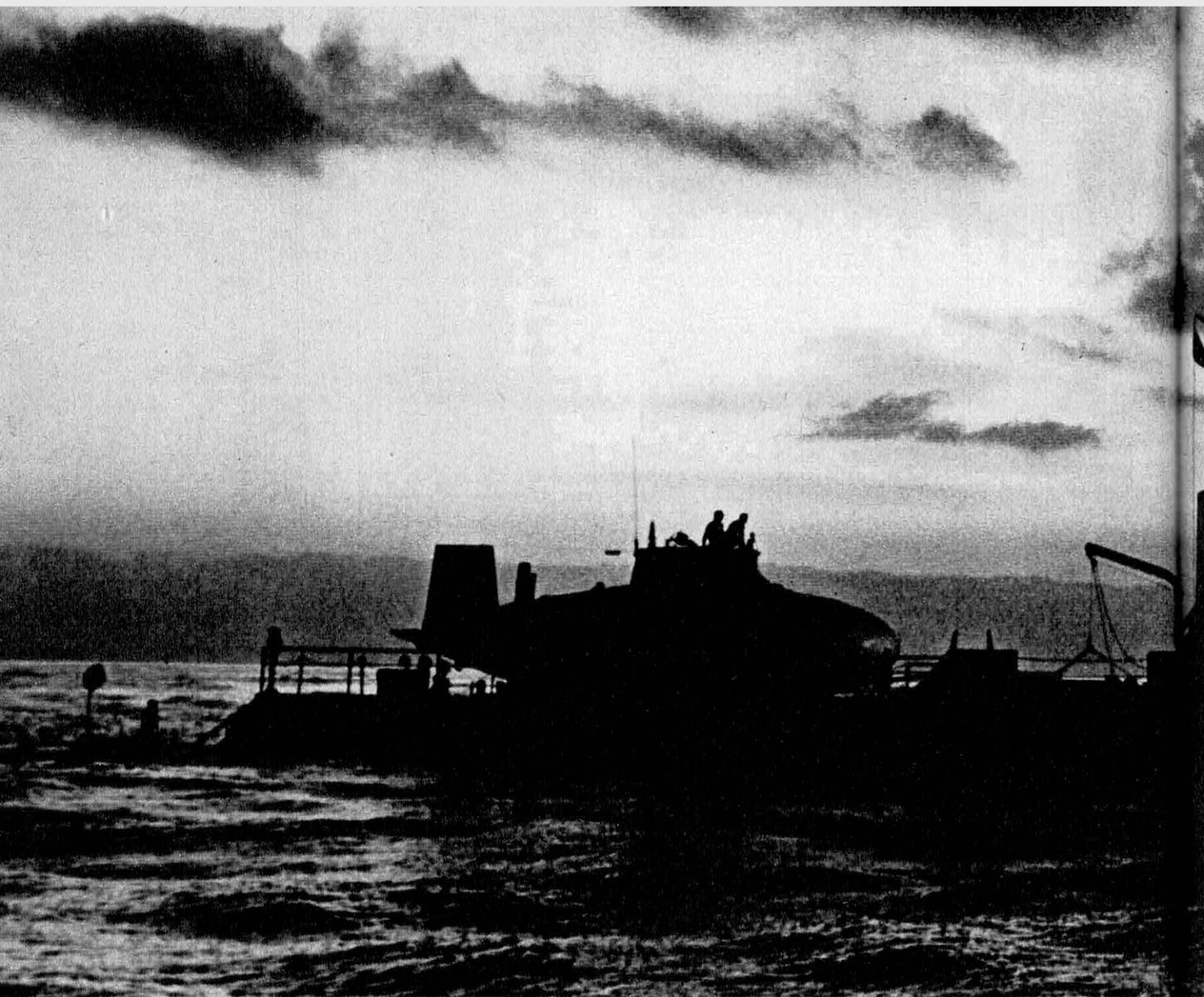
Avant de passer à la description succincte de quelques réalisations marquantes en engins habités ou télécommandés, nous pensons utile d'expliquer un peu leurs outils de travail, c'est-à-dire les télémanipulateurs.

TÉLÉMANIPULATION ET TÉLÉMANIPULATEURS

Ainsi que nous l'avons signalé plus haut, des télémanipulateurs ont été mis au point il y a déjà longtemps pour les centres nucléaires. Lorsque des besoins complètement nouveaux et différents se sont fait sentir pour l'exploration des océans, besoins qu'une analyse technologique pouvait néanmoins traduire en « fonctions » plus ou moins identiques à celles du domaine nucléaire, il était naturel qu'on se tournât vers la panoplie des outils de télémanipulation déjà existants pour les adapter aux tâches sous-marines.

Quels sont donc ces télémanipulateurs ? Il convient tout d'abord de rappeler la définition selon laquelle manipuler un objet, c'est, au sens le plus général, le changer de position et d'orientation. Dans le monde euclidien où nous vivons, c'est composer un mouvement de translation et un mouvement





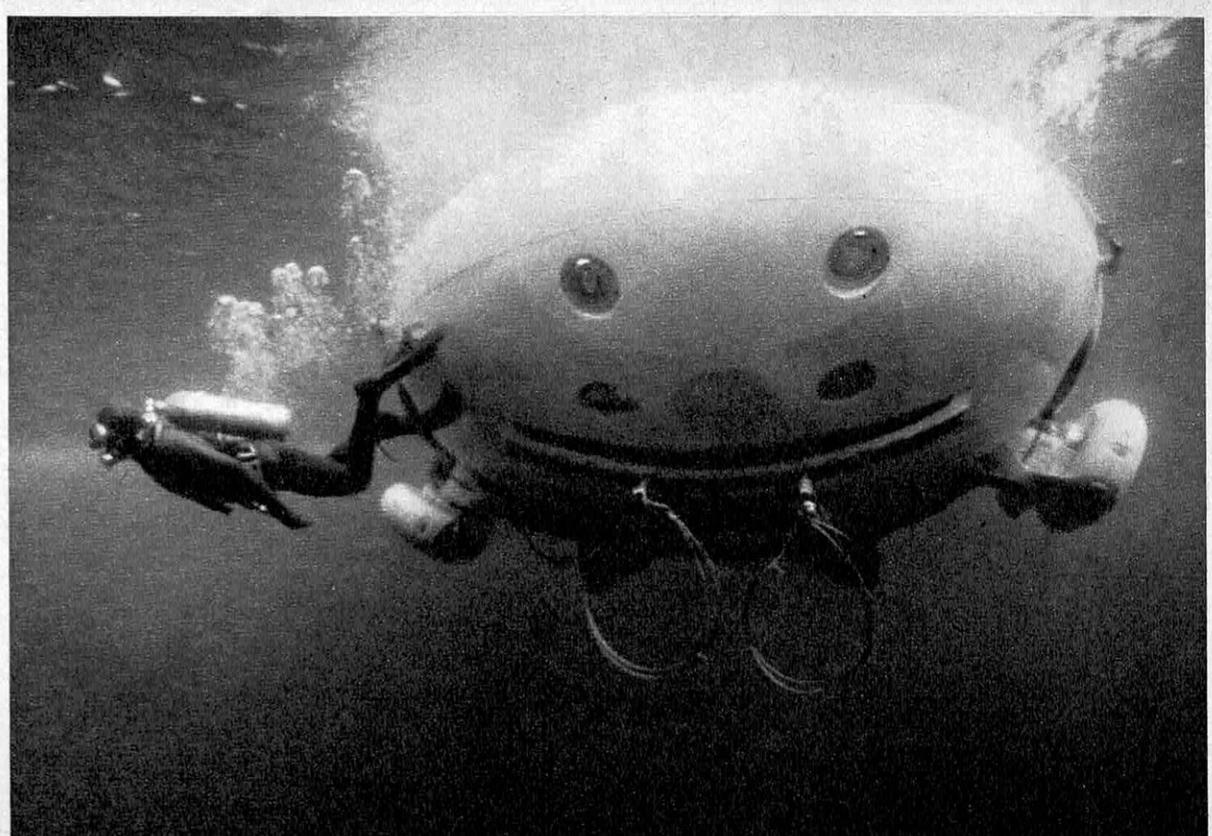
de rotation par rapport à trois axes de référence, c'est-à-dire agir avec six degrés de liberté. Si on ajoute la nécessité de saisir l'objet — ce qu'on appelle parfois un septième degré de liberté —, notre télémanipulateur devra donc être capable d'au moins sept mouvements. Rappelons qu'une machine-outil est capable en général de trois ou quatre mouvements, et, de plus, toujours les mêmes. Ces sept mouvements au minimum sont encore loin, d'ailleurs, de la richesse de possibilités du bras humain, auquel le télémanipulateur tente en somme de se substituer...

Issus de la simple pince de travail à distance, droite ou articulée et à passage à travers une rotule (pour accroître les degrés de liberté), les télémanipulateurs utilisés quotidiennement dans l'énergie nucléaire peuvent être divisés en deux catégories principales : les systèmes maître-esclave, ou à copie de mouvement, et les manipulateurs télécommandés.

• **Manipulateurs maître-esclave** : Ces téléma-

Deep Quest, au repos sur le pont de son navire de soutien, conçu tout spécialement pour lui. L'autonomie assez limitée des engins d'exploration ou d'intervention actuels rend cette solution indispensable.

En février 1968, Deep Quest battait un record du monde de profondeur par près de 2800 mètres de fond dans le Pacifique. Avec des capacités de manœuvres très supérieures aux bathyscaphe, de tels engins pourraient prospection les fonds à grande profondeur, prélever des échantillons minéraux, recueillir des indices de gisements pétroliers, etc.

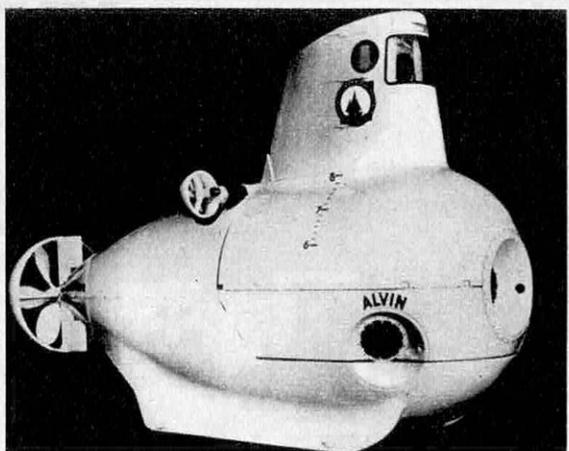


nipulateurs sont à deux bras, le premier situé dans la région protégée, le second dans la région hostile ; le bras esclave recopie les déplacements de la main de l'opérateur dans tous ses mouvements, dans les limites de la géométrie de l'appareil lui-même. Ce sont les télémanipulateurs les plus répandus. On peut les subdiviser en trois groupes.

Les maître-esclave *directs* sont des machines simples qui reproduisent à force égale, à de légers frottements près, les mouvements de l'opérateur, à l'aide d'une transmission mécanique directe.

Les maître-esclave *assistés*, qui tendent de plus en plus à se substituer aux premiers, conservent la transmission directe mais complétée par un apport d'énergie extérieure réalisant une amplification de force ou de déplacement.

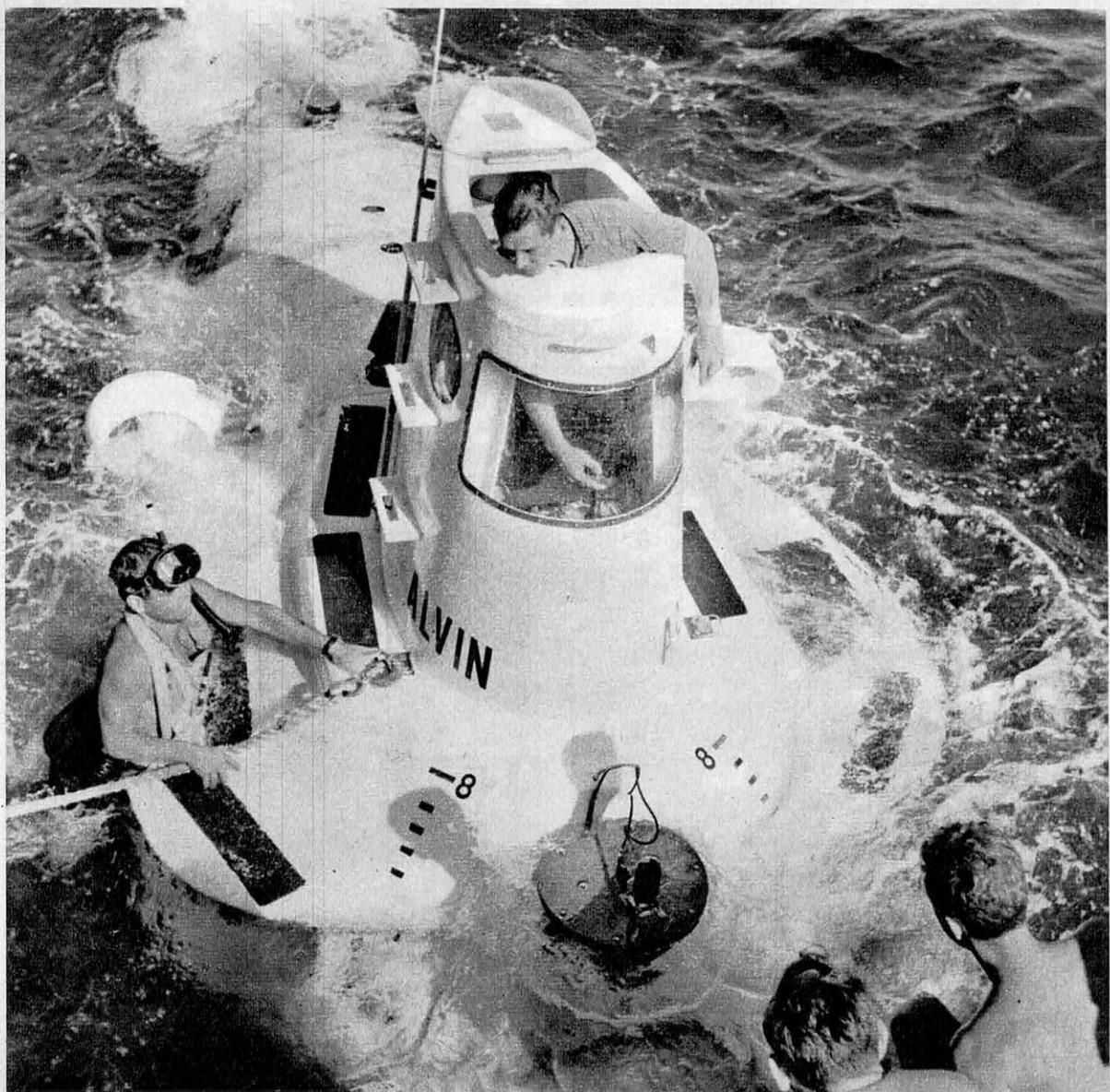
La principale limitation de ces télémanipulateurs est que la transmission directe impose un point fixe et que le champ couvert par le télémanipulateur est généralement limité. Il faut donc, dans ce cas, ou multiplier les télémanipulateurs et postes de travail pour cou-

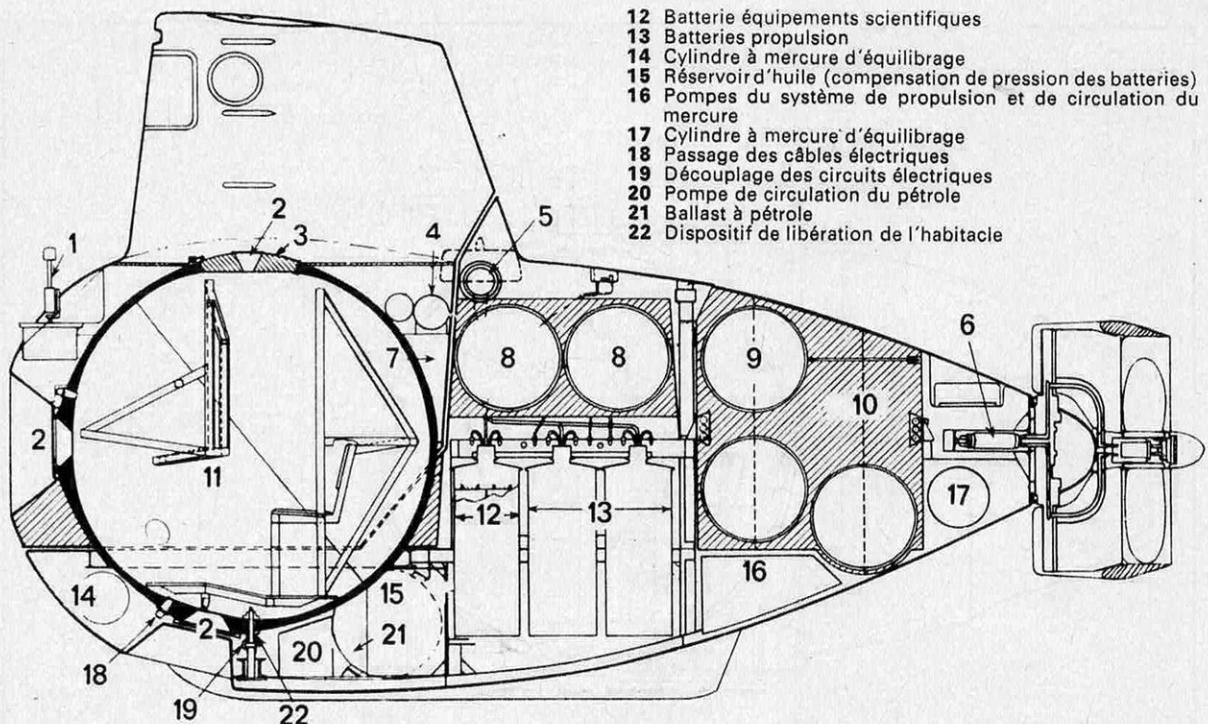


L'Alvin fut un des premiers petits submersibles pour grandes profondeurs.

Son système de plongée comportait une structure souple capable de s'emplir de pétrole aux dépens d'un réservoir placé sous l'habitacle, d'où variation de volume de l'engin.

La sphère habitacle, largable en cas d'incident, pouvait abriter deux hommes.





- 1 Sonar à balayage
- 2 Hublots
- 3 Ecouille
- 4 Air comprimé
- 5 Moteur de déplacement vertical
- 6 Vérin du gouvernail
- 7 Ballast principal
- 8 Ballasts
- 9 Sphères à air
- 10 Mousse de plastique
- 11 Habitacle

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE L'ALVIN

Équipage: 2 ou 3 opérateurs.
 Profondeur normale de travail: 2 000 m.
 Dimensions: longueur 6,60 m; largeur 2,40 m; hauteur 4 m.
 Vitesse maximum: 2,8 nœuds; vitesse de croisière: 2 nœuds.
 Autonomie à 1,75 nœuds: 7-8 heures.
 Autonomie du système de subsistance de l'équipage: supérieure à 66 hommes-heures.
 Nombre de hublots: 4 de 12,5 cm de diamètre, 1 de 5 cm de diamètre.
 Poids: environ 13,6 t.
 Charge utile: environ 650 kg.
 Capacité totale de la batterie: 36 kWh (3 accumulateurs au plomb, contenus dans l'huile).
 Habitat: sphère de 2,10 m de diamètre extérieur, en acier HY-100 de 3,4 cm d'épaisseur.
 Propulsion: 2 moteurs hydrauliques de 5 ch actionnés par des électropompes noyées dans l'huile; propulsion et direction par hélice arrière sous tuyère avec gouverne verticale incorporée. Deux hélices pivotantes latérales permettent les évolutions obliques, verticales, et même la marche arrière.

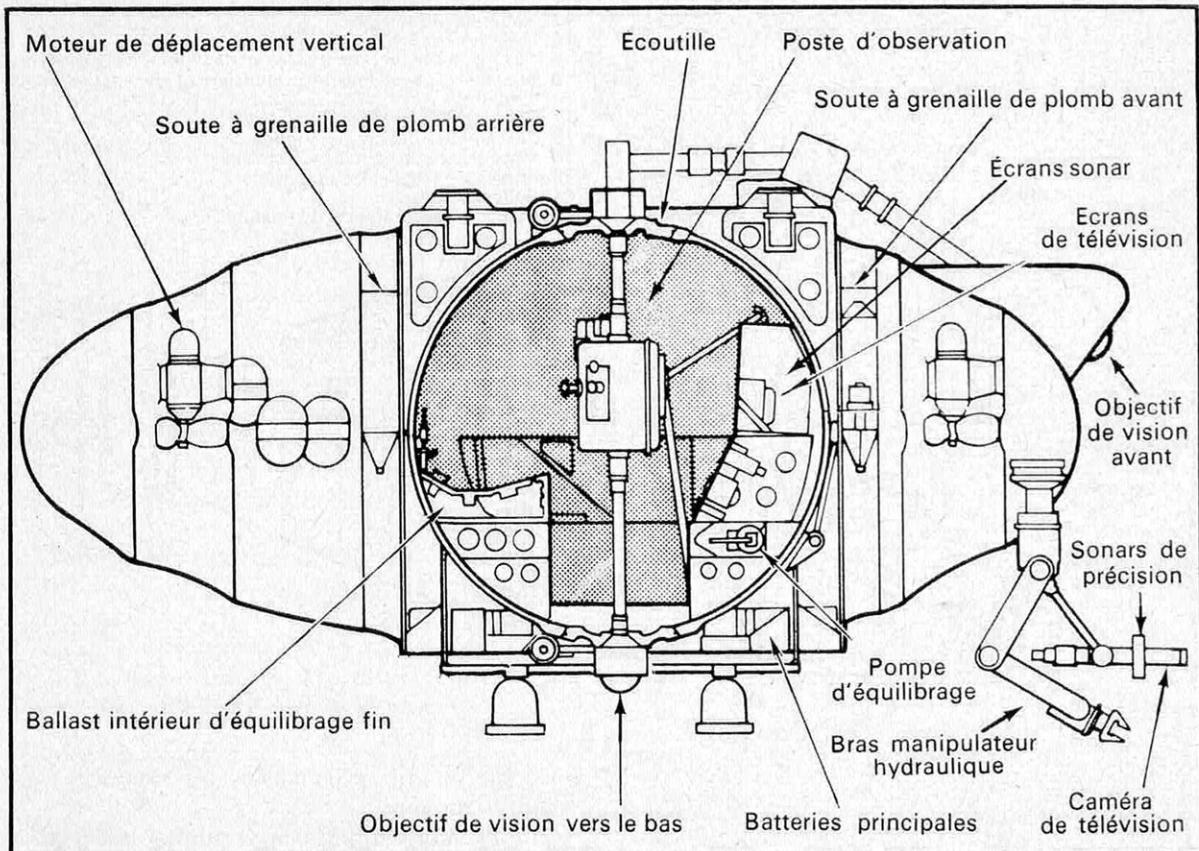
- 12 Batterie équipements scientifiques
- 13 Batteries propulsion
- 14 Cylindre à mercure d'équilibrage
- 15 Réservoir d'huile (compensation de pression des batteries)
- 16 Pompe du système de propulsion et de circulation du mercure
- 17 Cylindre à mercure d'équilibrage
- 18 Passage des câbles électriques
- 19 Découplage des circuits électriques
- 20 Pompe de circulation du pétrole
- 21 Ballast à pétrole
- 22 Dispositif de libération de l'habitacle

vrir un champ plus vaste, ou recourir à la solution suivante.

Celle-ci correspond aux maître-esclave à asservissement. Dans ces machines, la transmission directe est remplacée par une liaison électrique ou électronique (donc beaucoup plus souple). Ces télémanipulateurs réalisent la même copie de mouvements entre la main de l'opérateur et la pince, et restituent la sensation de l'effort transmis, deux qualités primordiales des maître-esclave.

Les télémanipulateurs maître-esclave directs ou assistés sont généralement utilisés par paires (à poignées équivalentes, ou distinguant entre main droite et main gauche), cet ensemble constituant un poste de travail. Ce sont des outils bien au point, presque « classiques » maintenant, et répandus à plusieurs milliers d'exemplaires dans le monde. Les maître-esclave à asservissement paraissent les plus intéressants et les plus riches de développements futurs, mais leur emploi est freiné par leur grande complexité, qui les rend fragiles, et par des coûts actuellement nettement plus importants que les maître-esclave mécaniques. Seuls quelques prototypes ont été réalisés.

● **Manipulateurs télécommandés.** Par leurs moyens de commande, ces télémanipulateurs s'apparentent aux engins de manutention utilisant des leviers ou des boutons. Ils ne copient pas directement les mouvements d'une main, mais produisent les combinaisons de mouvements élémentaires qui leur sont demandés sur le clavier de commande.



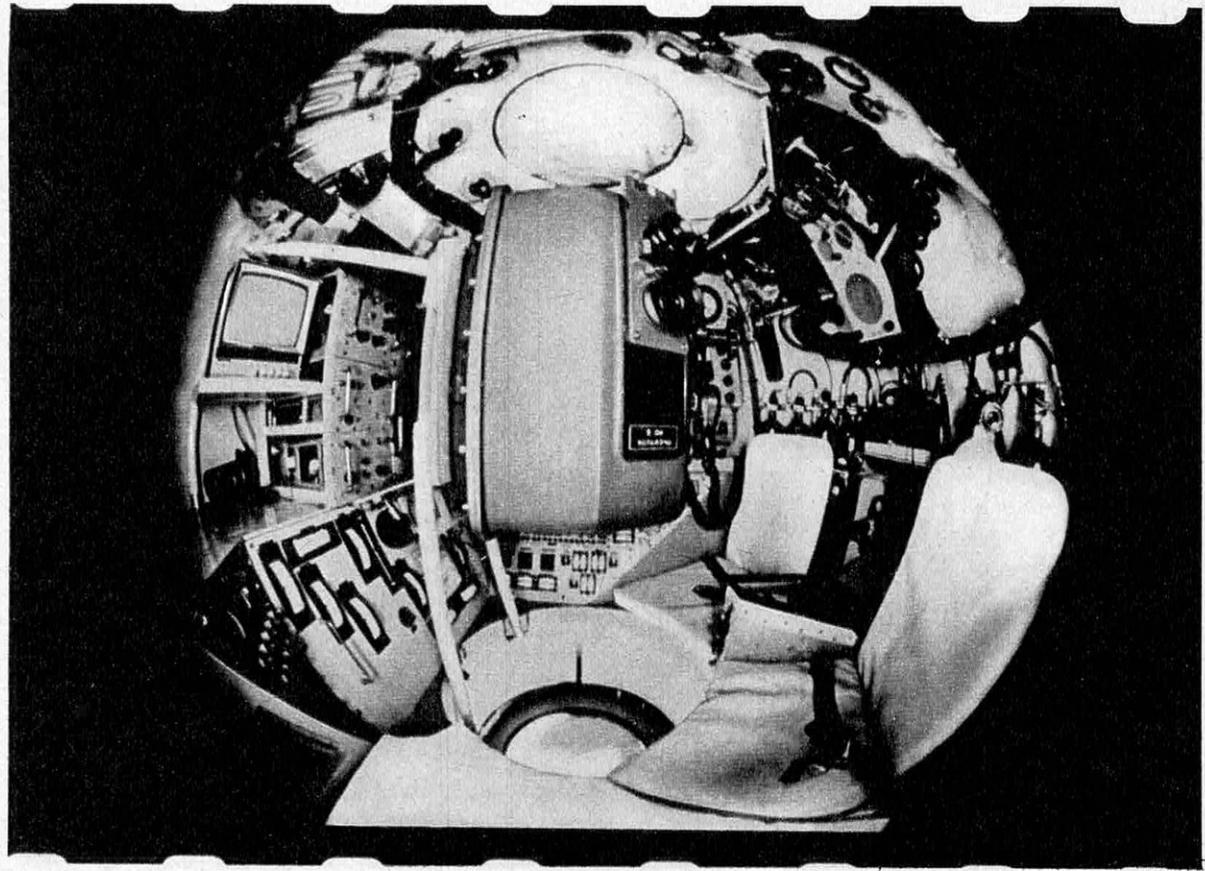
Ils sont constitués essentiellement par un seul bras mécanique articulé ayant sept mouvements ou plus, en incluant les mouvements du support sur lequel ils sont montés. Chaque mouvement du bras est généralement contrôlé par un moteur électrique (manipulateurs électromécaniques à moteurs logés dans le bras ou reportés en tête) ou par un fluide (manipulateurs pneumatiques ou hydrauliques). Ces télémanipulateurs sont généralement dits lourds, parce que susceptibles de manipuler de fortes charges, par opposition aux télémanipulateurs légers du type maître-esclave qui cherchent essentiellement à reproduire les capacités de manipulation humaine. A de rares exceptions près, la catégorie des manipulateurs télécommandés recoupe de peu, pour les plus faibles capacités de manipulation (jusqu'à une ou quelques dizaines de kilogrammes), les plus forts manipulateurs maître-esclave, mais peuvent aller jusqu'à des capacités de plusieurs centaines de kilogrammes ou de l'ordre de la tonne. Entre les télémanipulateurs maître-esclave et télécommandés, les différences sont importantes. Les maître-esclave ont deux bras (le bras maître et le bras esclave), alors que les manipulateurs télécommandés n'en ont qu'un. Les divers mouvements du maître-esclave sont transmis par câbles et rubans (condui-

Le DOWB (Deep Ocean Work Boat, de la division AC Electronics de General Motors, a effectué sa première plongée en juillet dernier. L'habitacle est situé dans le cylindre central, et un système optique très évolutif met l'équipage en communication avec l'extérieur.

sant à ce qu'on appelle une « algèbre » des fils, comme pour les marionnettes...), ce qui permet le « retour de sensibilité », caractéristique extrêmement importante. S'il n'est pas indispensable, en effet, pour manipuler un objet, de le voir, il est surtout utile de le sentir par le toucher. Le manque de sensibilité est le plus gros inconvénient des manipulateurs télécommandés, encore que certains dispositifs utilisent des capteurs de pression ou des jauge de contrainte.

LES TÉLÉMANIPULATEURS A L'OUVRAGE DANS LE MILIEU SOUS-MARIN

Comment l'exploitation sous-marine a-t-elle mis à profit l'expérience accumulée en télémanipulation au cours des quelque vingt à vingt-cinq dernières années ? Il ne s'agit pas



ici de milliers d'appareils comme dans l'industrie nucléaire, mais à peine de quelques dizaines d'unités prototypes. Certaines ne méritent d'ailleurs pas le nom de télémanipulateurs, puisque n'ayant pas le nombre minimal requis de degrés de liberté ; ce sont en fait des « pinces » de manipulation.

La première observation est que toutes les réalisations connues en télémanipulation sous-marine sont du type télécommandé, soit électromécanique, soit hydraulique, ceci pour des raisons essentiellement technologiques. On voit mal en particulier les passages de coques (hantise des sous-mariniers !) permettant les transmissions par câbles ou rubans des divers mouvements d'un télémanipulateur maître-esclave. Avec un appareil télécommandé, on peut se limiter à la traversée de coque par des câbles électriques, la source d'énergie pouvant être extérieure.

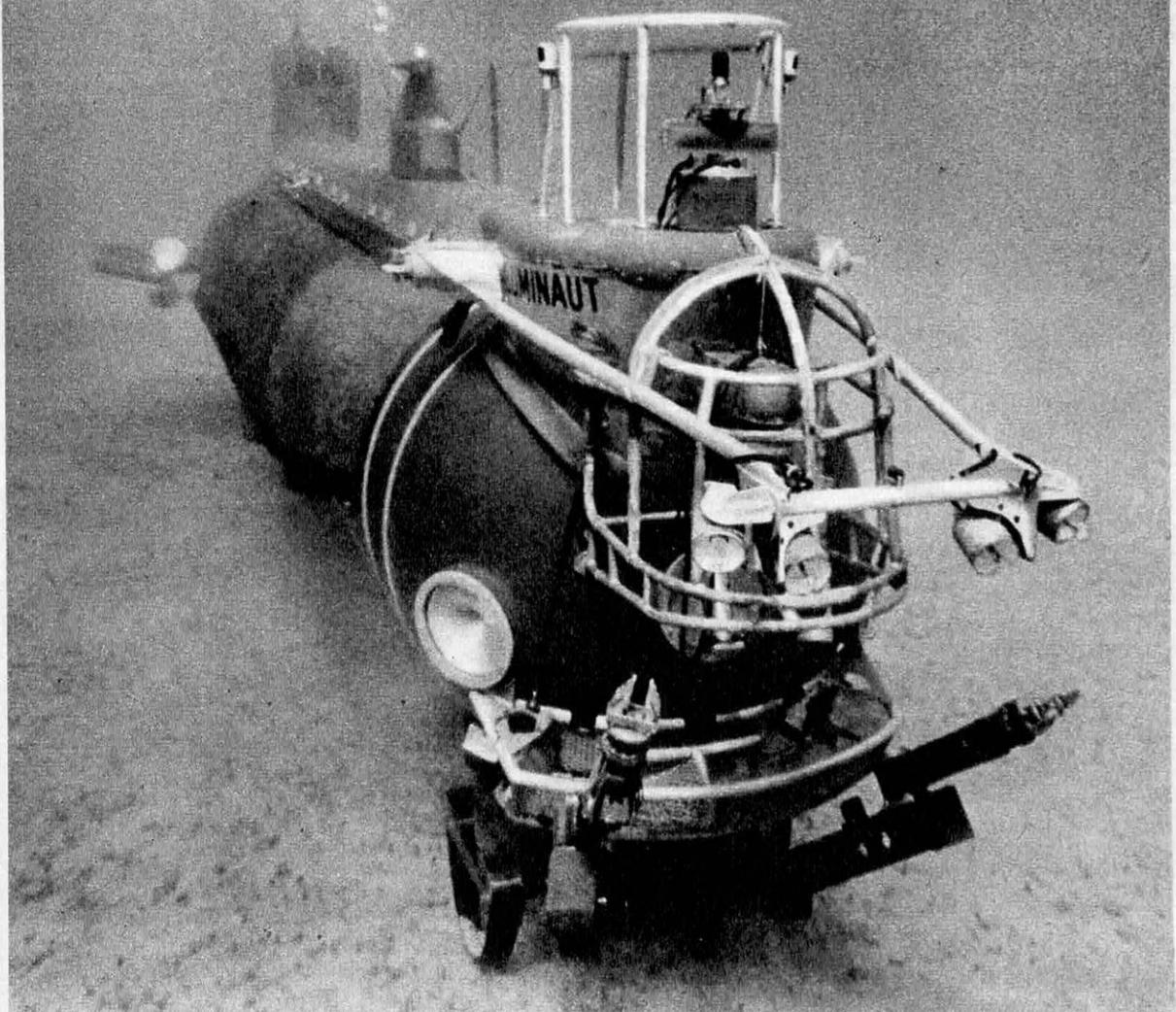
Une autre différence importante est qu'une certaine complexité des manipulateurs nucléaires est liée aux impératifs de décontamination ou d'entretien en zone contaminée. Dans le domaine sous-marin, l'entretien se fait directement, le plus souvent quand l'appareil est sorti de l'eau, et la conception en est simplifiée d'autant. Il faut par contre tenir compte des pressions croissant avec la profondeur, ce qui est assez facile en télémani-

Le poste d'observation occupe la partie centrale de l'habitacle du DOWB.

Des tubes de relais optiques permettent la vision au-dessus (ou vers l'avant) et au-dessous de l'engin, par l'intermédiaire d'objectifs à grande ouverture. L'habitacle comporte également écrans de télévision en circuit fermé, écrans sonar, etc.

pulation hydraulique avec des vérins, mais pose certains problèmes aux télémanipulateurs électromécaniques : moteurs noyés dans l'huile, dispositifs de compensation pour les variations de pression, etc.

Une autre différence est liée au mode de montage ou de fixation du bras de télémanipulation sur l'engin porteur, sous-marin, bathyscaphe ou robot. Sur un engin sous-marin, ce montage se fera généralement par rapport à un point fixe. La mobilité propre de l'engin restitue certains degrés de liberté qu'on semblait perdre en se privant d'un chariot mobile sur pont ou sur colonne, comme dans les montages nucléaires. Cette mobilité a d'ailleurs son revers, car l'engin n'est pratiquement jamais complètement immobile, ce qui impose un mode de travail particulier. Par ailleurs, le dispositif de fixation du télémanipulateur doit si possible être doté d'un système qui en permette le largage, au cas



où le bras viendrait à être coincé ou prisonnier. De tels systèmes de largage ont d'ailleurs, accidentellement, provoqué la perte de nombreux télémanipulateurs sous-marins.

Il est encore trop tôt pour conclure sur l'emploi de cette première génération de télémanipulateurs sous-marins, avec lesquels n'a pas encore été accumulée une expérience suffisante. D'autant plus que d'assez nombreux sous-marins scientifiques se sont vus dotés d'un ou de deux télémanipulateurs « à tout faire » sans que des missions précises leur aient été préalablement spécifiées. Le manipulateur est alors destiné à la prise d'échantillons ou à certains travaux pour lesquels il n'a pas été optimisé.

Une remarquable exception est le système adopté pour le *Beaver*, de North American Aviation-Rockwell, qui fut construit après une analyse détaillée de tout un ensemble de tâches liées à l'exploitation pétrolière *off-shore* à des profondeurs croissantes sur le plateau continental.

On ne peut davantage conclure sur le meilleur type de manipulateur sous-marin, hydraulique ou électromécanique, tous deux

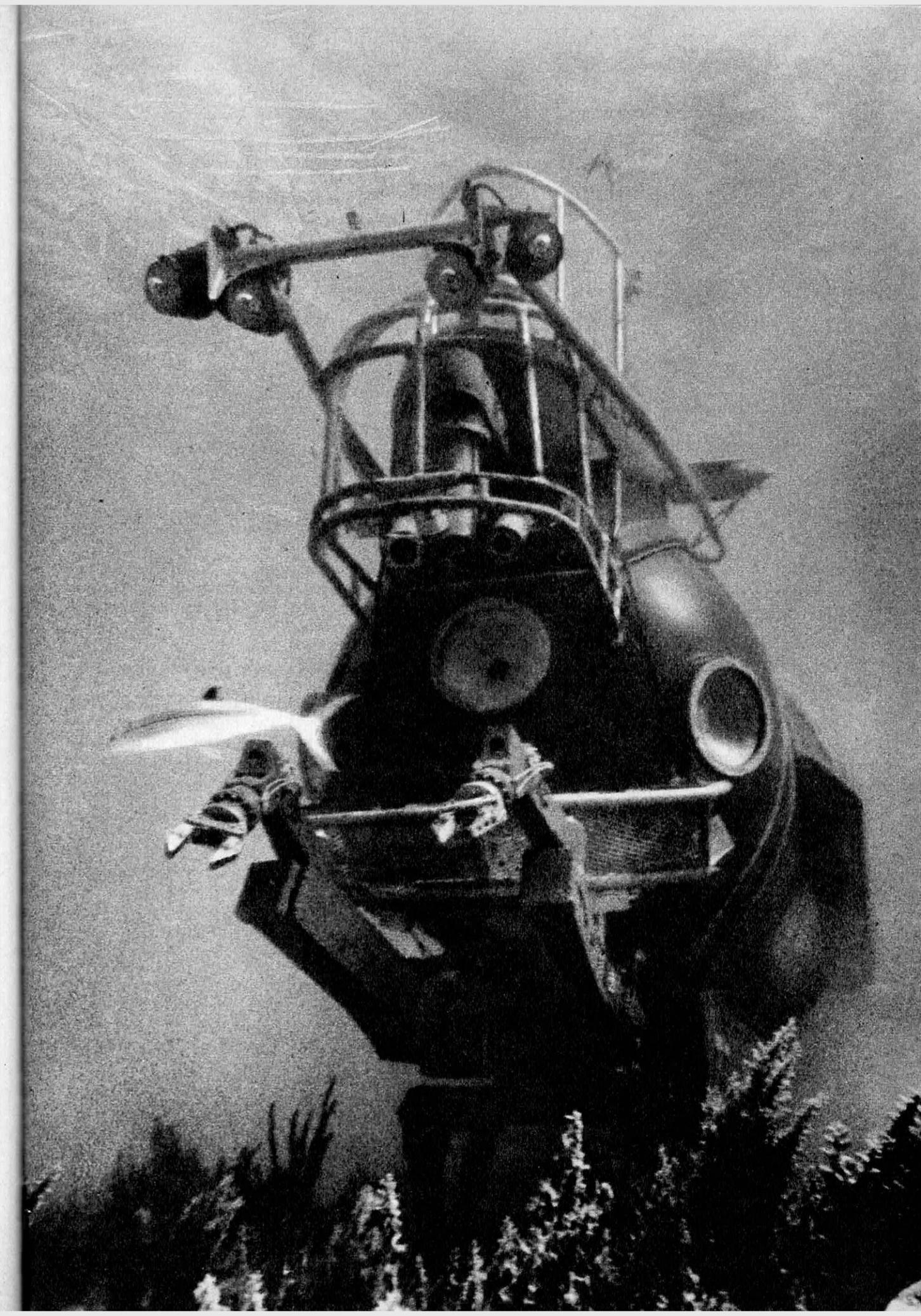
*L'Aluminaut, des Reynolds Metal Co,
est un engin
de taille importante
(longueur 17 m, poids 76 tonnes).*

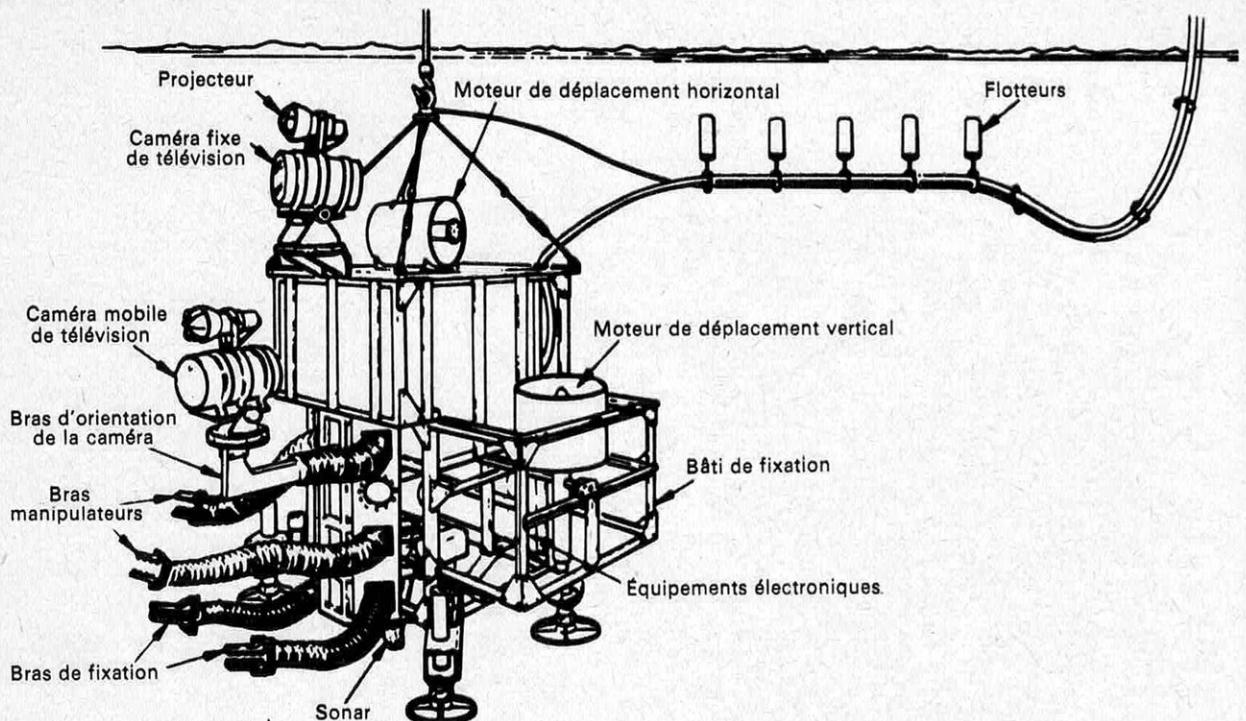
*Il est conçu pour des profondeurs
de l'ordre de 5 000 mètres
avec un équipage de six personnes.
Son autonomie en immersion
avec trois personnes à bord
atteint 30 heures.*

*Il peut se déplacer
sur les fonds
grâce à des patins.*

*On note sur ces photographies,
à l'avant, les puissants
manipulateurs, caméras
de télévision, système
complexe d'éclairage,
et la corbeille à échantillons
(derrière les bras manipulateurs).*

*L'Aluminaut a participé
à une campagne de
prospection minière sous-marine
au large de la côte est des U.S.A.,
sur le
Blake Plateau.*





L'Unimo, construit par Hughes Aircraft pour la Shell

(pour l'entretien des télés de production immergées)

entre dans la catégorie des robots sous-marins non spécialisés, capables d'exécuter des missions variées grâce à des bras manipulateurs complétés de bras d'ancre.

Ses propulseurs lui confèrent une certaine motilité.

Il est contrôlé depuis un navire de surface par l'intermédiaire d'un « cordon ombilical » visible sur la droite de l'engin, qui transmet en particulier les signaux sonar et de télévision.

ayant été expérimentés avec succès, tous deux ayant des partisans. Tout au plus peut-on dire que l'hydraulique permet de manipuler des charges plus importantes, et semble relativement plus simple, mais que l'électromécanique permet, entre autres, une rotation continue du poignet dans les deux sens, mouvement extrêmement pratique.

Les manipulateurs télécommandés, de leur principe même, peuvent être programmés et couplés à un calculateur. Jusqu'à présent, ceci n'a pas donné lieu à des applications importantes, mais on peut envisager de pouvoir ainsi effectuer le changement ra-

pide et automatique de l'outil terminal du bras : pince, cisaille, marteau hydraulique, scie, clé à choc, etc. sur le chantier sous-marin même.

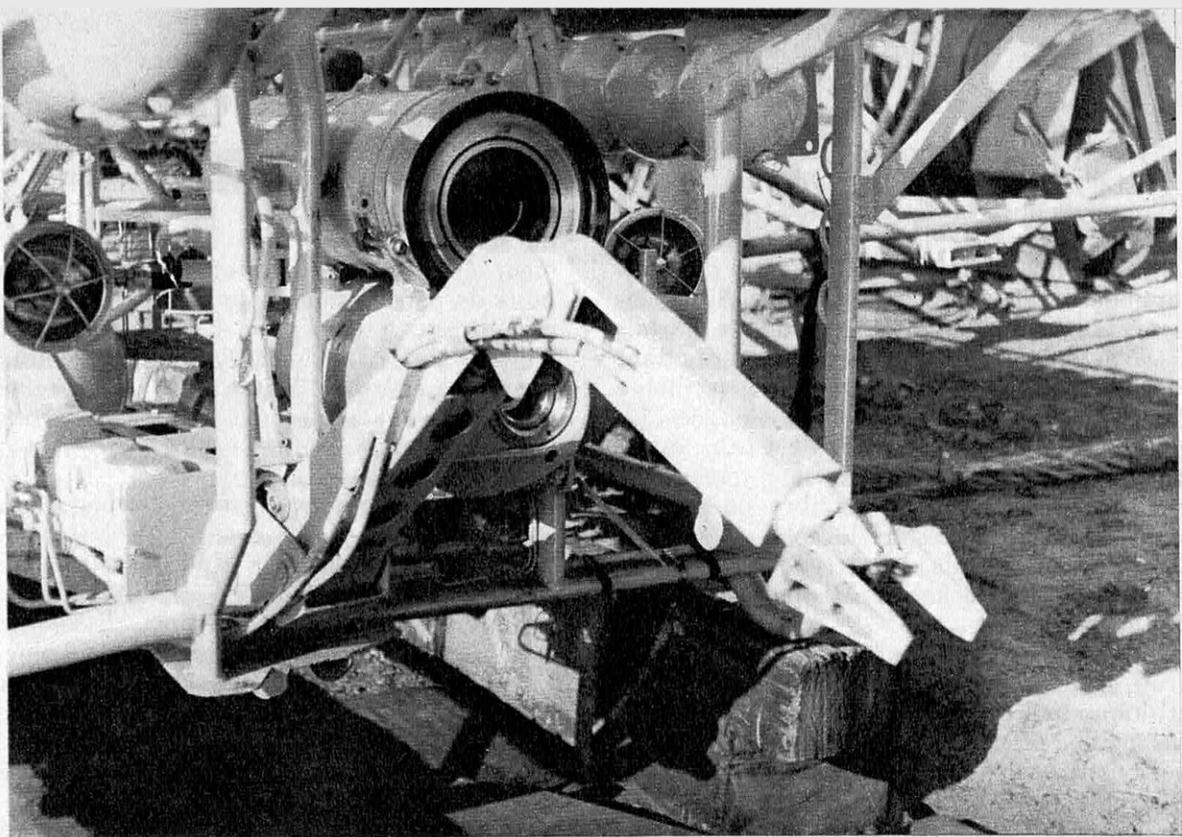
LES SOUS-MARINS D'INTERVENTION

Pour pouvoir agir et intervenir efficacement, les sous-marins d'intervention ne doivent pas être trop importants. Il semble qu'une taille moyenne correspondant à un équipage de deux à quatre hommes soit un compromis attrayant.

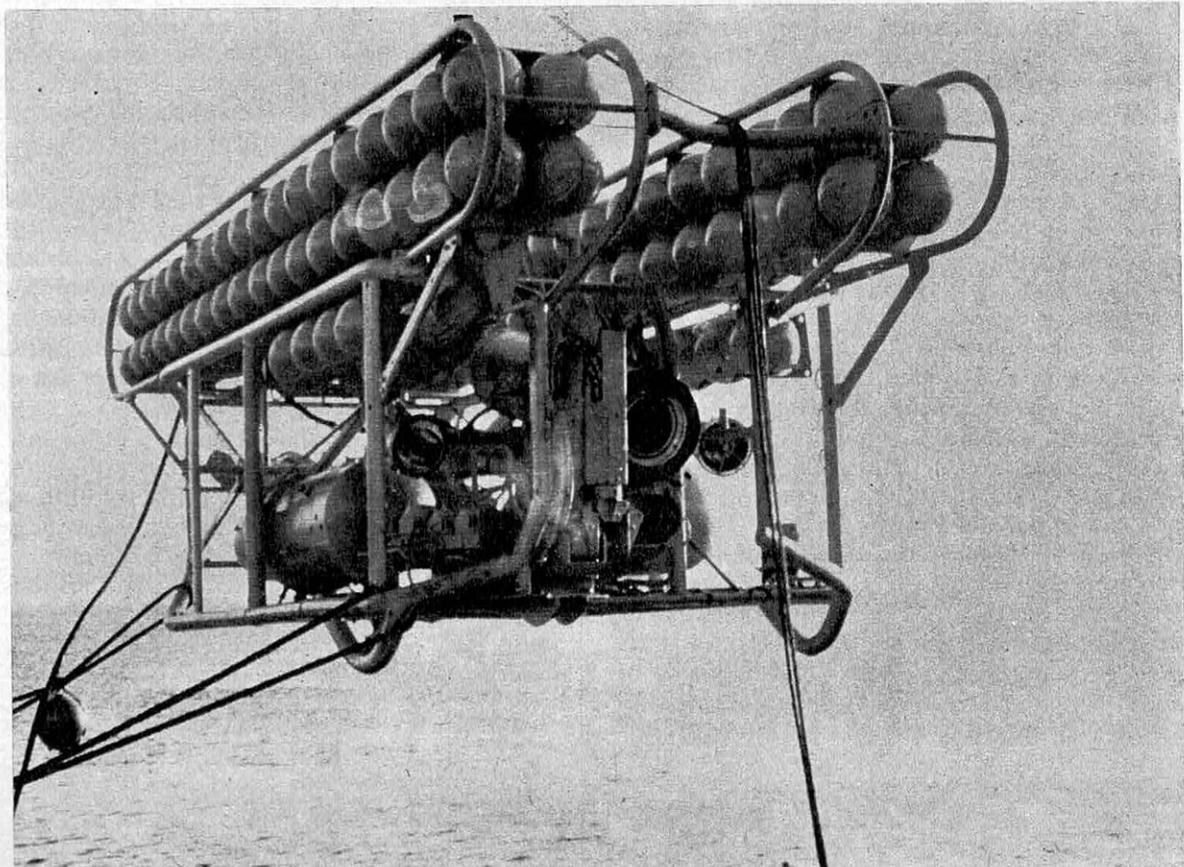
A titre d'illustration, nous rappelons (tableau page 85) les caractéristiques de l'*Alvin*, un des premiers sous-marins d'intervention (qui a malencontreusement sombré il y a quelques mois alors qu'il était en remorquage).

La taille volontairement limitée de ce type d'engin conduit à une autonomie de l'ordre de quelques heures. On doit obligatoirement recourir à un navire de surface pour amener le petit sous-marin plus ou moins à la verticale de son lieu de mission ; sur ce navire sont installées toutes les facilités nécessaires à la préparation et au renouvellement des missions, à l'entretien et aux réparations du véhicule. Il serait plus juste de parler, non d'un sous-marin, mais d'un système sous-marin-navire de service.

On peut considérer l'*Alvin* comme la tête de file d'une génération de sous-marins scientifiques, équipés généralement de un ou deux télémanipulateurs, tels que l'*Asherah*, le *Beaver*, dont nous avons déjà parlé, l'*Autec*,



Voisin du CURV américain qui conquit la célébrité en repêchant la bombe H perdue au large de Palomares, le Télénaut de l'Institut Français du Pétrole est, en plongée, relié au navire de surface par un câble multiconducteur. La propulsion horizontale et verticale est assurée par trois moteurs hydrauliques. Le détail de la partie avant montre la pince articulée de manipulation, les caméras de cinéma et de télévision, etc. Le faible nombre de degrés de liberté de la pince est compensé par la grande manœuvrabilité de l'engin lui-même.



etc. Ces petits sous-marins sont, en fait, des métis d'*Alvin* et de soucoupe plongeante. On peut citer aussi le *Star III* de General Dynamics, successeur du *Star II* de la même société, ou les *Deepstar 4000* et *2000* de Westinghouse. Pour doter ces engins du maximum de possibilités, on leur intègre parfois un compartiment dit « humide » permettant d'emmener des plongeurs, selon un principe analogue à celui des tourelles de plongées. La chambre « humide » permet de garder éventuellement les plongeurs en compression, ou de fonctionner comme chambre de décompression. Un des engins les plus récents et les plus intéressants de ce type est le *Deep Quest*, de la Lockheed Missile and Space Company.

Nous mentionnerons enfin l'*Aluminaut*, construit à titre expérimental avec une coque d'aluminium par General Dynamics pour Reynolds Metal Company. C'est un véritable sous-marin, capable de descendre jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 5000 m. Les postes de travail situés à l'avant comportent, entre autres, deux télémanipulateurs hydrauliques de grande puissance.

ROBOTS SOUS-MARINS A TOUT FAIRE

Il existe dans l'industrie nucléaire des « robots » capables d'effectuer les interventions les plus diverses, et constitués par un petit chariot à chenille portant une colonne télescopique sur laquelle sont montés un manipulateur télécommandé et deux caméras de télévision orientables. Curieusement, un des premiers télémanipulateurs sous-marins (l'autre ayant été monté à titre expérimental sur le bathyscaphe *Trieste* de la Marine américaine) a été essayé sur un chariot chenillé assez semblable au petit véhicule PaR-1 mis au point pour l'industrie nucléaire. Il s'agit du RUM (*Remote Underwater Manipulator*), construit d'ailleurs par la même société. Ce petit véhicule à chenilles, alimenté par câble, est capable de se mouvoir sur les fonds sous-marins.

Comme nous l'avons dit plus haut, un engin robot n'a plus de contrainte de taille, puisqu'il n'a pas à abriter d'équipage. Il peut être mieux calculé en fonction des équipements nécessaires à sa mission, entre autres les bras de télémanipulation, complétés éventuellement par des bras de fixation d'ancre. Un premier exemple de robot à faible mobilité est l'*Unumo*, construit pour la Shell par Hughes Aircraft, aux Etats-Unis. C'est essentiellement un bâti sur lequel sont fixés deux bras de manipulation, deux bras de fixation, deux caméras de télévision (dont l'une elle-même sur bras d'orientation) et des propul-

seurs de positionnement. L'ensemble est relié par un câble avec tambour intermédiaire à un tableau de commande situé sur le navire de service. Cet équipement a été spécialement étudié pour le service d'une tête de puits de pétrole sous-marine. C'est une expérience fort intéressante, mais les résultats d'exploitation sont peu connus, vraisemblablement à cause de l'importance commerciale qu'ils peuvent avoir pour les futures installations pétrolières *off-shore* sur le plateau continental ou au-delà.

Nous mentionnerons avant de conclure la réalisation très intéressante de l'Institut Français du Pétrole. Véritable robot sous-marin, le *Télénaut* est destiné à l'observation et à l'intervention légère non spécialisée. Son outil de manipulation est en fait une pince articulée actionnée par des vérins hydrauliques à laquelle peuvent s'adapter des outils divers (pinces, cisailles, godets de prélèvement, etc.) permettant d'accomplir une grande variété de tâches simples.

Au cours de ses diverses campagnes, le *Télénaut* a permis d'accumuler une expérience déjà importante, fort utile pour ses éventuels successeurs. Ceux-ci seront vraisemblablement dotés d'un dispositif de vision lointaine, d'un système de repérage, et surtout de deux bras de télémanipulation au lieu d'un seul, ce qui fera plus que doubler les possibilités d'intervention.

Si on compare le nombre de robots sous-marins à celui des sous-marins habités, dont nous n'avons présenté que quelques exemples, on peut être frappé d'une certaine disproportion. Nous ne croyons pas cependant qu'il faille y voir un choix définitif. Nous croyons plutôt qu'il y a là un simple phénomène historique. On remarque même que de nombreux sous-marins scientifiques dotés de télémanipulateurs en étaient initialement dépourvus ; dans leur conception initiale, de nombreux engins étaient destinés à l'exploration (témoins les premières versions des bathyscaphes) et non à l'intervention ni même à la simple prise d'échantillons. L'orientation vers l'exploitation des ressources océanographiques a conduit à titre expérimental à doter les divers engins de télémanipulateurs.

L'opposition que l'on fait souvent entre sous-marins et robots, ces derniers davantage destinés à se substituer à l'homme, n'est d'ailleurs pas pleinement convaincante. Le temps viendra peut-être où un *Deep Quest*, un *Argyronète*, conduiront sur le chantier sous-marin, non plus une équipe de plongeurs, mais une équipe de... « télénauts », commandés à partir du sous-marin de service.

Michel GRENON

LA PÊCHE MARITIME

Il y a peu de temps encore, on considérait que les ressources de la mer étaient pratiquement illimitées. C'était une question de rapport entre nos moyens d'action et la capacité de reconstitution des espèces pêchées. Or, on constate que bien des espèces exploitées, du hareng au homard, en passant par le modeste et précieux butin du pêcheur à pied grattant la grève, se renouvellent à un rythme inférieur au taux de prélèvement. Prélèvement d'adultes dont le sort naturel est de mourir, certes, après avoir abondamment procréé, mais aussi prélèvement d'immatures d'un faible rendement économique et, malheureusement, destruction de frayères bouleversées aveuglément à la côte comme au large.

Notre bilan d'exploitation d'une foule d'espèces commercialisées est un dossier à charge. Le pêcheur exploitant, à la différence de l'agriculteur exploitant, ne conçoit pas encore qu'un stock de poissons est une matière vivante qui croît et se reproduit dans un secteur donné, comme le fait une forêt naturelle.

La pêche dans le monde

Selon leur situation, leur vocation économique, ou certains facteurs particuliers, les pays tirent un plus ou moins grand profit de la mer.

Le Pérou, premier pays pour les quantités pêchées, a pris en 1967 plus de 10 millions de tonnes de poissons, constituées en majorité d'anchois destinés à la fabrication de farines de poisson, dont les cours instables ont entraîné dans leur chute, l'année suivante, les tonnages mis à terre. Ces anchois sont d'ailleurs utilisés indirectement sous forme de guano, excrément des cormorans qui, par nuées, s'en nourrissent, de sorte que les autorités péruviennes évitent de décimer les bancs de poissons pour ménager la production du guano !

Avec 7,8 millions de tonnes, le Japon prend la seconde place. La pêche en mer japonaise, véritable championne mondiale, laborieuse et très diversifiée, a pour objectif essentiel la nourriture des hommes, et une présence physique et économique sur les rivages du monde : implantation dans divers pays maritimes de bases complexes où s'effectuent transferts de cargaisons et ravitaillements, où sont installées des conserveries et même des stations

de repos pour les équipages. Innovateur en outre dans la pisciculture marine, le Japon produit des espèces recherchées.

Vient ensuite l'U.R.S.S., avec 5,8 millions de tonnes. Ce pays fait un effort technique et scientifique gigantesque pour sa flotte de pêche comme pour sa flotte marchande et sa flotte militaire. Au cours des quinze dernières années, une exploitation scientifique et technique très développée, des moyens puissants, une prospection systématique démontrent son optimisme pour une croissance continue de son activité halieutique.

Après la Chine continentale, dont la production est estimée à quelque 5 millions de tonnes, la Norvège a produit 3,2 millions de tonnes dont le hareng représentait la plus grande partie. Les Etats-Unis, très actifs malgré la disposition massive de leur territoire, ont produit 2,4 millions de tonnes. Mentionnons encore l'Espagne (1,3 million de tonnes) où certaines grosses entreprises, très intégrées verticalement, comptent parmi les industries rationalisées de notre époque.

Le tableau suivant donne les principaux chiffres de production des pays européens.

Pays non membres de la C.E.E.	Production en tonnes
Norvège	3 200 000
Danemark	1 700 000
Espagne	1 430 000
Royaume-Uni	1 000 000
Islande	896 000
Suède	338 300

Pays membres de la C.E.E.	Production en tonnes
France	820 000
République Fédérale Allemande	661 500
Italie	337 300
Pays-Bas	314 600
Belgique	63 900

La plus grosse part des productions mondiales correspond aux **clupéidés** (harengs, anchois, sardines...). Ils représentent plus de 40 % des prises de poisson de toutes espèces. Les **gadidés** (morues, merlus, églefins...) viennent ensuite. Les **thonidés** (thons, germons, bonites), par contre, ne constituent encore,

Port	Valeur des apports en millions de F
Boulogne	140,8
Concarneau	117,6
Lorient	96,0
La Rochelle	64,8
Fécamp	56,2
Douarnenez	44,0
Les Sables	24,1
Bordeaux	23,5
St-Jean-de-Luz	23,2
Le Guilvinec	21,1
Dieppe	18,7

malgré les succès des Japonais, qu'une faible partie des prises, mais cette situation pourrait évoluer assez rapidement.

Si l'on considère que l'Atlantique nord, où la pêche est d'ailleurs trop intensive, fournit 25 % des prises, et l'océan Indien, aux rivages asiatiques surpeuplés, 6 % seulement, on voit que les ressources des mers sont assez mal utilisées.

La pêche en France

Dix-septième au classement mondial pour le tonnage, la France est sixième pour la valeur des produits mis à terre. A l'échelon européen, elle se trouve la deuxième au chiffre d'affaires pour les ventes au débarquement. Cette valeur élevée tient au fait que notre production est uniquement destinée à la consommation humaine. Le tableau en haut de page indique le classement des ports français. L'activité se décompose en trois grandes branches que nous examinerons rapidement.

La grande pêche. Les campagnes de ces pêches lointaines durent plusieurs mois. La pêche à la morue est la plus connue chez nous, où elle se pratiquait déjà au 18^e siècle. Elle s'est beaucoup transformée depuis lors. La capture du poisson ne s'effectue plus à bord de « doris », avec de longues lignes de fond. Le poisson est maintenant capturé par de grands chalutiers saleurs ou congélateurs pêchant par l'arrière, sur lesquels les hommes travaillent dans des conditions complètement transformées. Ces navires opèrent à distance des côtes dans l'Atlantique nord, depuis les parages de Mourmansk jusqu'à la côte ouest du Groenland. Des crustacés font aussi l'objet de la grande pêche : les langoustes vertes, roses, pêchées par les Camarettois ; les langoustes brunes, dites « du Cap », capturées au casier autour des îles australes françaises dans le sud de l'océan Indien. De Dakar à Pointe-Noire, les crevettes intertropicales sont depuis peu l'objet de chalutages fructueux par de petits navires partis d'Etel, près de Lorient.

tueux par de petits navires partis d'Etel, près de Lorient.

La pêche hauturière. Elle envoie ses bateaux sur le plateau continental et ses accores, jusqu'à 800 m de profondeur, durant des « marées » de deux semaines. Le chalut est l'engin principal que les pêcheurs français traînent sur les fonds depuis le Portugal jusqu'au cap Nord. Un nouveau type de chalut a tendance à remplacer en partie le chalut de fonds : le chalut pélagique, dont la mise au point a été très laborieuse et qui travaille en pleine eau. Sa profondeur d'immersion peut être déterminée par des systèmes de détection fixés sur l'engin afin de préciser sa situation entre le fond et la surface, et par rapport aux bancs de poissons détectés.

La pêche côtière. Ce type, le plus ancien, a donné naissance à de multiples engins, autant que d'espèces capturées : chaluts, casiers, dragues, lignes de fonds, filets de fonds, sennes... Ces attirails capturent le poisson des vacances, frais, appétissant, et aussi nos « fruits de mer » (coquillages, langoustes, oursins, crabes, homards...). La côte est aussi le terrain d'élection de la conchyliculture. Très demandées, les moules et les huîtres sont susceptibles d'une culture développée, dans des parcs en eaux littorales peu profondes.

AGENCE TASS



Ambiance, dureté des conditions de travail étroitement soumises

aux éléments,

tout concourt à faire

de la pêche hauturière,

surtout dans ses formes

les plus traditionnelles,

un monde à part.

En page de droite,

un bateau soviétique

opérant au sein d'une flottille

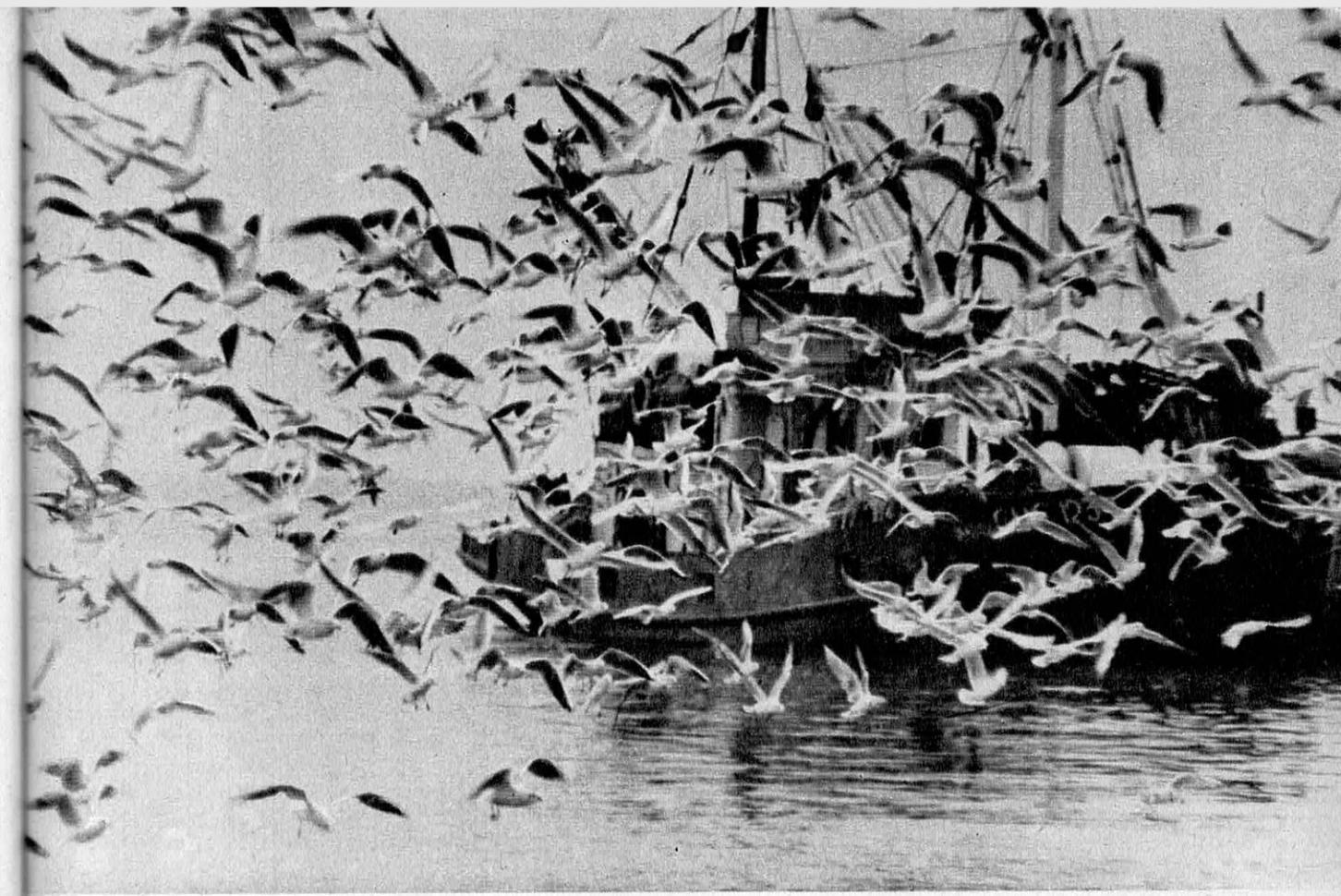
dans la zone mer Noire-

mer d'Azov.

Ci-dessus, manœuvre

du chalut en mer

de Barents.



Couvrant d'importantes surfaces immersées, près de la côte, de l'extrême de la Bretagne à la Normandie, les algues sont encore exploitées de façon artisanale, comme dans les croquis de Mathurin Meheut. L'avenir est cependant au moissonnage mécanique à partir de bateaux spécialement aménagés. Une large extension peut être prévue en relation avec l'utilisation croissante de certains colloïdes extraits de ces végétaux.

La vie des hommes

Durant nos vacances près d'un port de pêche, nous ne pouvons comprendre vraiment ce qu'est un pêcheur : lié à la mer, vivant avec elle, de même que le montagnard vit dans sa montagne, au rythme des saisons, aux prises avec l'hostilité des éléments. Atavisme et amour du pays natal lui constituent une physionomie souvent taciturne, accusée encore par un métier à part.

Aux yeux des terriens, son lieu de travail est un espace infini où rien n'est fixe, ni l'eau, ni le sol, ni le bateau, ni le poisson. Il n'a pas d'heure régulière pour partir en mer ; seules les communications radio le relient à heures précises avec la terre. Il dort aux moments creux, quand il n'a plus rien d'autre à faire. A terre, ce sont les femmes qui sont les responsables de fait de la vie familiale.

Le plus souvent absents, ayant peu de possibilités de contacts extra-professionnels, les marins restent des travailleurs très spécialisés. Le matelot est un manœuvre dont une faible minorité seulement possède un certificat d'aptitude. Grâce à des cours de perfectionnement, le « patron », quant à lui, a acquis certaines connaissances, en plus d'informations empiriques souvent transmises par de proches parents. C'est à cet homme jaloux de ses secrets que peut être confié un grand chalutier portant 15 ou 20 hommes et valant un demi-milliard d'anciens francs. A la différence de la pêche artisanale, le possesseur ou le gérant d'un navire dit « industriel » demeure à terre. Le patron de pêche est le vrai responsable du bateau, même à quai, entre deux « marées », même si l'armateur est monté à bord.

Varié quant aux engins utilisés, le travail en mer reste toujours marqué par l'emprise des éléments. C'est à la grande pêche que le travail a été organisé en premier, en diminuant la peine des hommes. Mais les marins, gens prudents, voire méfiants, ne sont guère disposés aux innovations, si bien que des aménagements rationnels aux yeux du constructeur du navire peuvent se trouver démontés et mis de côté dès la première sortie. Le bateau peut être un outil moderne par ses organes mécaniques, ses équipements de

détection ou de navigation ; il reste encore une plateforme à peu près indifférenciée pour le tri, l'éviscération, le lavage, le stockage en cale du poisson qui est manipulé chez nous comme à bord des pirogues des tropiques.

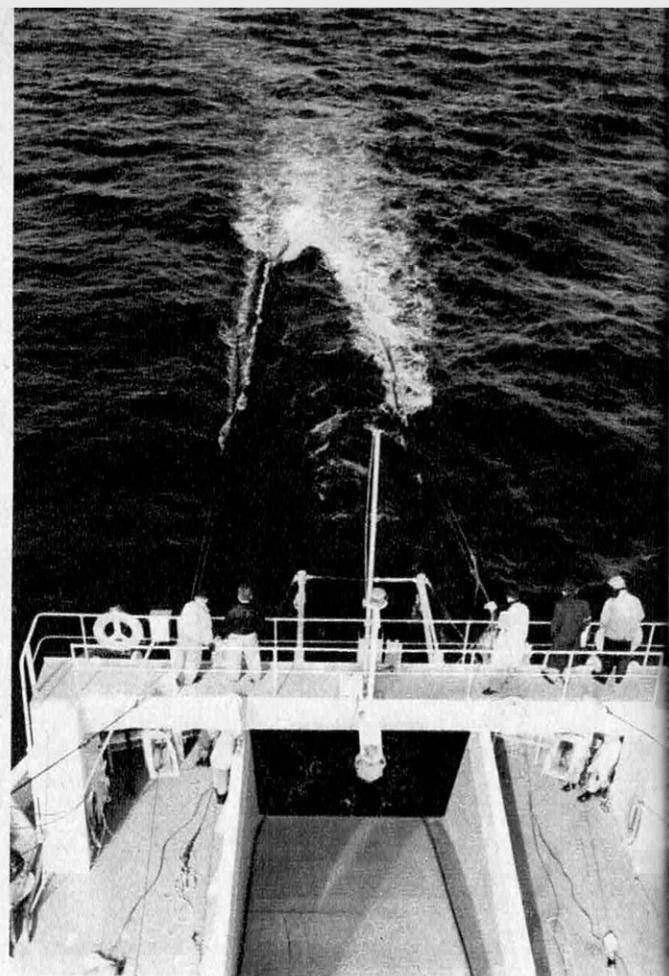
Les matériaux traditionnels et modernes

Les bateaux. Aussi divers que les espèces utilisables, tous les types et toutes les dimensions ont place sur la mer, du chaland des ostréiculteurs au langoustier tropical à vivier, en passant par la barque sardinière à lamparo de Méditerranée. Leurs dimensions et leurs perfectionnements dépendent souvent des moyens financiers des armements. Ainsi le thon germon est pêché à partir de nos ports de Bretagne sud à 1 000 milles au large par une flottille de quelque 500 bateaux de 20 à 30 mètres. Mis en glace, le poisson attend la fin de la « marée » de 3 semaines pour être débarqué à destination de l'usine qui le mettra en conserve. Cette pêche ne rencontrera aucune contre-indication technique à être faite autour d'un navire-usine collectant et traitant les captures.

A l'inverse de pays tels le Japon, l'U.R.S.S. ou la Norvège où, pour des motifs alimentaires, commerciaux, politiques, voire stratégiques, la pêche est placée au rang d'industrie prioritaire, la France n'a pas de grand navire-usine de transformation complète. Nos navires de grande pêche à la morue se limitent à un conditionnement partiel et à l'entreposage du poisson. Au reste, la presque totalité des navires français s'échelonne entre des dimensions réduites (5 à 8 m) et moyennes (40 à 60 m). Armée par une foule d'entreprises familiales ou de petites sociétés, disséminée au long des 3 200 km de nos côtes, cette flotte effectue une pêche polyvalente d'animaux frais ou peu transformés sur des fonds généralement proches dont l'accès nécessite généralement moins de 3 jours de route.

Les engins de pêche. Les filets étalés sur le trottoir à Fréjus ou à Collioure, les casiers empilés frémissant au vent sur la cale de Mogüer, les tuiles chaulées servant à collecter le naissain d'huîtres dans la rivière de la Trinité, ou les lourds panneaux de chalut dressés à la porte d'un hangar boulonnais, tels sont, parmi bien d'autres, quelques-uns des équipements de nos bateaux.

Les zones de pêche et une coutume longuement pratiquée font préférer à nos pêcheurs de hareng le chalut de fond à la senne, im-



mense filet coulissant utilisé par les Norvégiens. Cette senne sert de plus en plus à la capture du thon tropical par nos bateaux basés en Afrique, tandis que les Japonais préfèrent capturer le thon à la ligne flottante de plusieurs dizaines de kilomètres de long, hérissée d'hameçons d'une extrémité à l'autre.

Les équipements électroniques. A la passerelle des unités importantes sont disposés les appareils électroniques qui clignotent en couleur pour faire le point, alors qu'infatigablement des sondeurs à écho font entendre des bip, bip... ou traduisent sur une bande enregistreuse le profil du fond, en quête du poisson qui s'y rassemble. Le radar, quant à lui, sert moins à détecter les obstacles qu'à repérer d'autres navires, en pêche à quelque distance, rassemblés sûrement dans un coin où se font de belles prises. Des cadans, des chiffres, des boutons, tel est le domaine du patron de pêche, d'où il donne des ordres par quelques éclats de voix à destination du pont en contrebas. L'homme de barre silencieux laisse agir le pilote automatique asservi à un gyrocompas, mais il veille nuit et jour par roulement.

L'avenir. Comme dans toute autre activité, les recherches actuelles s'attachent à améliorer et étendre les possibilités de la pêche.

De nouveaux procédés sont étudiés, utilisant en particulier des méthodes physiques ou chimiques (lumière, électricité, son, odeur), agissant sur le poisson pour l'amener à se rassembler. Cela permettra d'éviter dans certains cas l'usage du filet, d'augmenter la productivité des engins actuels de pêche et de réaliser des captures ininterrompues en vue de gagner 30 % du temps nécessité jusqu'ici par la manœuvre. La mise à bord des captures donne lieu à des études de pompes à poisson vidant le fond du chalut au fur et à mesure qu'il s'emplit, ainsi que l'utilisation de fonds de chalut largables. Beaucoup de ces perfectionnements, en cours d'élaboration en U.R.S.S., ont conduit ses bureaux d'études à travailler sur un ensemble de pêche à mise en œuvre automatisée. Cette tâche comprend l'établissement d'un système automatique de mise à l'eau et de relevage du chalut ainsi que la création d'appareils dirigeant automatiquement le navire et son train de pêche vers le banc de poissons détecté.

La pêche à grande profondeur, au delà de 1 000 m, présente de grandes difficultés techniques ; ceci amène à envisager des sous-

marins automatisés opérant sur détection à grande profondeur.

La recherche scientifique a un rôle important à jouer dans l'avenir des pêcheries : prospection de la mer en vue de la découverte de nouvelles pêcheries et de leur estimation. Des travaux sont en cours pour la mise au point d'appareils aéroportés de mesure des caractéristiques du milieu marin. L'avantage d'observations rapides et simultanées sur des aires étendues serait encore augmenté par les possibilités des satellites.

Vers une exploitation réfléchie

Les navires sont des outils au service d'un cerveau qui a conçu leur emploi selon un plan réfléchi. De la largeur du plan dépend l'outillage destiné à le réaliser. Le Japon a un plan, l'U.R.S.S. en a un également. La France n'a pas de plan de pêcherie, ni à l'échelon national, ni à l'échelon de la région ou du port. Rare est le cas même où un armement a un plan de pêche pour ses propres bateaux : le patron fait ce qui lui semble bon. Chacun voudrait bien faire, mais c'est la confusion. On pêche ce qu'on trouve, là où l'on peut, par un travail exténuant à bord qui n'est plus d'un rapport suffisant pour rentabiliser l'armement industriel.

Surexploités, les fonds entourant l'Europe nous livrent des individus qui n'ont pas eu le temps d'effectuer leur pleine croissance. Les jeunes déclimés et le nombre des adultes en régression déjà avancée ne nous promettent pas des lendemains prospères.

La mutation qui s'annonce, résolument engagée dans quelques pays associant leur avenir à la mer, n'y est plus qualifiée de science-fiction. En France, la question suivante reste posée : comment faire vivre des hommes avec les ressources vivantes de la mer ?

A cela, trois réponses :

— Il faut chercher des bancs utilisables par en valeur ce qui subsiste après les exploitations destructrices inconsidérées.

— Il faut chercher des bancs utilisables parmi les espèces pélagiques ou sur des fonds de pêche rentables même éloignés.

— Il faut chercher comment produire certaines espèces dans des zones littorales spécialement aménagées.

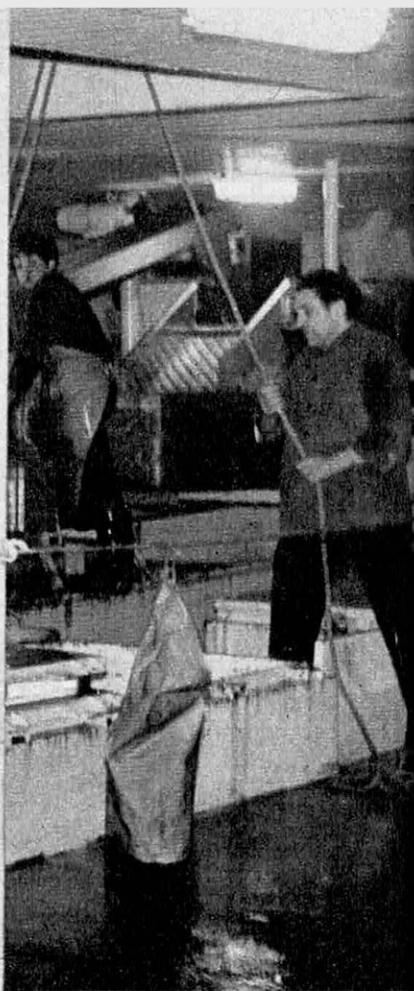
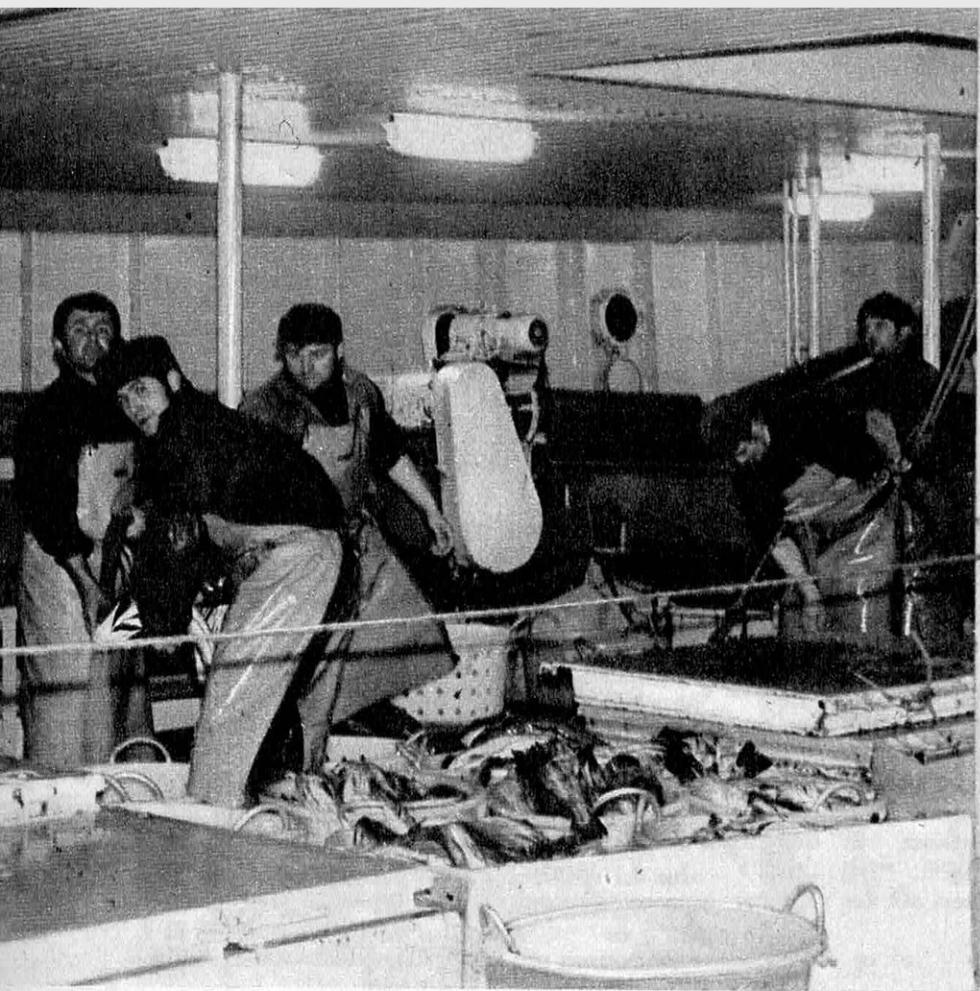
Cette dernière voie nécessite beaucoup de travaux préliminaires, d'études et de tâtonnements. Elle concerne l'engrangement d'espèces telle que le pratique la conchyliculture actuellement prospère, dans des piscicultures marines établies au rivage. Elle concerne la production d'alevins en vue de repeupler la côte dans des secteurs comparables de la frange littorale. Elle concerne la con-



Au cours de ces dernières années, le principe du chalutage par l'arrière, sur navires spécialement aménagés, s'est imposé en raison de son meilleur rendement et des conditions de travail moins rudes pour les hommes.

En page de gauche, démonstration de remontée du chalut à bord d'un bâtiment construit au Japon.

Ci-dessus, le « Pierre Vidal », chalutier-congélateur, à rampe arrière lui aussi, construit à La Rochelle.



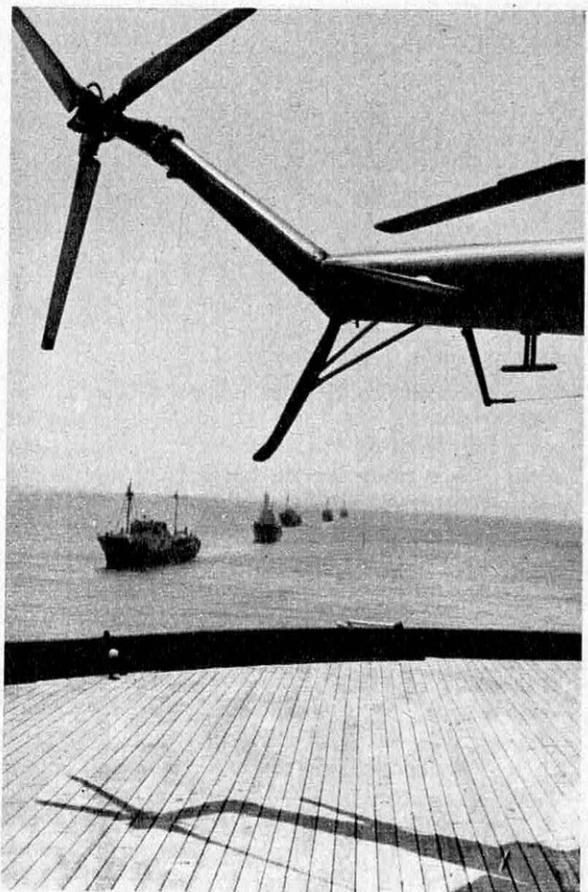
fection d'habitats artificiels pour favoriser certaines captures ou pour enrichir localement des zones stériles.

La pêche en mer proprement dite, à laquelle se rapportent les deux premières voies évoquées, est appelée à réviser ses procédés d'exploitation : d'un stade économique de « cueillette », elle passera progressivement, selon les espèces, à un stade d'exploitation rationnelle. Celle-ci passe d'abord par l'estimation de chaque stock vivant et de la récolte possible sans dégrader le capital producteur.

La capture des espèces pélagiques rencontre des difficultés de localisation : l'établissement de cartes saisonnières des zones de pêche, comparables aux cartes météorologiques, peut fournir des indications inappréciées aux flottes de pêche.

Des plans de pêche pourront ainsi être élaborés, évaluant les tonnages totaux, les tailles à capturer, les lieux de capture pour les divers navires engagés dans une telle entreprise harmonisée. Ils permettront le meilleur rendement, la moindre perte d'énergie, en préservant les chances d'avenir.

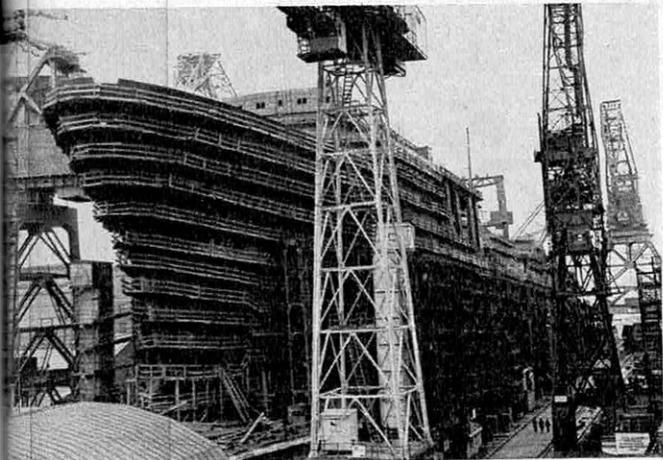
Les Soviétiques opèrent de la sorte, et recourent aux ordinateurs pour centraliser les informations recueillies, établir des plans de pêche, et aller chercher le poisson partout où ils peuvent le capturer. Leurs écoles su-



AGENCE TASS

A côté de trop nombreux bâtiments de conception traditionnelle, certaines unités de grande pêche ont été dotées, dans un souci de rationalisation et d'humanisation du travail, de ponts couverts protégeant l'équipage pendant la manipulation du poisson (photo de gauche). Avec le document de droite, nous voici dans un autre domaine, fort important pour l'avenir de la pêche maritime ; lors d'une croisière-séminaire conduite en novembre dernier en Méditerranée, des spécialistes de diverses nations observent la manœuvre d'un filet pour prélevement de plancton.

périeures de pêche forment annuellement plus de 1 000 spécialistes venant s'ajouter aux 70 000 ingénieurs et techniciens déjà en fonction dans 12 organismes scientifiques et techniques. Au Japon, chaque université des villes du littoral compte une faculté de pêche... Le seul Bureau of Commercial Fisheries des Etats-Unis entretient 19 stations de recherche et d'expérimentation.



La chasse à la baleine a atteint depuis nombre d'années, en divers pays, un stade de rationalisation industrielle. La photo en page de gauche montre une flotte baleinière opérant dans les eaux antarctiques, appuyée par un hélicoptère. La pêche des poissons atteint un développement industriel semblable avec, par exemple, la « base flottante » Vostok, photographiée, ci-dessus, en octobre dernier, aux chantiers de Leningrad. Long de 225 m, déplaçant 43 000 tonnes et alimenté par une flotte de 14 chalutiers, le Vostok produira 300 tonnes de poisson en conserve par jour.

Assurément moins spectaculaire, la vocation halieutique de la France ne peut néanmoins demeurer bien longtemps dans sa réalité actuelle. Depuis plusieurs années est évoquée l'idée d'une Ecole supérieure de pêche qui pourrait former des spécialistes, cadres de recherche, de pêche en mer ou d'entreprises à terre, dont la tâche serait de guider et soutenir l'évolution interne de la pêche dans ses différents aspects.

Déjà, des conventions sur l'« overfishing » ont réglementé le maillage des filets et la taille marchande des poissons de l'Atlantique nord. Bien qu'elles aient un champ d'action limité, de telles réglementations peuvent contribuer à l'élaboration d'une véritable charte internationale de la pêche qui tiendrait compte des données fournies par l'océanographie. Pour les eaux territoriales françaises (jusqu'à 12 milles des côtes), des mesures ont été prises afin de diminuer l'intensité de l'effort de pêche et de permettre une reconstitution des stocks.

Ces dispositions constituent des démarches encore hésitantes vers une mise en exploitation concertée, basée sur l'évaluation de la fertilité biologique des océans pour en tirer le meilleur revenu.

P. GRUA
Chambre de Commerce et d'Industrie
du Morbihan

Si les débuts de l'agriculture se perdent dans la nuit des temps, il est bien certain qu'elle a succédé à une économie de cueillette et de ramassage s'exerçant aux dépens de végétaux existant à l'état sauvage. Bien vite, cependant, nos lointains ancêtres découvrirent la notion de rentabilité qui leur commandait d'installer, c'est-à-dire de cultiver, le pissenlit ou les graminées au voisinage de leur grotte plutôt que de battre la campagne pour les récolter. On pourrait en dire autant du passage de l'activité de chasse à celle d'élevage.

Dans l'exploitation des possibilités de l'Océan en tant que source de nourriture, force nous est de reconnaître que, pour 99 % au moins, l'homme en est aujourd'hui resté aux techniques de la cueillette, ou plutôt de la chasse, puisque la presque totalité de la production organique d'origine marine parvenant sur nos tables est de nature animale et provient de l'exploitation des populations naturelles.

Si l'on analyse les statistiques de l'année 1966, par exemple, l'ensemble des apports de produits marins se montait à environ 50 millions de tonnes en poids frais, se répartissant sensiblement comme suit :

Poissons : 43,8 millions de tonnes

Invertébrés (surtout crustacés et mollusques) :

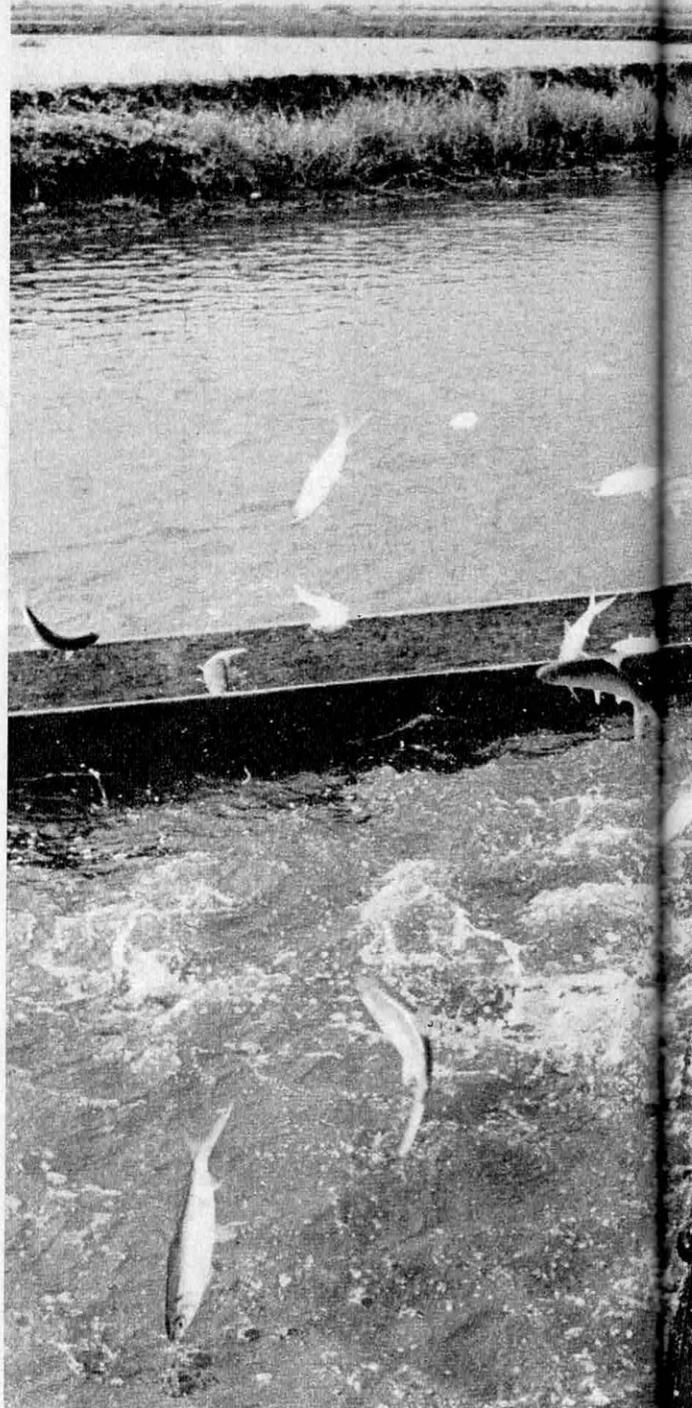
4,2 millions de tonnes

Cétacés : 1,5 million de tonnes

Algues : 0,5 million de tonnes.

Ces chiffres ne sont qu'une approximation, sans doute assez grossière, car dans beaucoup de pays en voie de développement la comptabilisation des apports n'est pas le souci majeur des pêcheurs.

Cette récolte globale paraît s'accroître de 10 % environ par an depuis 1966 grâce au progrès des techniques de la pêche ; l'accroissement porte principalement sur les poissons et, à un moindre degré, sur certains crustacés (crevettes), alors que l'exploitation des algues (d'ailleurs partiellement obtenues par voie de culture) a tendance à régresser et que les apports des grands cétacés, dont on

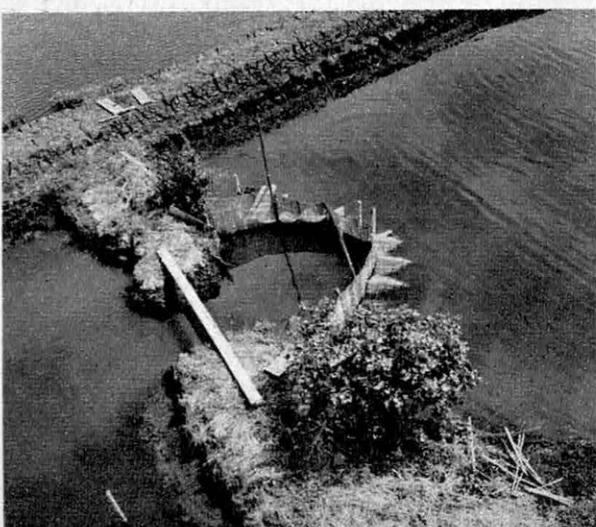


L'AVENIR DE L'AQUICULTURE MARINE



*Capture du « milk-fish »
dans un tambak des îles Philippines.
Ces bassins
artificiellement aménagés
et empoissonnés avec des individus
capturés en mer
sont séparés
par des barrages de roseau
favorisant le renouvellement
des eaux mais que les poissons ne peuvent
franchir (photo ci-contre).*

PHOTOS F.A.O. - P. BOONSELM



sait qu'ils ont été surexploités, s'amenuisent nettement. On peut signaler à ce propos que la Norvège, pourtant pays de vieille tradition baleinière, vient de désarmer sa flotte de navires spécialisés.

Si l'on se préoccupe actuellement beaucoup d'améliorer la rentabilité de ces apports et d'éviter le gaspillage de matière organique par un meilleur traitement des produits de la pêche, on a cherché aussi à évaluer la production potentielle globale de l'ensemble des océans. Parmi les estimations proposées, sur la base de diverses considérations dans lesquelles il serait trop long d'entrer ici, les plus raisonnables paraissent être celles de Bogorov. Après correction, pour tenir compte des espèces d'accès douteuse, c'est-à-dire dont la récolte nécessiterait un effort de pêche trop important eu égard au profit que l'homme en pourrait tirer, on peut penser que la production maximale de l'océan ne peut guère excéder le triple du chiffre de 1966, soit environ 130 millions de tonnes de poissons, et peut-être 15 à 20 millions de tonnes de mollusques et de crustacés, dont les stocks sont actuellement beaucoup moins sollicités que ceux des poissons.

Ces limites probables qu'on peut assigner à l'exploitation des ressources naturelles de l'Océan sont évidemment assez inquiétantes face à la démographie galopante qui caractérise notre planète.

INTRODUCTION D'ESPÈCES EXOTIQUES

Dans les aires maritimes où les stocks d'une espèce commerciale ont été décimés par la surexploitation, un premier remède peut être d'introduire une espèce exotique, plus rustique que l'espèce indigène. C'est ce que tente de faire, sur les côtes bretonnes, l'Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes par l'acclimatation de la langouste du Cap (*Jasus*) pour compenser l'appauvrissement des populations de langouste indigène (*Palinurus*). On peut aussi tenter d'introduire une espèce d'intérêt commercial apte à utiliser un certain échelon de la chaîne alimentaire lorsque celle-ci est interrompue faute d'une espèce prédatrice de l'échelon en question. C'est ce qu'a fait J. H. Finucane en introduisant dans certaines lagunes de Floride le « pompano » (*Trachinotus carolinus*) qui se nourrit des bivalves (*Donax*) et des crustacés (*Emerita*) qui y pullulent, mais peut aussi être nourri avec des aliments artificiels, ce qui réalise une transition vers une certaine forme d'élevage.

Malgré quelques succès, ces introductions d'espèces exotiques restent en nombre assez limité et il est donc naturel que l'on se tour-

ne vers l'aquiculture appliquée à des espèces indigènes pour essayer de combler un déficit futur des ressources alimentaires du globe, déficit qui n'est que trop prévisible, même en tenant compte de l'effort qui est fait actuellement pour la mise en valeur des zones arides des continents. C'est un des mérites du CNEXO que d'avoir, dans son programme, considéré comme priorité des priorités le problème de l'aquiculture, problème qui jusqu'ici n'avait guère été au premier plan des préoccupations des océanographes biologistes.

ALGUES UNICELLULAIRES ET MOLLUSQUES

Je dirai, dès l'abord, que certaines espérances fondées au cours des dix ou quinze dernières années sur la fabrication de protéines végétales par la culture d'algues unicellulaires paraissent devoir être abandonnées. Outre que des essais menés parallèlement, et sur le plan semi-industriel, sur des algues d'eau douce (chlorelles) n'ont donné que des résultats médiocres quant aux qualités du produit sur le plan gustatif, il faut souligner que bon nombre d'algues unicellulaires du plancton sont riches en silice et que certaines mêmes sont toxiques. De plus, la mise au point récente de la fabrication industrielle de protéines représentées par des levures vivant aux dépens des paraffines présentes dans certains hydrocarbures promet à l'homme de disposer, pour satisfaire ce qu'on pourrait appeler ses besoins biochimiques stricts, de protéines pour un prix de l'ordre de quelques dizaines de centimes par kilogramme. Aucune culture d'algue ne peut, sur ce plan, concurrencer pareil produit.

Je ne m'étendrai guère non plus sur les cultures de mollusques, qui concernent essentiellement, actuellement, des bivalves fixés, c'est-à-dire les huîtres et les moules. Il s'agit là, en effet, d'une aquiculture fort ancienne. Pour les huîtres, par exemple, très appréciées par les Romains, la culture remonte au moins à un siècle avant notre ère; le premier ostréiculteur d'Europe paraît avoir été, d'après Pline, un certain Sergius Orata, qui établit près de Baïes des parcs dont il tirait un profit très substantiel; des collecteurs, représentés par des pierres et des pieux enchevêtrés, figurent sur des vases funéraires. Il semble d'ailleurs que les Romains n'aient été, en la matière, que les imitateurs des Chinois, mais on ignore par quelle voie les techniques, éprouvées depuis des temps encore plus reculés par ceux-ci, seraient parvenues dans le bassin méditerranéen.

Divers essais ont été faits pour éléver aussi des bivalves fouisseurs, par exemple le clam

**Ponte provoquée artificiellement
chez des clams,
au laboratoire de Milford (Connecticut),
aux U.S.A.**

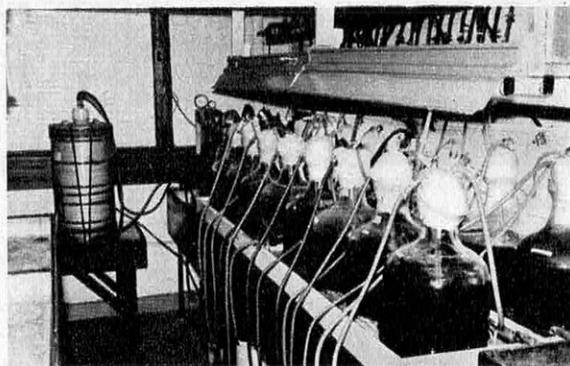
**La croissance des larves
et des jeunes
que l'on peut obtenir dans de tels élevages
pose de graves problèmes
de nourriture :
au même laboratoire
sont réalisées à cet effet
des cultures en masse
d'algues unicellulaires (photo ci-contre).**



(*Mercenaria mercenaria*) de la côte atlantique des Etats-Unis. Compte tenu de la difficulté, beaucoup plus grande que pour les espèces fixées, de contrôler l'installation des larves, qui mènent une vie libre dans le plancton, ces essais n'ont pas jusqu'ici donné de résultats bien probants. Ils ont tout au plus montré la possibilité d'un engrangement accéléré d'individus jeunes ayant accompli naturellement leur métamorphose de la vie larvaire planctonique à la vie sur le fond, en les plaçant dans des conditions d'alimentation particulièrement favorables.

Les essais faits en vue de cultiver les coquilles Saint-Jacques (le *Pecten* de l'Atlantique nord-oriental et de la Manche, notamment) n'ont pas donné non plus de résultats très brillants. Les rares fécondations artificielles réussies n'ont pas donné de larves viables, et les tentatives de conservation en cage suspendues ont été également décevantes du fait de l'action de divers épibiotes (balanes) ou prédateurs.

A vrai dire, d'ailleurs, la culture des bivalves, si elle est recommandable sur le plan de la gastronomie, l'est beaucoup moins sur celui



de la rentabilité énergétique. Même avec les progrès des méthodes de culture qui permettent de produire des huîtres et des moules « bien pleines », la part représentée par la coquille dans le tonnage produit s'élève toujours à 70-75 %.

LES CRUSTACÉS « NOBLES »

Si l'ostréiculture et la mytiliculture apparaissent comme des pratiques perfectibles, mais déjà éprouvées de par leur ancienneté même, il en est tout autrement de la culture des crustacés et des poissons marins.

Pour les crustacés, l'effort s'est porté tout d'abord sur les crustacés dits « nobles », c'est-à-dire les homards et les langoustes, et ceci d'autant que, sur le plan mondial, les apports correspondant à ces espèces tendent à régresser par suite de la surexploitation. Pour les langoustes, le nombre élevé des stades larvaires planctoniques fait que les espérances sont pratiquement nulles. Le homard, animal à développement direct, constitue un matériel apparemment plus favorable, tout au moins pour tenter le repeuplement des fonds. La lenteur de la croissance (de l'ordre de quelques années pour atteindre une taille marchande moyenne) condamne en effet l'élevage complet jusqu'au stade de la commercialisation. Malheureusement, l'expérience conduite par le *Fisheries Research Board of Canada*, qui en plus de vingt années a « fabriqué » puis rejeté à la mer des millions de minuscules homards, ne s'est traduite par aucun accroissement significatif des apports de la pêche. Toutefois, il faut signaler que ces expériences ont été reprises récemment sur la côte est des Etats-Unis, également sur l'espèce *Homarus americanus*, avec le même succès quant à la survie des jeunes individus jusqu'au cap critique de la troisième semaine après l'éclosion, mais avec un autre résultat qui est, celui-là, tout à fait nouveau. Les techniciens de cette « ferme à homard » ont, en effet, réussi à obtenir en captivité des individus d'un poids de l'ordre de 450 g en un

peu plus de trois ans, au lieu de 6-7 ans dans le milieu naturel, en les nourrissant avec des aliments pour truites et même avec des aliments fabriqués industriellement pour les chats et les chiens ! Il paraît probable, pour l'instant du moins, surtout avec les risques de cannibalisme qu'entraîne la cohabitation des individus au moment des mues, que ce genre d'élevage n'est pas encore une entreprise commercialement rentable, mais il n'est pas dit qu'une nouvelle amélioration des techniques ne permettra pas un jour d'arriver à des résultats.

L'ÉLEVAGE DES CREVETTES

La raréfaction des crustacés nobles a conduit tout naturellement à se tourner vers les grandes crevettes, principalement du groupe des Pénéides, très communes sur les fonds vaseux du plateau continental et des lagunes des régions tropicales. Si, par le développement de la pêche dans des zones encore inexploitées, les apports ont considérablement augmenté au cours de ces dernières années, des signes d'épuisement apparaissent ça et là, sur le plan mondial, qui ont conduit des chercheurs japonais à tenter l'élevage de l'espèce *Penaeus japonicus*. La fécondation artificielle n'ayant pas été obtenue, l'élevage, tel qu'il a été réalisé par le Dr Fujinaga, part de femelles fécondées, pêchées sur les fonds voisins et dont chacune peut produire 300 000 à 600 000 œufs. La difficulté essentielle est de faire franchir aux individus les trois premiers stades larvaires (nauplius, zoë, mysis) dont la durée totale est d'une dizaine de jours à la température optimale (27-29 °C). Si au premier stade (nauplius), qui ne dure guère que deux jours, l'individu subsiste encore grâce aux réserves de vitellus de l'œuf, il faut très vite lui assurer une nourriture convenable en qualité et en quantité.

D'innombrables essais réalisés tant par le Dr Fujinaga que par divers autres chercheurs, il résulte que l'alimentation des larves doit être végétale jusque vers le 5^e-7^e jour, puis animale à partir du 7^e jour. L'alimentation végétale est représentée par des algues planctoniques cultivées tout exprès, la diatomée *Skeletonema costatum*, des flagellés divers. L'alimentation animale consiste en *Brachionus* (rotifère) et surtout en nauplii d'*Artemia salina*, petit crustacé euryhalin, c'est-à-dire capable de supporter de grandes variations de salinité, connu sous le nom de « brine shrimp » aux Etats-Unis, élevé industriellement par des firmes spécialisées dans la fourniture de nourriture pour des poissons d'ornement et commercialisé sous forme d'œufs dont le prix, 100 F le kilogramme

environ, est élevé. Dès le 13^e-14^e jour, on ajoute à cette nourriture vivante de la chair de mollusque broyée, et de la chair de poisson blanc à partir du 15^e-16^e jour. On peut considérer que les individus qui ont atteint le 20^e jour (soit 10 jours pour les trois premiers stades larvaires et 10 jours pour les stades post-larvaires) sont prêts à être utilisés. A condition de disposer de bassins d'environ 200 m³, d'une profondeur de 2 m, on a déjà obtenu, au Japon, des millions de postlarves dont le prix de revient est de l'ordre de quelques centimes l'unité.

En dehors de la technique d'élevage, qu'il importe évidemment de bien posséder, et de la dépense inhérente à l'installation des bassins et des locaux annexes, l'opération ne peut être rentable qu'à deux conditions : existence d'une main d'œuvre soigneuse mais à bon marché ; possibilité de se procurer, à très bon marché, les mollusques et le poisson blanc qui sont nécessaires à la dernière phase d'élevage des postlarves. Ces conditions se trouvent remplies au Japon, mais l'extension à d'autres pays de tels élevages de crevettes exige une étude préalable approfondie.

Au Japon, les postlarves de *Penaeus japonicus* ainsi obtenues sont utilisées de trois façons différentes.

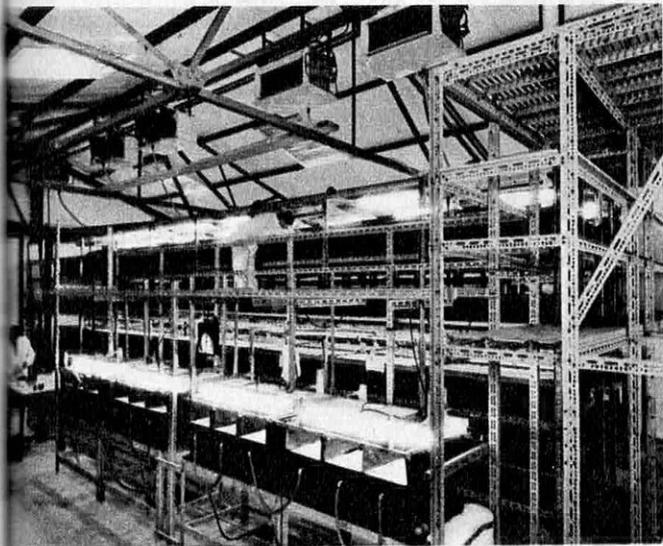
Tout d'abord, on peut les déverser en mer, dans les fonds où l'espèce existe déjà, pour accroître le peuplement naturel et, par voie de conséquence, son exploitation future par les pêcheurs. Cette pratique semble avoir donné d'assez bons résultats, mais elle sort du domaine de l'aquiculture et ne peut évidemment être mise en œuvre que par un organisme public.

On peut aussi procéder à un élevage extensif dans des conditions semi-naturelles, en libérant les postlarves dans une lagune côtière fermée, d'une surface de quelques hectares, où les individus trouvent une alimentation naturelle que l'on peut éventuellement compléter pour obtenir une croissance plus rapide. Une taille marchande de l'ordre de 10 à 16 g peut être obtenue à la belle saison en cinq ou six mois, ce qui correspond à une production de l'ordre de 100 à 200 g par mètre carré.

La troisième utilisation possible des postlarves de *Penaeus japonicus* réside dans l'élevage intensif jusqu'à la taille marchande en bassin artificiel. Ces bassins, comme ceux servant à l'élevage des larves, doivent avoir au moins 2 m de profondeur et la population de crevettes peut atteindre une centaine par m³ (et parfois davantage). Ces élevages intensifs, conduits pendant la saison où la température est élevée, ce qui accélère la croissance, nécessitent une aération artificielle

*Le loch d'Ardtoe,
sur la côte ouest de l'Écosse,
a été barré par deux digues
pour former un bassin
où sont déversés de jeunes poissons plats
(soles et plies),
produits artificiellement,
ci-dessous, à la station d'élevage de
Port-Erin, île de Man,
par l'équipe du Dr J.E. Shelbourne.*

WHITE FISH AUTHORITY - ENGLAND



des bassins et surtout une alimentation abondante et variée. Etant donné qu'il faut environ 100 à 120 g de nourriture pour obtenir une crevette de 10 à 12 g, cet élevage intensif implique, comme pour l'obtention des postlarves, que l'on dispose d'un approvisionnement en mollusques et poissons blancs à bas prix. Dans les conditions optimales, la production par mètre carré de bassin peut avoisiner 700 g pour un cycle de culture de 7 à 8 mois conduisant les individus à un poids de l'ordre de 15 g. La croissance étant plus lente et le taux d'assimilation plus faible quand l'individu avance en âge, il paraît de meilleure économie, lorsque les conditions du marché s'y prêtent, de commercialiser les *Penaeus* vers 10 à 12 g, ce qui demande cinq mois environ.

Il semble que ce mode d'élevage intensif ait produit au Japon, l'année dernière, environ 250 tonnes de *Penaeus japonicus*, contre environ 3 000 tonnes pour la pêche proprement dite. La proportion de l'apport « culture » est donc assez faible, mais les crevettes d'élevage sont de meilleure présentation et vendues à meilleur prix.

Comment se présentent pour la France métropolitaine les possibilités d'élevage de cre-

vettes ? Bien sûr, on peut envisager de reproduire exactement le processus suivi par les techniciens japonais en utilisant la même espèce. Celle-ci exigeant tant pour la ponte et l'éclosion que pour une croissance rapide des températures de l'ordre de 26 à 29° C, il est donc hors de question de réaliser un cycle de culture complet dans des bassins à ciel ouvert, d'où nécessité d'installer des sortes de serres chauffées, ce qui rendrait très certainement l'entreprise non rentable. Il paraît plus réaliste d'essayer d'élever une espèce indigène, ou du moins une espèce dont les exigences thermiques soient à peu près compatibles avec les conditions climatiques locales. Les essais faits en Bretagne sur les *Leander* (crevette dite « bouquet ») ont été jusqu'ici peu concluants. Il semble en revanche qu'il y aurait intérêt à tenter l'élevage de la « caramote » (*Penaeus kerathurus*), espèce qui atteint 150 mm de long, assez rare sur les côtes de France, et plus commune sur les côtes d'Italie et surtout de Tunisie. Cette espèce a l'avantage de supporter des températures de l'ordre de 13° C, au moins dans des eaux de salinité voisine de la normale des eaux méditerranéennes. Elle a l'inconvénient d'être brunâtre, ce qui est moins favorable à la commercialisation qu'une teinte naturelle dans la gamme des rouges, mais elle devient heureusement rose par cuisson.

POISSONS : DES EXPÉRIENCES DÉJA ANCIENNES

De par le pourcentage de « déchets » par rapport au poids frais total, plus faible que chez les mollusques et les crustacés, les poissons présentent un intérêt aquicole important, surtout s'il s'agit d'espèces dont le prix de vente est élevé.

Pour de nombreuses espèces des eaux douces (truite, brochet, perche, carpe, etc.), la pisciculture dispose à l'heure actuelle d'une tradition bien établie et de techniques éprouvées. On pourrait donc croire que l'élevage des poissons marins pose moins de problèmes.

mes que celui des crevettes. Il n'en est rien car, contrairement aux espèces d'eau douce, la plupart des poissons marins (même ceux appelés démersaux, qui vivent sur le fond) ont un développement comportant une larve pélagique vivant parfois plusieurs semaines au sein du plancton. Cette particularité représente une difficulté considérable pour appliquer les méthodes d'alevinage qui sont classiques en pisciculture limnique (en eau douce).

Pour pallier cette difficulté, on a songé tout naturellement à pratiquer, non un véritable élevage, mais un simple engrangement de jeunes individus. C'est le Danois C.G.J. Petersen qui, il y a plus d'un demi-siècle, a fait dans cette voie la première expérience véritablement scientifique sur la plie, *Pleuronectes platessa*. Après la métamorphose qui fait passer l'individu de l'état de larve planctonique à celui de jeune vivant sur le fond, ce poisson plat, commun dans la mer du Nord, consomme essentiellement des invertébrés benthiques : petites annélides, petits mollusques, petits crustacés. Partant du principe que les jeunes plies ne trouvaient pas en mer du Nord une quantité de nourriture suffisante, Petersen avait cherché sur les côtes danoises des aires bien circonscrites dans lesquelles cette faune benthique était suffisamment abondante. Grâce à une étude simultanée des besoins alimentaires des plies, de la production du fond en invertébrés, des prélèvements effectués par les prédateurs concurrents, Petersen parvint à établir une sorte de bilan trophique de l'aire côtière considérée. Le résultat fut remarquable pour l'époque : l'introduction dans le Limfjord, au printemps, de 450 000 jeunes plies pêchées en mer du Nord permit de récolter six mois plus tard environ 150 000 individus parvenus à la taille marchande de 300 g.

A vrai dire, Petersen n'avait fait là qu'établir sur des bases scientifiques les pratiques mises en œuvre depuis des siècles par les « valliculteurs » des côtes du Nord-Est de l'Italie. Il semble que ce pays de lagunes saumâtres, qui couvre les formations deltaïques des fleuves (dont les plus importants sont le Pô et l'Adige) qui se jettent dans l'Adriatique entre l'embouchure du Reno et celle de l'Isonzo, ait servi de refuge pour la première fois à des populations humaines assez denses au moment des invasions barbares qui suivirent la chute de l'empire romain. Ces agriculteurs d'origine se rendirent vite compte que certains poissons se reproduisant en mer venaient, à certaines saisons, se nourrir dans les lagunes. Ainsi « la valliculture est basée sur l'exploitation des tropismes migratoires des poissons qui seront retenus dans des bassins lagunaires appelés « valli » et

sont ensuite capturés lorsqu'ils descendent à la mer pour la fraie » (U. d'Ancona), ceci grâce à des barrages permanents ou non. Outre les anguilles, on y trouve, à l'état naturel et dans l'ordre d'importance décroissante, diverses espèces de mugil, la dorade (*Sparus auratus*), le loup ou bar (*Morone labrax*), le flet (*Pleuronectes flesus*).

Au cours des dernières décennies, les valliculteurs ont pris graduellement conscience de ce que la pénétration naturelle des jeunes poissons au travers des barrages conçus pour arrêter les gros individus était trop irrégulière pour assurer un bon rendement. Ils ont commencé alors à capturer des alevins le long de la côte, et à « empoissonner » à proprement parler leurs valli, ce que pratiquent d'ailleurs depuis plusieurs siècles les Indonésiens et les Philippins qui aiment ainsi leurs étangs à pisciculture, appelés « tambaks », avec de jeunes individus de l'espèce *Chanos chanos* (« milk-fish ») récoltés en mer.

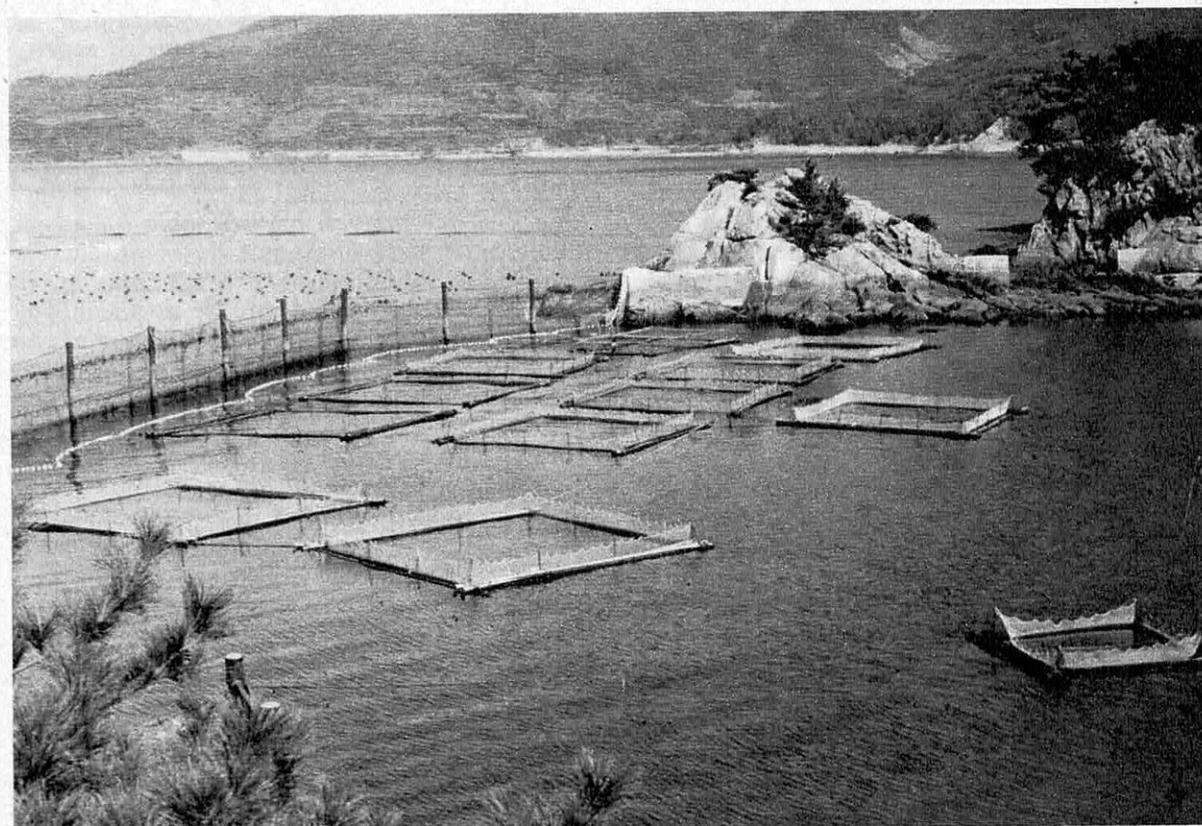
Alors que les tambaks, du fait de leur caractère totalement artificiel, ont une surface qui ne dépasse généralement pas deux hectares, les « valli di pesca » de l'Adriatique, qui utilisent des lagunes naturelles dont les émissaires seuls sont aménagés, peuvent couvrir plusieurs centaines d'hectares. Tandis que le rendement en poissons des valli atteint au maximum 150 kg à l'hectare par an, celui des tambaks dépasse couramment 500 kg/ha et peut avoisiner 1 tonne/ha et par an, tant parce qu'on peut dans la plupart des régions, en raison du climat, faire deux « récoltes » annuelles, que parce que, aux poissons d'espèces diverses (*Chanos*, *Mugil*, *Puntius*, *Tilapia*, anguilles, etc.) s'ajoutent des crevettes pénéides.

LES GRANDS PROBLÈMES DE LA PISCICULTURE MARINE

En définitive, que l'empoissonnement soit naturel ou artificiel, l'aménagement pour un rendement optimal de ces espaces plus ou moins saumâtres dans lesquels les individus sont parqués sans pouvoir regagner la mer libre, pose des problèmes de trois ordres qu'il est intéressant de passer en revue.

Le premier est celui des conditions physico-chimiques des eaux. Tambaks et valli ne doivent être clos que pour les poissons; l'eau doit, sinon y circuler activement, du moins être suffisamment brassée pour conserver une teneur acceptable en oxygène dissous et prévenir la stratification génératrice de grands écarts de température. Autrement dit, les obstacles dressés à la sortie des poissons doivent être largement perméables à la circulation des eaux si, et c'est le cas le plus gé-

*Près d'Hiroshima,
l'Université Nansei a créé
un élevage de hamachi (*Seriola*),
poisson remarquablement vorace,
nourri avec des déchets de poisson
(photo ci-contre).
En bas, une vue générale de l'élevage.*



néral, les bassins restent en communication avec la mer. Les risques d'un abaissement de la teneur des eaux en oxygène dissous sont d'autant plus grands que ces bassins sont, comme on le verra plus loin, des zones où la production organique, naturelle ou stimulée artificiellement, est nécessairement élevée, ce qui risque d'entraîner, si la plus grande partie de ces matières organiques ne transite pas normalement au long de la chaîne alimentaire, une accumulation de matériel mort favorisant les pullulations microbiennes qui peuvent provoquer une véritable asphyxie du milieu. Au point de vue de la température, la profondeur généralement minime (toujours moins de 2 m et parfois seulement quelques décimètres) de ces bassins rend les eaux très sensibles aux

échanges thermiques avec l'atmosphère. Dans les tambaks de la région indo-pacifique, peuplés d'espèces typiquement tropicales et très tolérantes du côté des températures élevées, le problème ne se pose guère. Dans les valli, en revanche, la couche d'eau superficielle peut subir un vif refroidissement en hiver, jusqu'à se prendre en glace. Pour soustraire les poissons aux conséquences du grand froid, on y aménage parfois des sortes de fossés surcreusés où ils peuvent se réfugier. Les eaux de ces fossés, en général particulièrement stagnantes, donc très appauvries en oxygène dissous, peuvent être dangereuses de ce fait, quoique le métabolisme des animaux soit particulièrement bas quand les eaux sont très froides. La salinité, en revanche, ne pose généralement

PHOTOS O. FUKUHARA

guère de problème, toutes les espèces capables de subsister dans de telles collections d'eau étant euryhalines. On a évidemment la ressource, lorsque la circulation naturelle dans les bassins n'est pas suffisamment entretenue, d'installer des pompes, mais ceci risque de majorer les frais de fonctionnement.

NOURRITURE ET FERTILISATION ARTIFICIELLES

Le second problème, qui est sans doute le plus important et celui qui conditionne le plus directement la rentabilité de l'opération, est celui de la nourriture des espèces cultivées et, plus généralement, de la « structure trophique » des populations établies dans les bassins. Il est bien connu que les conditions d'exploitation de la matière vivante animale dans les milieux océaniques sont moins favorables que sur les continents puisque les espèces utilisables y sont, dans leur grande majorité, des carnivores, alors que, dans les milieux terrestres, il s'agit d'herbivores. Chaque passage d'un échelon à l'échelon suivant de la chaîne alimentaire se traduisant par une perte d'énergie, on aurait avantage à éléver des poissons marins herbivores. C'est justement le cas des *Mugil*, fort appréciés en Afrique du Nord et au Proche-Orient, mais peu prisés par le consommateur français, et aussi des *Chanos*, qui sont l'élément dominant dans les tambaks de la région indo-pacifique. On est d'ailleurs très mal informé du rendement de transformation de la matière vivante végétale en chair du poisson végétarien. Chez les *Chanos*, il serait en poids frais de l'ordre de 4,5 %, ce qui paraît faible, étant donné que des expériences sur des poissons herbivores d'eau douce ont montré des rendements de l'ordre de 30 %. D'une façon générale, les cyanophycées (algues bleu-vertes) qui forment la base de la nourriture aussi bien des *Mugil* que des *Chanos* existent dans les bassins en quantité suffisante. Toutefois, on a procédé un peu partout à des essais de fertilisation. Dans les tambaks, on a essayé d'accroître la quantité de sels minéraux nutritifs mis à la disposition de la production primaire d'algues cyanophycées en déversant des détritus organiques divers (déchets de pêcheries, déchets du traitement des noix de coco, des cannes à sucre, du riz, feuilles de palétuviers, etc.) ; dans certains valli, et surtout dans les lochs écossais où l'on a fait des expériences d'aquiculture, on a, au contraire, utilisé directement des engrains azotés et phosphorés. Les résultats n'ont toutefois généralement pas répondu aux espérances. Dans ces diverses zones, soumises à des ap-

ports terrigènes, l'azote minéral est en général en quantité suffisante et les apports artificiels pourraient sans doute être limités au phosphore minéral.

Les essais de fertilisation de ces lochs écossais concernent, d'ailleurs, non la nourriture directe de poissons herbivores, mais la production de nourriture végétale pour des invertébrés benthiques servant de nourriture aux poissons, ce qui nous amène tout naturellement au problème de la nourriture des espèces carnivores. Parmi celles-ci, il faut distinguer les poissons mangeurs d'invertébrés et les poissons piscivores. Pour les premiers, la connaissance que l'on a de la dynamique des population d'invertébrés benthiques est trop imparfaite pour qu'on puisse espérer intervenir à bref délai. Les apports d'engrais pratiqués dans les lochs écossais ont eu une action sélective sur certaines espèces végétales qui n'étaient pas des plus souhaitables ; il en est résulté une certaine réduction de l'oxygénation préjudiciable à certains animaux et l'accroissement de la production secondaire benthique ne s'est manifestée qu'à moyen terme (2-3 ans) et de façon peu convaincante. Pour les poissons qui sont, au moins partiellement, piscivores, tels le bar, la difficulté est plus grande quoiqu'on puisse envisager qu'ils se nourrissent à partir de poissons herbivores. En fait, chez les poissons prédateurs (dorade et surtout bar) l'insuffisance de nourriture disponible dans les espaces clos conduit en général au cannibalisme, qui est très préjudiciable à un bon rendement de la culture et apparaît comme la caractéristique la plus déplorable des élevages mixtes que sont les valli di pesca. Dans les essais d'aquiculture qu'entreprend la Station marine d'Endoume sous la direction de Cl. Leray, il est prévu de séparer, autant que possible, les espèces et les classes d'âge, sauf dans le cas où on cherchera à éléver les prédateurs avec des poissons de faible valeur commerciale.

L'insuffisance de la nourriture animale, probablement très générale dans les bassins de tous ordres, conduit à étudier les possibilités de la nourriture artificielle. Pour les très jeunes individus, le problème de quantité, et par conséquent de prix de revient de la nourriture, ne se pose guère ; des techniques analogues à celles utilisées pour les crevettes peuvent être établies empiriquement. En revanche, dès qu'il s'agit de conduire jusqu'à la taille marchande des individus jeunes, on doit rechercher une nourriture aussi peu onéreuse que possible. Au Japon, l'élevage du hamachi (*Seriola*), déjà rendu difficile par le cannibalisme accusé de cette espèce, était basé sur l'utilisation de poissons peu appréciés (lançon, maquereau). La haus-

se des prix de ces derniers paraît rendre actuellement l'entreprise moins rentable. Dans notre pays, la nature des peuplements et la situation de l'industrie des pêches font que l'on ne peut guère compter sur un ravitaillement régulier en déchets ou en espèces invendables ; c'est la raison pour laquelle Cl. Leray s'est attaqué, depuis une année environ, au problème de la préparation de granulés acceptés, au moins à titre de complément de ration, par les poissons prédateurs. Il serait prématuré de parler déjà de résultats, l'expérimentation scientifique devant être complétée par une étude de rentabilité.

ROCHERS-REFUGES ARTIFICIELS

On peut mentionner également, bien qu'il ne s'agisse que de l'enrichissement du milieu naturel en nourriture animale, les tentatives pour développer dans certains fonds côtiers les substrats solides, favorables à l'installation, non seulement des algues mais aussi de nombreux animaux fixés. Il y a plus d'un demi-siècle, Petersen avait déjà noté que la masse de matière vivante par mètre carré était bien supérieure sur les substrats durs (roche notamment) que sur les sables ou les vases. Pour accroître la production globale des baies sablo-vaseuses sur lesquelles il expérimait, il y avait installé de petits parcs à moules et à huîtres. Cette idée a été avancée, par la suite, à plusieurs reprises. Récemment, des carcasses de voitures ont été immergées au large de Sète, à la fois comme substrat de fixation et pour offrir aux poissons des « refuges » contre l'action des engins de pêche. Il est certain, et tous les chasseurs sous-marins le savent, que les épaves sont toujours riches en poissons, mais jusqu'ici il n'est pas prouvé que la multiplication de ces zones artificielles de fonds durs, au sein d'une certaine superficie de fonds meubles, débouche réellement sur un important accroissement de la quantité globale de poissons de fond ; certaines expériences de mise en place de récifs artificiels temporaires tendraient même à faire croire qu'il y a plutôt rassemblement d'une fraction importante de la population au niveau de ces « refuges ».

REPRODUCTION ARTIFICIELLE

Le troisième et dernier problème de l'aquiculture de poissons est celui de la reproduction artificielle des espèces d'intérêt commercial. Evidemment c'est seulement quand se trouve ainsi « bouclé » le cycle biologique complet, depuis les reproducteurs d'une génération, sinon jusqu'à ceux de la génération suivante, du moins jusqu'aux individus par-

venus à la taille marchande, qu'on peut véritablement dire qu'il y a « élevage ». On peut signaler les travaux du groupe d'Aberdeen dirigé par J. H. Steele qui a réussi cet élevage complet sur la plie (*Pleuronectes platessa*) ; c'est là une remarquable réussite expérimentale, mais qui ne paraît pas pouvoir être transposée, dans un avenir immédiat du moins, sur un plan semi-industriel. La fécondation artificielle a pu être obtenue également sur certaines espèces de *Mugil* par des savants israélites, et il est très probable qu'un minime effort supplémentaire permettrait de réaliser en captivité le cycle complet. Il n'est pas inutile de rappeler aussi que M. Fontaine a obtenu la reproduction artificielle de l'anguille d'Europe, poisson qui est d'ailleurs hors du propos de cet article. De telles recherches sont du plus haut intérêt pour préciser certains points de la physiologie de l'espèce concernée, et, par là, peuvent avoir, à terme, des « retombées » sur le plan pratique.

LES TENDANCES ACTUELLES

Du strict point de vue de l'application immédiate, il semble plus réaliste de se borner à la récolte de jeunes individus dans le milieu naturel et de faire porter l'effort maximal de recherche sur l'élevage jusqu'à la taille marchande, dans le délai le plus bref et les conditions les plus économiques d'apport de nourriture. Les émissaires des centrales thermiques ou des raffineries d'hydrocarbures utilisant l'eau de mer pour refroidir leurs installations peuvent, en réchauffant l'eau de la zone d'élevage, assurer une croissance particulièrement rapide. Tel est le cas dans certains lochs écossais où des soles ont grandi de 3 à 25 cm en dix-huit mois. L'influence favorable des températures élevées sur la croissance conduit logiquement à s'intéresser aux possibilités d'élevage de poissons dans les mers tropicales. Les tambaks indopacifiques, dont il a été parlé précédemment, en sont un exemple. Mais on pense aussi aux récifs de madréporaires, dont la production primaire est relativement importante, tant sous la forme d'algues bleues vivant sur les coraux morts que sous la forme de zooxanthelles, algues unicellulaires symbiotiques des madréporaires et de nombreux invertébrés. Bien que cette production primaire soit en partie utilisée directement par divers poissons végétariens, d'ailleurs dépourvus d'intérêt économique, les poissons mangeurs d'invertébrés ou les poissons piscivores sont particulièrement mal représentés. Pour tout dire, les récifs de « coraux » ont un rendement en poissons comestibles qui est dérisoire par rapport à leur production

de base. Il semble que, récemment, une des causes possibles de cette anomalie ait été découverte par J. Picard et l'équipe de chercheurs qu'il a dirigée dans les récifs de Tuléar, récifs étudiés méthodiquement depuis 1961 par les chercheurs de la station marine d'Endoume. Les récifs de madréporaires se sont, en effet, révélés comme ayant dans toute leur épaisseur une structure alvéolaire ; les cavités, dont la dimension varie le plus souvent entre 0,5 et 5 cm de diamètre, renferment une riche faune de petits invertébrés, homologue de celle qui, dans les fonds littoraux des mers tempérées, sert de nourriture à bon nombre de poissons d'intérêt commercial. Dans le cas des récifs coralliens, cette faune ne sort de ses alvéoles que quand celles-ci sont surpeuplées. Une expérience de traitement d'un fragment de récif par des produits chimiques a montré que l'on peut forcer ces animaux à sortir et les rendre ainsi accessibles à des poissons mangeurs d'invertébrés. Il y a peut-être là une possibilité de valorisation de certains édifices récifaux et notamment des atolls dits « fermés ».

En matière d'aquiculture de poissons marins, la sagesse paraît être, actuellement, de concentrer les efforts sur un petit nombre d'espèces, intéressantes, bien entendu, sur le plan commercial, suffisamment euryhalines pour supporter la vie dans les lagunes côtières ou dans des bassins artificiels, en recherchant à la fois une rentabilité à court terme sur le plan de la culture extensive et une amélioration des connaissances fondamentales pouvant conduire à des élevages de caractère intensif.

C'est volontairement que, dans cet article qui se veut général et plus prospectif qu'analytique, je passerai rapidement sur la culture des algues marines multicellulaires. L'utilisation de celles-ci pour l'alimentation humaine n'apparaît guère que dans les périodes de famine ou dans des régions excessivement pauvres. Le Japon est à peu près le seul pays où il y ait une tradition de la culture des algues à des fins alimentaires (surtout *Porphyra* et laminaires), mais cette industrie, dont la production dépassait 500 000 tonnes par an (poids frais) avant la seconde guerre mondiale, paraît actuellement en récession, puisque les dernières statistiques donnent des chiffres de l'ordre de 350 000 t, ce qui semble témoigner d'une certaine désaffection des consommateurs pour ces produits. D'une façon générale d'ailleurs, hors le rôle de condiment que peuvent conférer aux algues certaines préparations, leur intérêt alimentaire paraît assez faible ; on y trouve certes d'assez nombreux acides aminés mais, sauf chez certaines algues rouges, l'équilibre

de ceux-ci s'écarte assez nettement de la « combinaison type » reconnue comme propre à couvrir les besoins azotés de l'homme ; de plus, les taux souvent élevés de sels minéraux et d'iode présents dans les farines d'algues, ainsi que l'existence d'hydrates de carbone à grosses molécules peu digestibles, conduit à considérer les produits extraits des algues multicellulaires plutôt comme un complément que comme la base de la ration alimentaire, et il semble en être de même en ce qui concerne leur utilisation pour la nourriture des animaux domestiques.

Enfin, et bien qu'il ne s'agisse plus à proprement parler d'aquiculture, mais plutôt d'une entreprise un peu comparable aux tentatives faites par l'O.N.U. en faveur des zones arides, il faut mentionner les espérances, à vrai dire lointaines, que peut susciter la fertilisation globale des milieux océaniques.

Dans le domaine pélagique, où les chaînes alimentaires conduisant aux poissons carnivores de 1^{er} et 2^e ordre sont, en moyenne, plus directes que dans le domaine benthique, et comportent moins de « pertes latérales » vers des espèces sans intérêt économique, il paraît logique d'espérer qu'un accroissement de la production primaire réserve des chances sérieuses d'accroître les apports commerciaux. Or, les eaux du large sont en général assez pauvres en plancton végétal, sauf aires ou saisons privilégiées, car la faible teneur de ces eaux en diverses substances, surtout phosphates et nitrates, joue le rôle de facteur limitant pour la production primaire. Il ne saurait évidemment être question de déverser des engrains minéraux dans l'immensité des eaux océaniques ; mais on pourrait essayer d'utiliser la réserve minérale gigantesque qui se trouve dans les eaux intermédiaires et profondes, à partir du niveau où la quantité de lumière provenant de la surface ne permet plus la photosynthèse par les végétaux autotrophes. Deux moyens ont été envisagés pour cela :

— ou bien ramener vers la couche éclairée, par un système de thermopompe, ces eaux riches en sels nutritifs, grâce à une simple source d'énergie peu onéreuse et d'entretien simple (nucléaire par exemple) ;

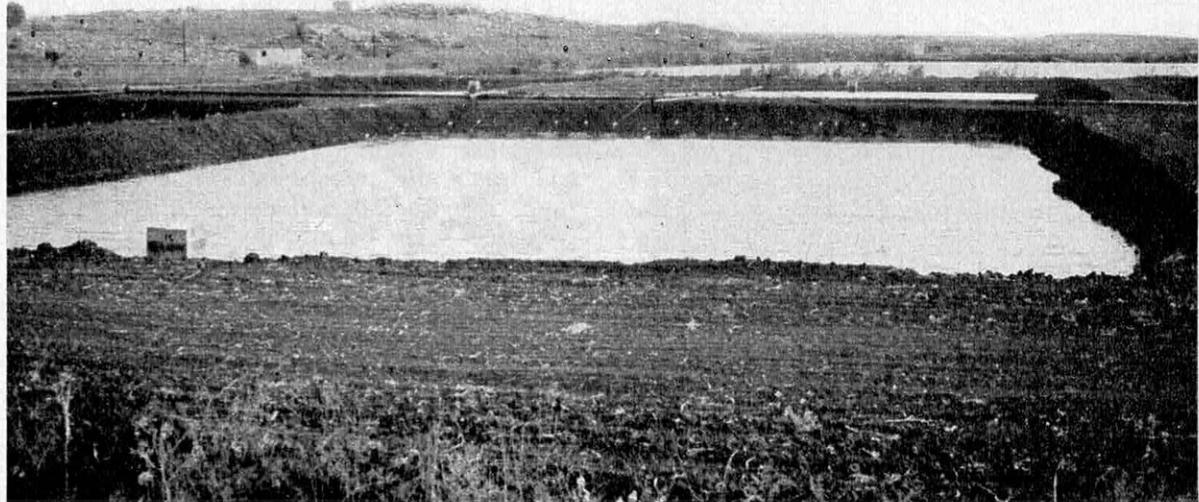
— ou bien, à l'aide de longs tubes en plastique emplis d'air, flottant verticalement, faire cheminer la lumière par réflexion totale sur les parois internes et conduire l'énergie du soleil jusqu'à des couches qui, normalement, sont insuffisamment éclairées.

Ces projets, dont la réalisation conduirait à fertiliser de larges aires océaniques, ne pourraient sans doute être entrepris que dans le cadre d'un programme international et peut-être sous l'égide des Nations Unies. Leur succès dépendra du degré de connaissance

**Élevage de muges,
à la station expérimentale de Dor,
en Israël :**
**ci-dessous, vue générale des bassins,
d'une superficie unitaire
de 1 000 m²,**
**où la pêche est effectuée au filet
tendu par un tracteur
(photo ci-contre).**
Le document en bas de page
montre les éleveurs
opérant la sélection
des individus géniteurs.



PHOTOS CL. LERAY



auquel on sera parvenu dans l'étude des mécanismes de la production primaire, ce qui justifie les efforts faits actuellement dans cette voie dans de nombreux pays et notamment en France.

D'ici que se généralisent ces projets dont le caractère de science-fiction est bien moindre qu'il n'y paraît au premier abord, il appartient aux biologistes de diriger leurs efforts vers les problèmes que pose l'aquiculture proprement dite, en se limitant aux espèces dont l'exploitation peut créer des profits. A l'époque de progrès technologiques et d'évolution rapide des conditions sociales qui est la nôtre, ingénieurs et économistes y auront leur rôle à jouer. L'aquiculture, comme l'océanographie elle-même, ne réussira que par la collaboration d'hommes issus des formations les plus diverses.

J. M. PERES

LES PROTÉINES DE POISSON

Al'origine de toutes les recherches visant à accroître la production d'aliments assimilables par l'homme, se trouve le problème majeur d'une population mondiale en progression rapide. La situation est particulièrement grave en ce qui concerne les matières organiques azotées (ou protéines) et de nombreuses vitamines que l'organisme humain ne sait pas synthétiser et qu'il doit donc trouver dans ses aliments.

Les protéines d'origine végétale ne contiennent pas l'ensemble des acides aminés indispensables au développement et à la croissance. De grandes quantités de protéines animales renfermant toute la gamme des acides aminés que l'homme ne sait pas fabriquer deviennent de plus en plus nécessaires pour « supplémenter » en produits essentiels les aliments d'origine végétale.

Les troubles provoqués par une malnutrition protéique ou une avitaminose sont très graves, particulièrement chez les jeunes enfants dont le développement physique et mental est compromis.

NOMBREUSES sont les organisations internationales, telle la F.A.O. (*Food and Agriculture Organization*), qui, depuis plusieurs années, alertent l'opinion mondiale sur les très graves problèmes de l'alimentation humaine. D'après les experts, près de 20 % de la population mondiale souffre de graves déficiences physiques et mentales par suite de carences en protéines.

Depuis quelques dizaines d'années, la recherche mondiale s'est engagée dans diverses voies qui toutes tendent à développer de nouvelles ressources en protéines animales, végétales ou de synthèse, en vue d'une utilisation directe ou indirecte (par l'intermédiaire d'animaux d'élevage) pour l'alimentation humaine. Sans prétendre en donner une liste exhaustive, il convient de citer deux exemples récents.

Le premier concerne l'obtention de protéines à partir d'une algue bleue (*Cyanophycée*) de la famille des Oscillatoriacées, *Spirulina maxima*, originaire du lac Tchad où elle est consommée traditionnellement par les populations locales. L'Institut Français du Pétrole, avec le concours de l'Institut National de la Recherche Agronomique, a réussi à mettre au point un procédé de culture continue en bassins, à partir de sels minéraux, de gaz carbonique et, bien entendu, de l'énergie solaire indispensable à la photosynthèse. Dans les régions à fort ensoleillement, on peut escompter des rendements de l'ordre de 40 tonnes à l'hectare, pour une culture de 300 jours par an. La Spiruline a une teneur relativement très élevée en matière azotée : elle contient entre 60 et 68 % de protéines (en pour-cent du poids sec). Des installations de production en vraie grandeur sont actuellement à l'étude.

Un second exemple, peut-être plus spectaculaire, nous est fourni par la culture d'une levure, *Candida lipolytica*, à partir de parafines de 10 à 40 atomes de carbone contenues dans les pétroles bruts. La culture est réalisée en présence d'oxygène et de sels minéraux. De nombreux pays entreprennent actuellement des recherches sur le développement des microorganismes sur les produits pétroliers ; en France, les travaux ont été conduits par la Société Française des Pétroles B.P. et le Laboratoire de chimie bactérienne du C.N.R.S., à Marseille, dirigé par le Professeur Senez. Les résultats sont suffisamment encourageants pour que la construction d'une usine de fabrication ait été décidée. En 1970 elle devrait produire annuellement une quinzaine de milliers de tonnes. Il convient toutefois de noter que les protéines obtenues par dessiccation et purification de ces levures sont très pauvres en certains acides aminés essentiels, par exemple la méthionine (que l'on sait par ailleurs produire par synthèse industrielle). L'une des applications les plus immédiates sera l'incorporation de poudre de levure (20 % environ) aux farines de soja destinées à l'alimentation animale. A plus long terme, on peut également penser à l'alimentation humaine, la poudre de levure intervenant comme appât destiné à rectifier la teneur en acides aminés d'un aliment principal.

LES RESSOURCES DE L'Océan

L'homme extrait annuellement des océans (chiffres pour 1965) 45 millions de tonnes d'organismes marins comestibles, dont 40 millions de tonnes de poissons proprement dits. Depuis la dernière guerre mondiale, les chiffres sont en progression régulière, et les

experts fournissent des estimations très variables sur la production totale potentielle : de 55 millions de tonnes par an à 2 milliards de tonnes par an pour les plus optimistes (ce dernier chiffre est probablement surestimé), selon que l'on considère le taux actuel des prises ou des notions plus théoriques, et également plus schématiques, basées sur les transferts d'énergie à travers le réseau alimentaire (à mesure que progressent nos connaissances, la notion simpliste de chaîne alimentaire s'estompe en effet devant un système d'échanges trophiques plus complexe) à partir des données de production primaire photosynthétique du phytoplancton.

Si l'on admet que la ration protéique qualitativement équilibrée et indispensable à un individu adulte est de l'ordre du millième de son poids par jour, soit environ 20 kg par an, on constate qu'une production de 100 millions de tonnes de poissons (soit entre 15 et 20 millions de tonnes de protéines sèches) permettrait théoriquement de subvenir aux besoins en matières azotées d'une population de 2 milliards d'individus.

En fait, il faut tenir compte de ce qu'une fraction importante de la production brute des pêches est perdue :

- poisson rejeté à la mer lors des opérations de tri à bord, parce que de trop petite taille ou appartenant à des espèces non commercialisables ;
- déchets résultant des opérations de salage ou de présentation (tête, viscères) ;
- déchets importants à l'intérieur du circuit de distribution.

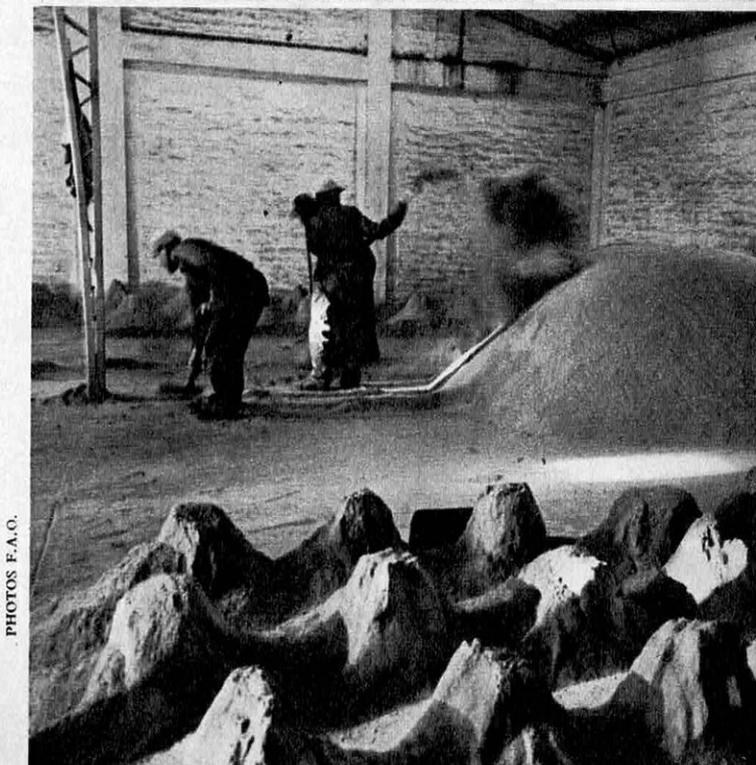
Pour la pêche française, des chiffres de l'ordre de 50 % de perte totale ne paraissent pas du tout excessifs.

Dans le double but d'obtenir en grandes quantités des protéines animales pour l'alimentation humaine et d'améliorer le rendement de la pêche, on a envisagé depuis une quinzaine d'années environ (des essais sans lendemain avaient eu lieu en Allemagne à la fin de la dernière guerre mondiale), la fabrication d'un produit contenant uniquement des protéines pures, débarrassé de l'eau, des graisses et d'une grande partie des sels minéraux et des hydrates de carbone.

Le produit devait être d'un prix de revient bas, stable à la température ordinaire, inodore et insipide, et susceptible d'être facilement incorporé dans les aliments traditionnels pour en accroître la valeur nutritive.

Avant d'aborder les procédés de fabrication de ces concentrés protéiques de poisson (que les auteurs anglo-saxons nomment F.P.C. ou M.P.C., *Fish* ou *Marine Protein Concentrate*), rappelons que l'idée d'utiliser

L'abondance du poisson sur le littoral ouest de l'Amérique du Sud a conduit le Pérou (en particulier pour les anchois, photo ci-dessous) et le Chili à développer d'importantes industries de concentrés de poisson pour la nourriture animale (photo en bas de page). L'O.N.U. et la F.A.O. encouragent la réorientation de cette industrie vers la production de concentrés protéiques pouvant être consommés par l'homme.



PHOTOS F.A.O.

des concentrés de chair de poisson comme nourriture animale est relativement ancienne : il s'agit des farines de poisson.

LES FARINES DE POISSON

Dès la fin du XIX^e siècle, dans divers pays, on avait commencé de fabriquer industriellement, à partir de poissons entiers non commercialisables, un produit destiné à la supplémentation des tourteaux de céréales pour le bétail.

La farine de poisson contient tous les éléments des tissus frais, à l'exception d'une grande partie de l'eau, des huiles les plus légères et des vitamines éliminées par les procédés de fabrication. Produite en surabondance sur le plan mondial (près de 15 millions de tonnes en 1965), elle est fortement concurrencée par les protéines végétales. Elle n'est pas constituée uniquement de protéines, mais également de lipoprotéines et de lipides lourds, et a de ce fait un goût très prononcé qui en interdit la consommation par l'homme et imprègne fortement la chair des animaux qui s'en nourrissent. Il s'agit enfin d'un produit peu stable dans certaines conditions de température et d'humidité (phénomènes de rancissement liés à l'autoxydation des graisses, de prolifération bactérienne, etc.). On a donc cherché à améliorer les procédés de fabrication industrielle pour pallier ces divers inconvénients. Il s'agissait : d'une part, d'obtenir une farine de bonne qualité pour l'alimentation animale ; d'autre part, une poudre de protéines pures pour l'alimentation humaine.

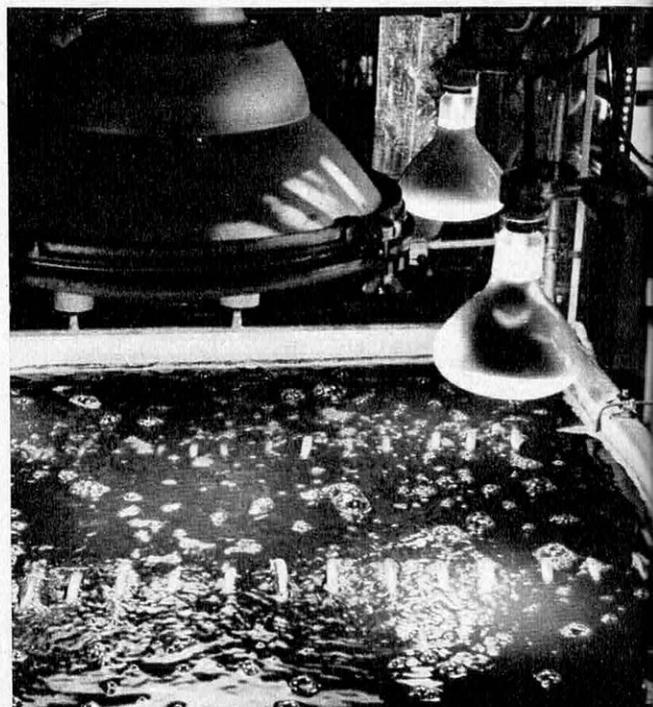
LES CONCENTRÉS DE PROTÉINES DE POISSON : LA VOIE AMÉRICAINE

Tous les procédés de fabrication de concentrés de protéines tendent essentiellement à éliminer de la chair des poissons la totalité des lipides, l'eau et certains sels minéraux présents en proportions dangereuses dans les os (cas du fluor).

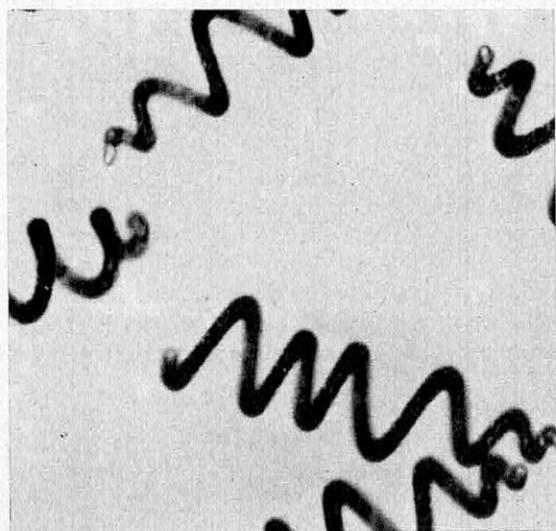
Parmi les trois grandes voies possibles (traitement physique, traitement chimique et traitement biologique), seuls les traitements par voie chimique ont atteint actuellement le stade industriel. Le plus connu d'entre eux, le procédé *Vio Bin*, a été développé à l'origine pour la délipidation des germes de blé.

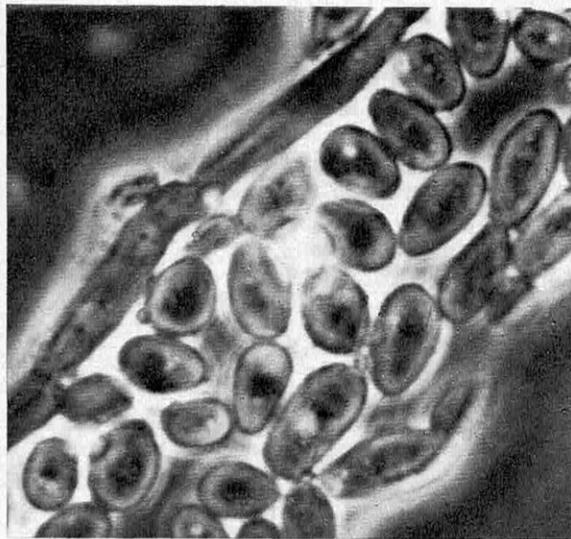
Le procédé *Vio Bin*, appliqué aux Etats-Unis à la délipidation des poissons (merlu), comprend deux stades. Durant le premier stade, le poisson broyé est mis en présence d'un solvant des lipides, le dichloréthylène. Le solvant résiduel est entraîné par un courant de vapeur et soumis à un traitement sous

Culture d'une algue bleue, la spiruline, au laboratoire, dans un bassin éclairé artificiellement : le courant de gaz carbonique envoyé dans le milieu pour l'entretien de la photosynthèse produit une agitation permanente qui évite l'accumulation des algues en surface, source d'un mauvais rendement. En bas de page, des spirulines vues au microscope, à faible grossissement.



DOCUMENTS I.F.P.





Autre source de protéines non traditionnelle, la culture de levures sur gasoil (photo ci-contre) semble appeler à d'importants développements. La photo ci-dessous montre, au premier plan, un « fermenteur » de 60 litres pour la production des levures. Après séparation des levures du gasoil résiduel, lavage, dessication, etc., on obtient un produit pulvérulent, testé depuis de nombreux mois sur diverses espèces animales (photo en bas de page).

vide. On obtient ainsi une farine de poisson non désodorisée, mais de bonne qualité, pour l'alimentation animale.

Le second stade du traitement utilise un solvant plus puissant, l'alcool isopropylique, susceptible d'entraîner les lipides masqués (lipoprotéines), et qui enlève en même temps les dernières traces de dichloréthylène. Cette étape fournit une poudre protéinique parfaitement désodorisée, utilisable pour l'alimentation humaine.

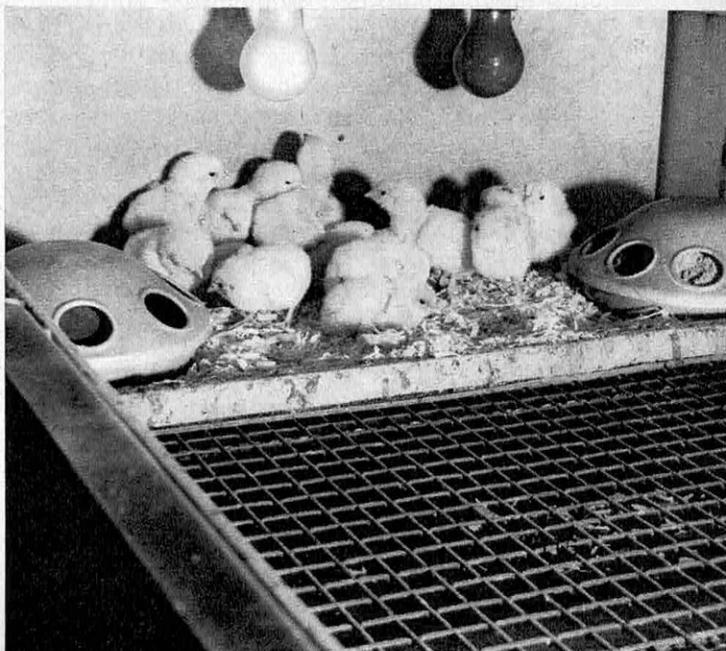
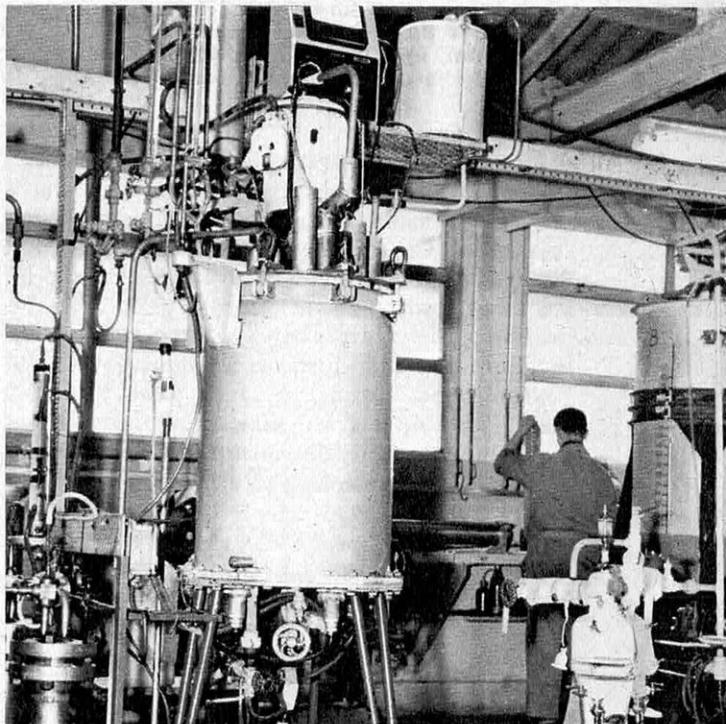
Parmi les autres procédés chimiques, il convient de citer le procédé Astra (le solvant choisi est l'alcool isopropylique) et celui mis au point par le Bureau des Pêches Commerciales de Etats-Unis. Il utilise également l'alcool isopropylique pour extraire les lipides et l'eau du poisson broyé qui circule à contre courant du solvant. La plus grande partie des arêtes est éliminée pour diminuer la teneur en fluor. Le produit final est une poudre blanche sans goût défini, parfaitement assimilable par l'homme.

Ce procédé a été développé à la demande du Ministère de l'Intérieur des Etats-Unis, dans le double but de lutter contre la faim dans le monde et d'utiliser des espèces non commercialisables.

Le gouvernement américain s'intéresse d'une autre manière au développement des concentrés de poisson. L'Agence pour le Développement International (A.I.D.) encourage l'utilisation du produit comme forme de protéines stables, incorporable dans la proportion de 5 à 10 % à des aliments traditionnels incomplets. Cet organisme a négocié, par exemple, l'envoi au Biafra de concentrés de protéines entrepris depuis quelques mois (un premier chargement de 11 tonnes est parvenu au Biafra en octobre 1968).

D'autres installations industrielles sont sur

DOCUMENTS PÉTROLES B.P.



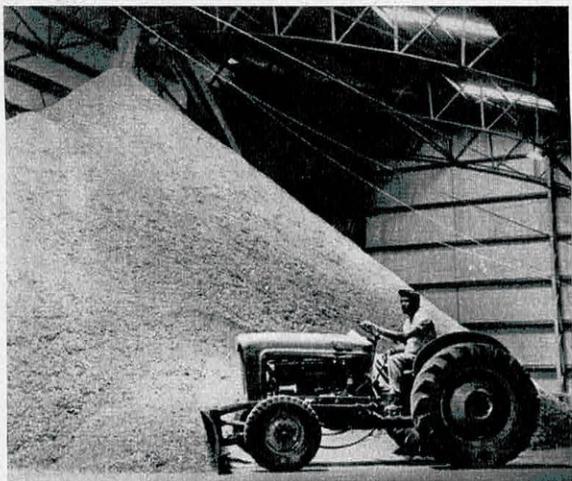


PHOTO I.P.S. - U.S.S.

L'extraction des protéines pour la consommation humaine hérite des techniques de production des farines de poisson, mises en œuvre sur une très large échelle depuis des années.

le point de démarrer ou en construction : l'usine flottante de Cap Flattery Co, dans l'Etat de Washington, et celle d'Oceanic Development Co à Salaverry au Pérou ; toutes deux utilisent le procédé Vio Bin. Le procédé mis au point par le Bureau des Pêches Commerciales fait l'objet d'une étude de développement industriel à l'Université du Texas.

Bien entendu, il a été nécessaire de préciser un certain nombre de normes. La Food and Drug Administration a établi les spécifications suivantes :

- protéines, plus de 78 % ;
- lipides, moins de 0,3 % ;
- humidité, moins de 10 % ;
- cendres, moins de 15 % ;
- fluor, moins de 100 parties par million ;
- alcool isopropylique, moins de 250 parties par million ;
- microorganismes, populations inférieures à 10 000/g (avec absence de colibacilles et de salmonelles).

Selon la taille et la situation géographique des usines, selon le prix d'achat du poisson, les estimations de prix de revient varient légèrement. On évalue de 4 F à 4,50 F le prix de revient industriel au kilogramme, soit un prix de vente au consommateur de 4,80 F à 6,20 F pour un prix d'achat du poisson à quai de 0,30 F.

LA VOIE FRANÇAISE : UNE MÉTHODE BIOLOGIQUE

En France, les méthodes d'extraction des lipides par voie chimique n'ont pas jusqu'ici été retenues. Une méthode biologique, dont le principe consiste à scinder par action en-

zymatique les grosses molécules protéiques en substances de poids moléculaires suffisamment bas pour qu'elles passent en solution dans l'eau, a été envisagée. Plusieurs organismes de recherche, privés ou publics, s'intéressent à cette méthode, avec certaines variantes d'un procédé à l'autre. En 1966, deux projets de recherches ont été proposés à la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique. Après étude complète des dossiers par un groupe d'experts, le projet présenté par le Laboratoire de Pharmacie chimique de la Faculté de Médecine et de Pharmacie de Nantes (Professeur Ploquin) a été finalement retenu par le CNEXO.

La technique consiste à séparer par voie physique (centrifugation en continu, par exemple) les graisses et les huiles surnageantes après l'hydrolyse des protéines. Le produit visé n'est pas constitué par un ensemble de protéines, telles qu'elles se présentent dans la chair des animaux et qu'on les obtient par les méthodes chimiques, mais contient surtout des molécules plus petites (polypeptides, peptides, éventuellement acides aminés).

Le procédé débute par le broyage du poisson frais entier. Dès cet instant, la libération des enzymes naturelles entame la dégradation des grosses protéines (phénomène d'autolyse). On obtient ainsi en moins d'une heure une pâte de poisson qui pourrait être commercialisée après aromatisation. Un apport d'enzymes exogènes poursuit le processus de rupture des grosses molécules. Pendant cette opération, il est indispensable de contrôler le degré d'acidité du milieu, pour le maintenir à la valeur pour laquelle l'enzyme choisie atteint son rendement optimal.

On obtient ainsi un hydrolysat total qui, après délipidation et concentration sous vide, fournit une poudre contenant 60 % environ de matières protéiques hydrosolubles ; on peut aussi séparer cet hydrolysat total en deux phases, un surnageant et un culot dans lequel se concentrent les protéines les plus grosses. Les huiles libérées durant la protéolyse, non dégradées par la chaleur, peuvent avoir des utilisations diverses. Elles contiennent, intactes, les vitamines liposolubles.

Au stade actuel des recherches, il n'est pas encore possible de définir de manière précise le processus industriel, et notamment les conditions d'élimination des lipides et des déchets. Il est cependant probable que les résultats de laboratoire pourront être transposés à l'échelle industrielle à bord des chalutiers. D'autre part, il n'est pas question actuellement de faire le bilan économique de cette méthode, et l'on ignore à peu près tout des



PHOTO F.A.O.

Près de Valparaiso, cette usine est spécialisée dans le traitement d'espèces non commercialement viables, voire de poissons avariés, pour la production de concentrés protéiques destinés aux animaux d'élevage.

possibilités de développement en France d'un marché pour les concentrés de protéines de poisson.

Il convient enfin d'ajouter que le programme de recherche comporte un aspect particulier : l'étude du fractionnement de l'hydrolysat par l'action de colloïdes extraits d'algues, les carraghénanes. Ces colloïdes semblent capables de précipiter sélectivement une gamme de protides de poids moléculaires définis, ou du moins compris dans un intervalle assez restreint. Il serait alors possible d'isoler certaines substances ayant une valeur thérapeutiques ou diététique particulièrement élevée. Il est encore trop tôt pour se prononcer sur l'avenir industriel et commercial du procédé biologique. Le fait que les Etats-Unis, qui possèdent une bonne expérience des traitements par voie chimique, considèrent le traitement enzymatique comme une solution, constitue une pièce importante.

L'AVENIR DES CONCENTRÉS DE PROTÉINES

Les recommandations des experts du Comité consultatif sur l'application de la science et de la technique au développement, émises en 1966, conservent aujourd'hui toute leur valeur :

— « Encourager la production de concentrés protéiques de poisson pour la consommation humaine dans les pays en voie de développement ayant des ressources halieutiques importantes, ainsi que la base d'une grande industrie des pêches. »

— « Encourager l'utilisation des concentrés protéiques de poisson dans ces pays. »

Il n'en demeure pas moins qu'un effort im-

portant devra être fait pour l'ouverture des marchés. En effet, on se heurtera certainement aux habitudes alimentaires, et des études, commerciales, publicitaires et techniques sont indispensables pour présenter le produit sous une forme qui ne s'oppose pas aux traditions. Une tentative de vente de poudre de poisson dans les pharmacies marocaines, entreprise il y a quelques années par la F.A.O., ne donna pas les résultats escomptés, bien qu'une action d'information et de publicité ait été faite au préalable. Il ne faut pas oublier non plus que des millions de personnes souffrant de carences protéiques particulièrement graves se refusent, aux Indes, à manger certaines viandes.

Si, aux Etats-Unis, une publicité bien faite permet de prévoir un intérêt auprès des consommateurs (ceci d'autant plus qu'il s'agit de populations sensibilisées à l'aspect diététique de la nutrition), dans bien d'autres pays développés de l'ancien monde, on se heurtera aux préjugés sur les aliments « non-naturels ». Chez ces populations, les concentrés protéiques de poisson risquent fort d'apparaître comme un succédané, et une certaine méfiance est à prévoir. On peut admettre qu'une première étape a été franchie dans cette « réforme alimentaire » par la consommation de produits lyophilisés (potages en sachet, café, etc.). Les possibilités d'incorporation des concentrés de protéines à des aliments classiques permettront peut-être de leur ouvrir un marché important.

Encore ne s'agit-il là que de pays pour lesquels le problème des carences protéiques n'est pas sensible. Dans certains pays en voie de développement, pourtant les premiers intéressés, il est particulièrement difficile de combattre les préjugés, d'entrer en lutte contre les croyances ou simplement les traditions. L'incorporation de concentrés de protéines à des aliments traditionnels est certes possible, mais il faudra alors envisager les prix de vente comparés du produit naturel et de sa variante supplémentée.

Etant donné l'intérêt d'ordre très général des recherches sur les concentrés de protéines de poisson, le CNEXO a inscrit dans son programme la poursuite des efforts en cours, leur développement ultérieur en fonction des résultats, et plus généralement toutes recherches tendant à valoriser les produits et les sous-produits de la pêche par extraction des protéines alimentaires qu'ils contiennent. Le passage des recherches de laboratoire au stade industriel est proche, mais il devra être précédé de sérieuses études de marché.

Lucien LAUBIER
Conseiller Scientifique au
CNEXO.

BESOINS EN EAU ET DESSALEMENT

*« De l'eau,
partout de l'eau
et pas une goutte à boire ! »
Le dit du vieux marin
(Coleridge)*

L'eau est souvent considérée comme une matière inépuisable à la disposition des habitants de notre planète. La prise de conscience du fait que l'eau pose aujourd'hui des problèmes graves, même dans les pays tempérés, est relativement récente. A l'échelle mondiale, on estime que le volume d'eau présent est supérieur à un milliard de km³ et que la consommation humaine est de l'ordre d'un millier de km³ par an. Il semblerait donc ne pas y avoir de problème.

Malheureusement, les ressources sont localisées en quasi-totalité dans les océans, dont les eaux contiennent environ 35 g de sel par litre.

Si l'eau a toujours représenté une condition majeure pour le développement des sociétés humaines, son importance économique, pour satisfaire les besoins, croît chaque jour de façon plus sensible. Nous situerons donc cet exposé dans un cadre économique, en évoquant successivement les aspects de la demande et de l'offre d'eau dessalée et les perspectives d'utilisation des techniques du dessalement.

LA DEMANDE D'EAU

Le problème de l'approvisionnement en eau se pose aussi bien dans le cadre d'une économie insuffisamment développée que dans

celui d'une économie développée. Que ce soit au Moyen-Orient ou aux Etats-Unis, en Afrique Noire ou en France, les besoins en eau, même s'ils ont des causes et des intensités différentes, sont aussi pressants à satisfaire.

Les ressources en eau conditionnent en effet directement le développement d'une région déterminée. Leur rareté provoque donc des « goulets d'étranglement » économiques. Si on cherche à situer les besoins spécifiques en eau, on obtient les ordres de grandeur suivants :

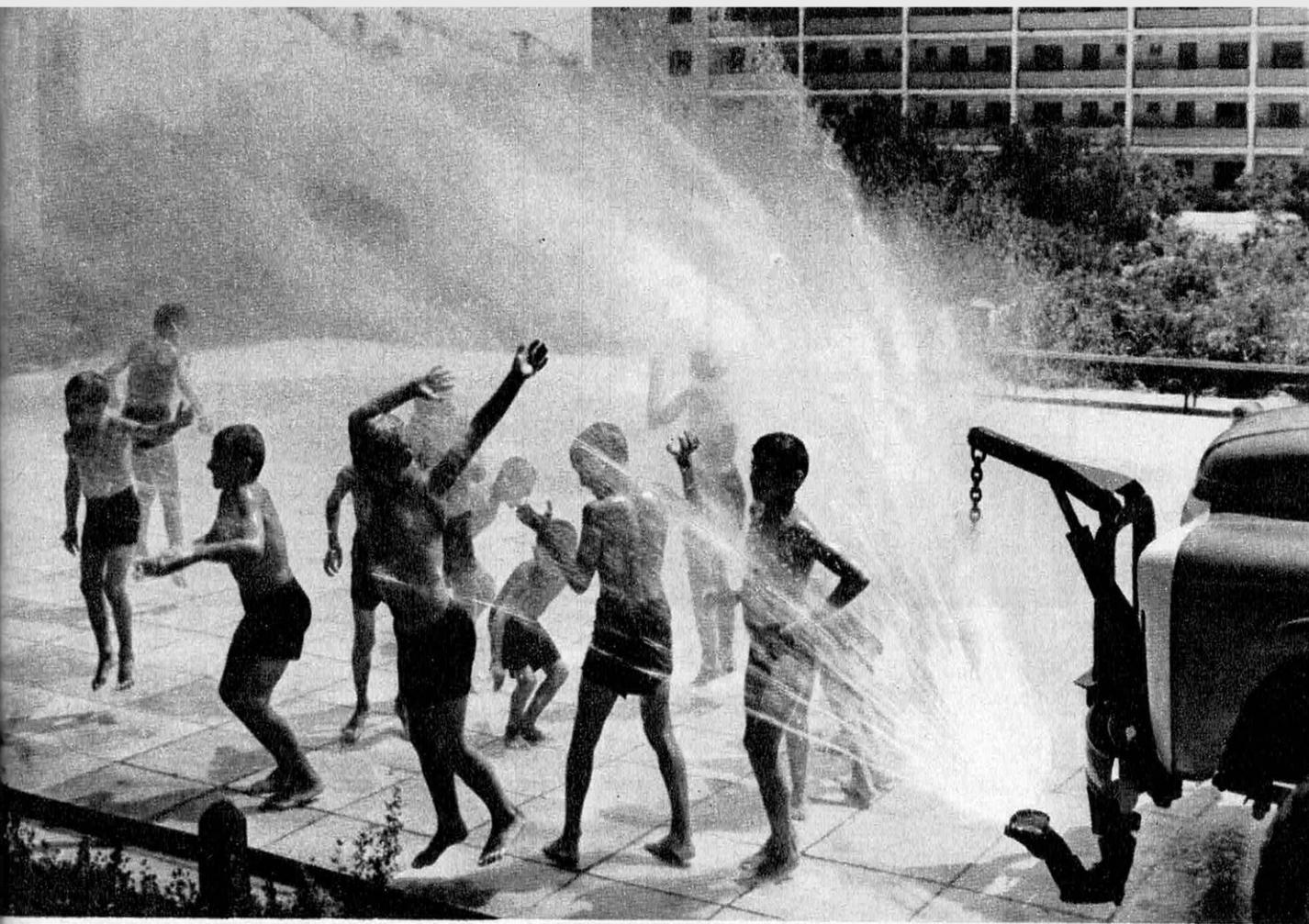
- 10 000 m³ par jour correspondent, par exemple, à l'alimentation d'une savonnerie de 5 000 à 7 000 tonnes par an, aux besoins agricoles de 4 à 10 hectares de terre en région semi-aride, ou aux besoins d'une ville de 4 000 habitants aux Etats-Unis.
- 100 000 m³ par jour permettent d'alimenter une usine de caoutchouc synthétique de 15 000 à 20 000 tonnes par an.
- 1 000 000 de m³ par jour sont nécessaires pour une usine d'aluminium de 200 000 à 300 000 tonnes par an.

Outre les zones arides, il existe d'autres régions qui souffrent d'une pénurie d'eau douce. De nombreuses îles, par exemple, ont de très faibles ressources d'eau souterraine et doivent uniquement compter sur l'eau de pluie. Plusieurs d'entre elles ont ainsi été parmi les premiers territoires à installer des usines de dessalement de l'eau de mer. Certaines régions surpeuplées sont aujourd'hui placées dans un dilemme semblable : se procurer de l'eau à un coût élevé ou souffrir d'une pénurie en constante aggravation.

Quant à la distribution des eaux naturelles convenant à l'irrigation, base d'une agriculture moderne, elle laisse particulièrement à désirer et le transport de telles eaux n'est réalisable qu'en faible quantité et à très grands frais. On risque donc de voir apparaître, en de nombreuses régions critiques, un grave déséquilibre entre les nécessités de l'expansion économique et les ressources en eau douce.

De même que la planification des besoins énergétiques a été depuis longtemps rendue impérative, il devient nécessaire de définir avec précision le rythme minimum des investissements permettant d'éviter tout frein au développement local, régional ou national qui pourrait être causé par l'insuffisance de l'approvisionnement en eau.

La dépense d'eau a une influence plus ou moins grande sur le prix de revient du produit fabriqué ou récolté et sur les bénéfices. Négligeables vis-à-vis d'efforts industriels très importants, le coût de l'eau intervient en particulier en agriculture lorsque le re-



**Ville champignonnée sur les bords de la Caspienne
des besoins de l'exploitation pétrolière, Chevtchenko est alimentée en eau douce
par une usine de distillation de l'eau de mer couplée à une centrale nucléaire.**

venu est limité par les conditions du marché local ou national des produits correspondants (exemple : production de pommes de terre).

De plus, la qualité exigée de l'eau varie suivant l'usage.

Usage	Teneur maximum en sels(g/l)
Consommation humaine (eau douce)	< 0,5
Chaudière haute-pression	0,01
Eaux industrielles	0,1
Toutes irrigations	0,5
La plupart des irrigations	1

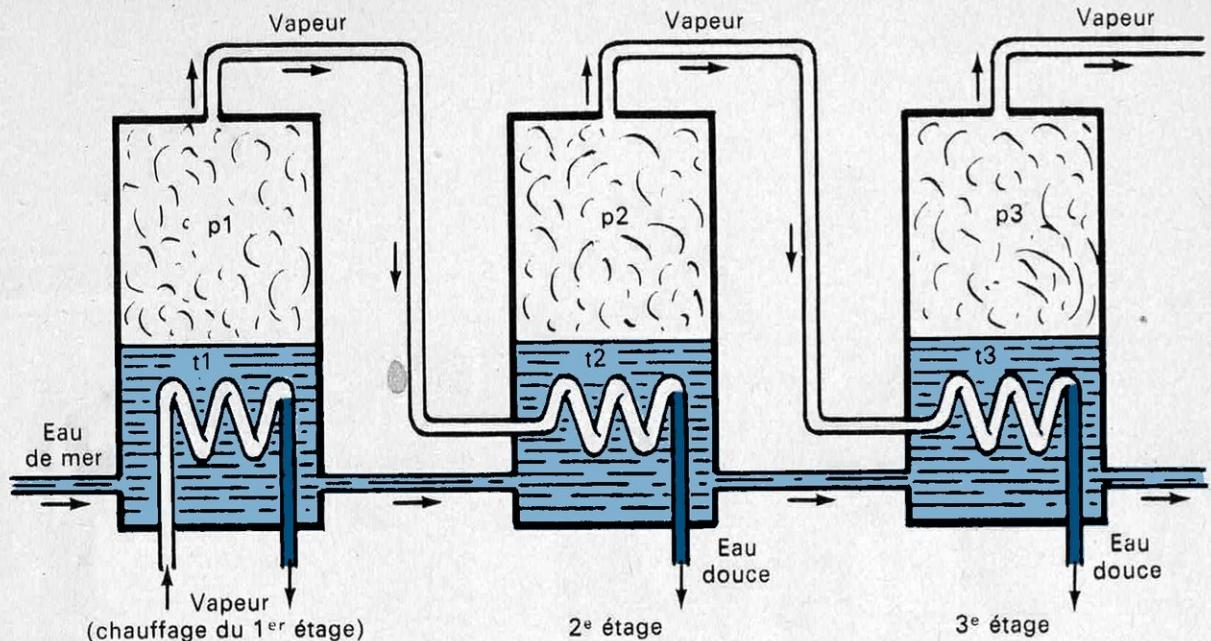
Il existe donc pour le marché de l'eau de larges zones d'inélasticité au prix de revient de cette eau. La demande est d'autant plus inélastique que la rareté de l'eau et son importance comme goulot d'étranglement sont plus grandes. Cette remarque introduit l'intérêt des procédés de production d'eau par des moyens très élaborés, donc chers, comme le dessalement de l'eau de mer. Certaines zones arides sont susceptibles d'une valorisation rapide par la présence de

l'eau. Plus la zone est aride, plus la valorisation est importante, car plus la valeur des produits qu'elle permet d'obtenir à d'importance économique pour le territoire (à condition, bien entendu, que cette valorisation débouche sur un marché intérieur ou extérieur).

La demande, au total, peut, du point de vue économique, être décomposée en trois zones : — une zone de consommation domestique, caractérisée à la fois par un prix limite correspondant au maximum que les familles puissent consentir à payer pour l'eau dans une société organisée, et par le caractère non élastique de la demande par rapport au prix ;

— une zone de consommation industrielle et agricole pour laquelle la quantité demandée est fonction du revenu entraîné par l'usage de l'eau. Le prix correspond à la valeur d'usage : prix que l'on est disposé à payer pour utiliser l'eau ;

— une zone de consommation erratique, correspondant à des usages qu'il est difficile de rattacher à un critère de rentabilité et qui n'intervient que lorsque les besoins des deux premières zones sont satisfaits.



La distillation de l'eau de mer par le procédé à multiple effet utilise des bouilleurs en série, constituant autant d'étages où l'eau salée est portée à ébullition par la vapeur obtenue à l'étage précédent.
Température et pression vont en décroissant d'un étage à l'autre.

Le profil général de la demande, correspondant à ces trois zones, peut être représenté graphiquement par la figure page 123. Il est vraisemblable que les grandes installations de dessalement faisant intervenir l'énergie nucléaire auront une production située dans la zone des besoins industriels et agricoles. En effet, les besoins élémentaires seront alors probablement couverts par des ressources classiques (puits, etc.). Ce n'est que dans le cas de l'industrialisation rapide d'une région que les besoins individuels pourront être satisfaits par une installation ou un groupe d'installations nucléaires couvrant l'ensemble de la courbe.

En France, la consommation moyenne globale n'est à l'heure actuelle que de 500 m^3 par an et par habitant, compte tenu de toutes les utilisations de l'eau. Elle se situe donc à mi-chemin entre celle des Etats-Unis : $1\ 500 \text{ m}^3$, et celle d'un pays en voie de développement : $15 \text{ à } 50 \text{ m}^3$.

En France, ces 500 m^3 se répartissent approximativement comme suit :

- 1 m^3 correspond à l'usage vital (boisson et cuisson des aliments) ;
- $50 \text{ à } 80 \text{ m}^3$ représentent les usages dits domestiques et urbains ;
- plus de 400 m^3 vont aux usages « économiques » : industrie et agriculture.

La consommation par habitant évoluant en fonction du niveau de développement économique, le progrès technique se joint à

l'expansion démographique pour déterminer son accroissement. La progression en France avoisine le doublement tous les 15 ans. Les besoins totaux, de 30 milliards de m^3 en 1955, s'élèveront à 57 milliards de m^3 dès 1970, et dans un pays relativement riche en eau comme la France, on peut prévoir que dans 10 ans la consommation (recyclage exclu) atteindra plus du quart des ressources totales. Mais le problème n'est pas seulement celui d'une consommation moyenne à satisfaire. C'est aussi celui de « pointes » et d'« étiages ». Ainsi, tant à cause de la pollution qui réduit de manière notable les ressources globales que par suite de leur répartition inégale, les ressources nationales en eau douce risquent de s'avérer insuffisantes dans plusieurs régions bien avant la fin du siècle.

Encore faut-il considérer que certaines régions font d'ores et déjà l'objet de planification pour l'eau d'irrigation et que, dans les régions industrielles du Nord, de l'Est et du Bassin Parisien, des mesures sévères d'économie doivent être prises.

L'OFFRE : LES TECHNIQUES DE DESSALEMENT

Il faut tout d'abord souligner la grande diversité des techniques qui utilisent des phénomènes physiques ou chimiques bien connus pour séparer l'eau du sel ou inverse-

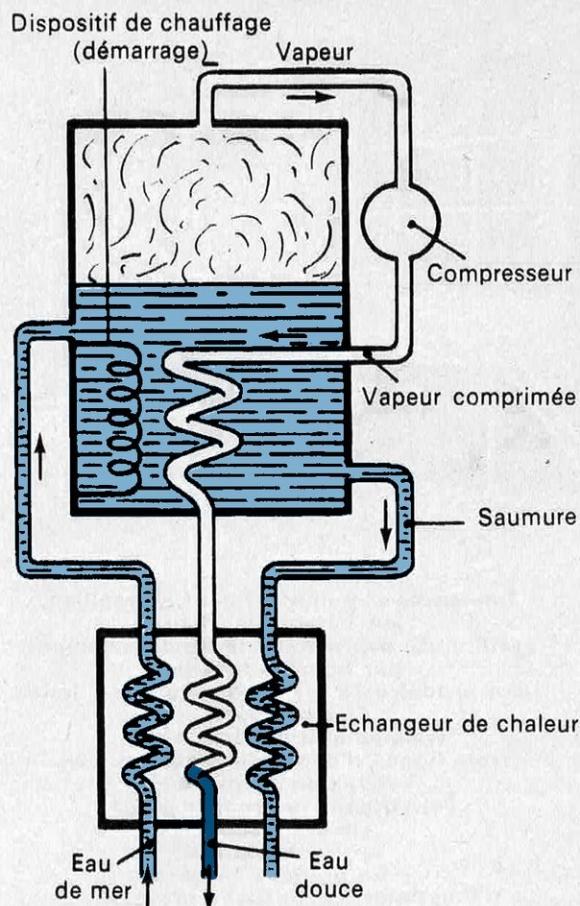
ment. Le choix d'un procédé plutôt que d'un autre est essentiellement un problème économique. La gamme des besoins à couvrir est en effet vaste : 100, 1 000, 10 000 m³ par jour, et on envisage même de grandes installations allant de 100 000 à 500 000 m³ par jour.

Ces divers procédés n'ont pas la même sensibilité aux phénomènes d'échelle. Ils peuvent donc être sélectionnés en fonction de l'importance des besoins. Le coût de l'énergie dont on dispose a également une influence sur ce choix.

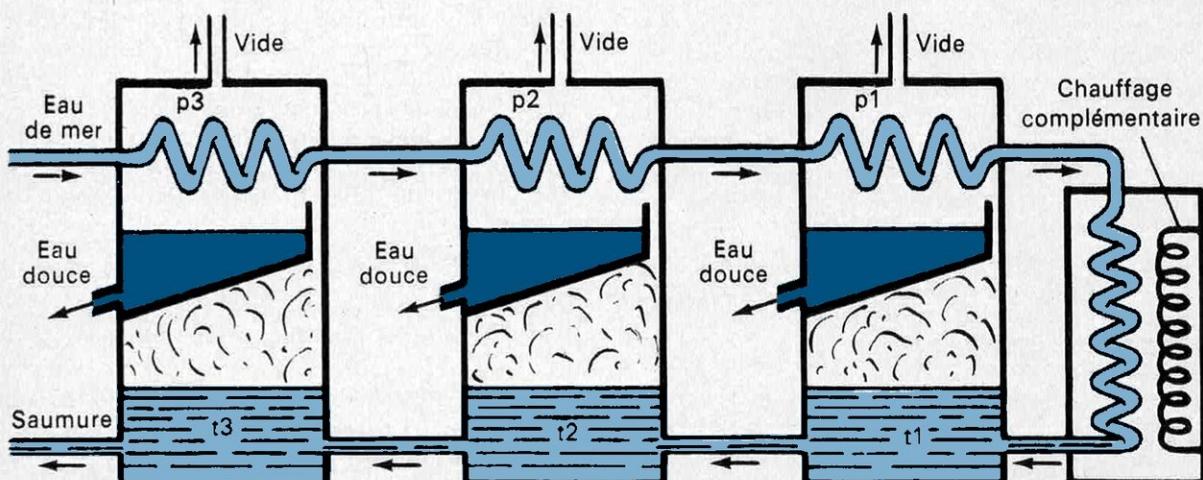
A titre indicatif, le tableau ci-dessous donne les consommations d'énergie correspondant à quelques-unes des techniques mentionnées.

Procédés	Énergie de dessalement (en thermies par m ³)	
	Tech-nique 1963	Estima-tion 1980
Distillation à effets multiples	67	41
Distillation par détentes successives	67	41
Congélation	41	24
Osmose inverse	35	21
Electrodialyse (eau saumâtre)	17	10

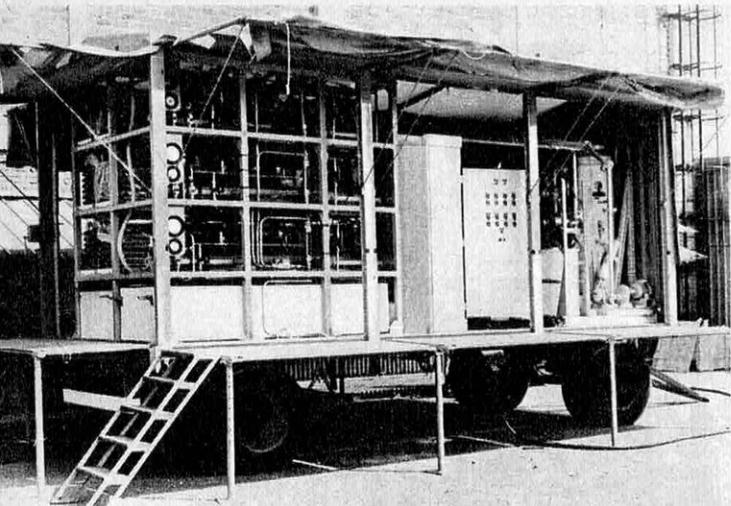
Ce tableau montre que ce sont les techniques de distillation qui réclament la plus grande quantité d'énergie. Ce sont aussi les mieux connues et celles qui s'appliquent le mieux à grande et même très grande échelle. Aussi les plus grosses usines de dessalement nous apparaissent-elles, dans l'avenir,



La méthode par compression de vapeur fonctionne généralement avec un bouilleur unique : la vapeur produite, échauffée par compression, entretient l'ébullition de l'eau de mer. En l'absence d'étages en série, les calories évacuées par la vapeur et la saumure sont récupérées dans un échangeur de chaleur.



Plus économique que la distillation vraie, l'évaporation éclair utilise le vide partiel créé à l'intérieur de chaque étage pour dessaler l'eau de mer au-dessous de son point d'ébullition. Dans le dispositif représenté ici, l'eau de mer est préchauffée au contact de la vapeur des étages successifs.



Implantée en juillet dernier à Marseillan, sur l'étang de Thau, cette unité expérimentale de dessalement par osmose inverse peut produire 15 m³ d'eau douce par jour.

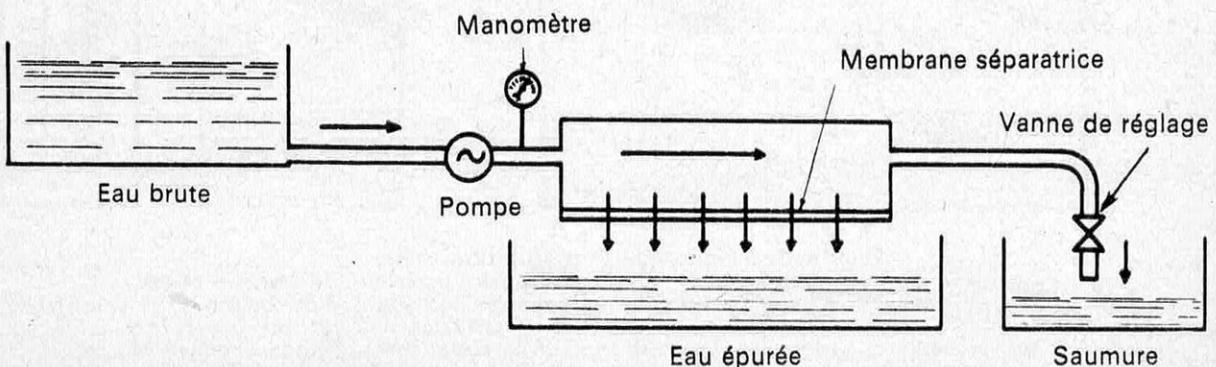
Elle comporte, visibles à la partie gauche, trois lignes d'osmoseurs superposés, deux en parallèle constituant le premier étage la troisième, le second étage. Le premier étage, fonctionnant sous une pression de 70 bars, fait passer la teneur en sels de 36 à 3 g par litre environ. Le second étage donne, sous 60 bars, une eau à 0,3 g de sels par litre seulement. Chaque ligne d'osmoseurs fonctionne selon le schéma en bas de page.

comme des installations géantes de distillation alimentées en vapeur par des chaudières de tailles considérables.

Parmi les procédés de *distillation*, on distingue la distillation à *simple effet*, où l'eau de mer, introduite dans un bouilleur, est chauffée et évaporée par de la vapeur circulant dans des tubes immergés. L'eau douce est produite par condensation de la vapeur. La distillation à *multiple effet* fait intervenir plusieurs « étages » en série. Le premier étage seul est chauffé par un apport extérieur de vapeur. La vapeur produite dans le premier étage sert à évaporer l'eau de mer du second étage, en se condensant en eau douce par refroidissement ; la vapeur produite dans le second étage est dirigée sur le troisième étage, etc. Il y a évidemment perte de chaleur dans le transfert de la vapeur d'un étage à l'autre, mais la déperdition est compensée en faisant travailler chaque étage à une pression plus basse que le précédent.

Les procédés par *évaporation éclair* travaillent sur l'eau de mer chauffée, mais non bouillante. Dans le procédé à *simple effet*, l'eau de mer chauffée est introduite dans une chambre maintenue à une pression inférieure à la pression de saturation de l'eau de mer à la température de fonctionnement. Une partie de l'eau de mer est vaporisée instantanément, puis condensée en eau douce. L'évaporation éclair à *multiple effet* fait passer l'eau de mer résiduelle à travers plusieurs étages avec perte de chaleur et pression plus faible dans chacune des enceintes successives.

La distillation par *compression de vapeur* repose sur l'élévation de température produite au sein d'une masse de vapeur lorsqu'on la comprime. L'eau de mer évaporée à l'intérieur d'un bouilleur est comprimée et repasse dans un tube immergé au sein de l'eau de mer renouvelée où elle permet la poursuite de l'évaporation. La vapeur achève de se refroidir au passage à travers un échangeur de chaleur placé en amont de l'arrivée d'eau de mer. On recueille de l'eau douce à la sortie de cet échangeur.

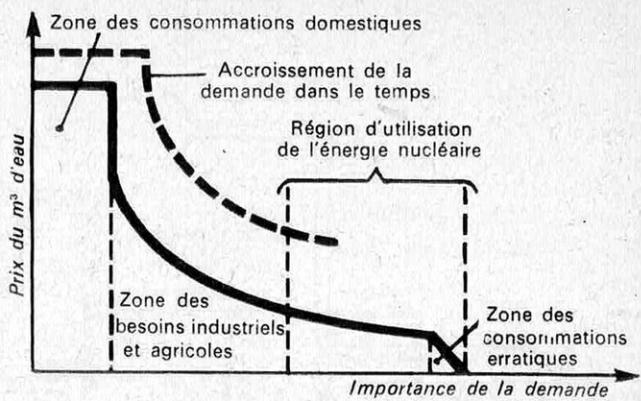


L'électrodialyse est basée sur la dissociation des sels dissous dans l'eau de mer ou l'eau saumâtre en ions chargés négativement et positivement et sur la possibilité de séparer ces ions par application d'un champ électrique. Une unité de dessalement par électrodialyse comprend une série de cellules parallèles séparées par des membranes alternativement perméables aux anions (chargés négativement) et aux cations (chargés positivement) ; l'eau à traiter est admise dans une cellule sur deux. L'application d'un champ électrique aux deux extrémités de l'unité de dessalement provoque le passage des ions dans les cellules intercalaires. Au terme du processus, les cellules contiennent, alternativement, de l'eau douce et une saumure.

Il existe plusieurs variantes, plus ou moins complexes, des procédés de *congélation*. Ceux-ci consistent, en gros, à extraire l'eau douce d'une solution saline sous forme de cristaux de glace. Dans la congélation *directe*, de l'eau de mer froide est pulvérisée à l'intérieur d'une enceinte où l'on a fait le vide. L'évaporation produit le refroidissement d'une partie de la solution, où se forment de petits cristaux de glace en suspension dans la saumure. La vapeur est pompée à l'extérieur et comprimée. De son côté, la suspension de glace dans la saumure est pompée à l'intérieur d'une cellule de lavage où un courant d'eau douce coule vers le bas. Les cristaux, plus légers, flottent sur la saumure. Lavés et séparés de celle-ci, ils fondent au contact de la vapeur comprimée en donnant de l'eau douce. La congélation *indirecte* emploie un réfrigérant non miscible à l'eau, dont la tension de vapeur est beaucoup plus élevée que celle de l'eau de mer avec laquelle il est mis en contact direct. Le solvant s'évapore et refroidit le reste du liquide, avec formation de cristaux de glace. Le procédé à *l'hydrate* utilise des hydrocarbures condensés de faible poids moléculaire (propane), qui se combinent avec l'eau pour former des cristaux d'hydrate. La chaleur produite par la formation des cristaux est évacuée par la vaporisation de l'excédent de propane. Les cristaux d'hydrate lavés à l'eau douce sont ensuite décomposés en eau et propane qui se séparent par décantation.

Les procédés de purification par *échange d'ions*, surtout utilisés à petite échelle, mettent en œuvre des résines synthétiques capables de fixer les unes les anions, les autres les cations présents dans l'eau, en libérant à leur place des ions hydrogène et oxydryle caractéristiques de l'eau pure.

Une autre technique est le dessalement de l'eau par *échange liquide-liquide* : certains



Les trois « zones » de la demande d'eau douce, fonction de l'importance de la demande et du prix que le consommateur est prêt à payer.

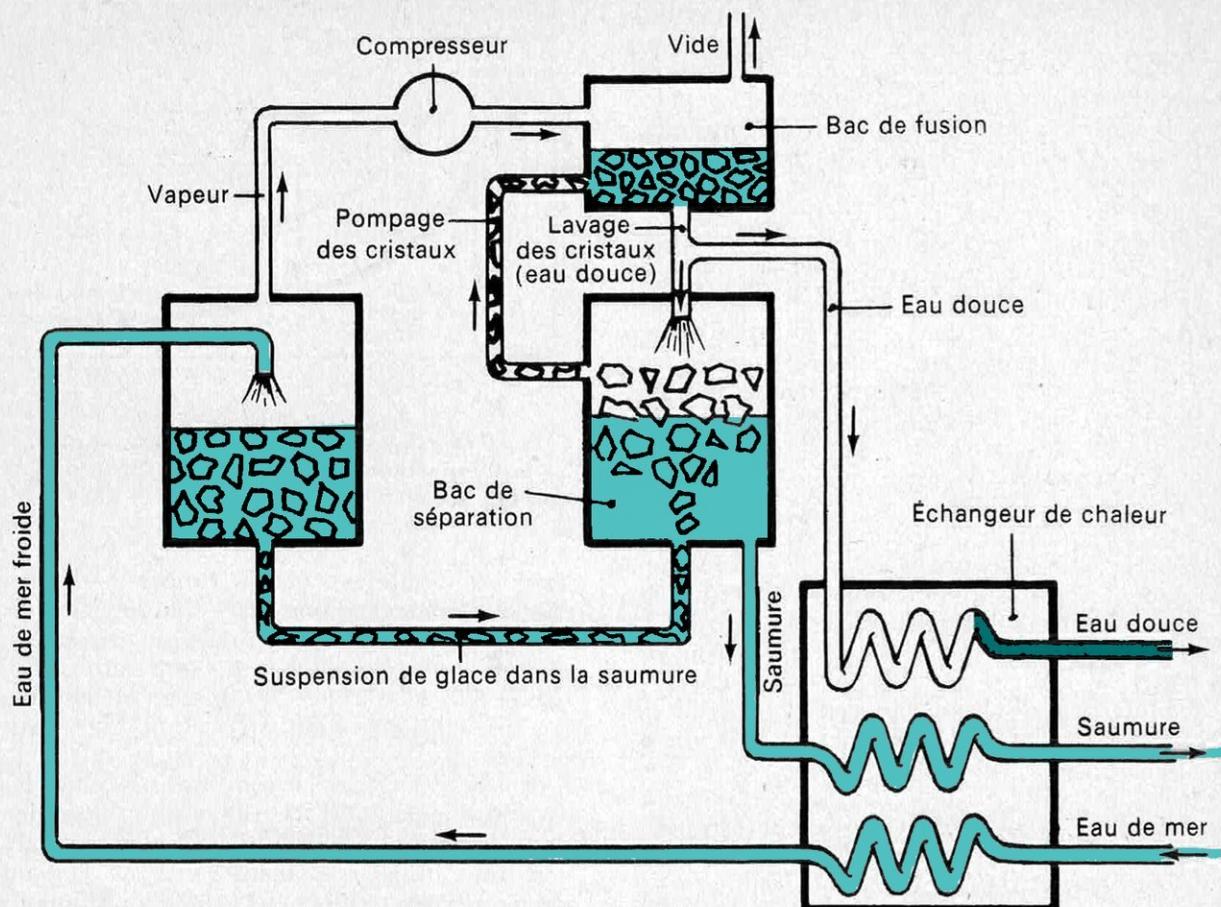
liquides organiques ont la propriété de former au contact d'une eau chargée en sels des solutions plus concentrées en eau à basse température qu'à haute température. Séparée de la saumure résiduelle, la solution est réchauffée, d'où séparation de l'eau douce.

L'osmose des ions, surtout utilisée pour les eaux saumâtres, est basée sur la différence de concentration entre deux solutions salines. Elle utilise des membranes ne laissant passer qu'une seule catégorie d'ions (anions ou cations). Par rapport à l'électrodialyse, évoquée plus haut, ce procédé ne nécessite aucune source d'énergie, sauf celle nécessaire au pompage des liquides.

L'osmose inverse consiste à mettre en présence de part et d'autre d'une membrane semi-perméable (perméable à l'eau mais non aux sels dissous) de l'eau de mer ou saumâtre et de l'eau douce. Dans les conditions normales, l'eau douce tend à passer du côté de l'eau de mer sous l'effet de la pression osmotique engendrée par les sels dissous. Mais, si l'on exerce du côté de l'eau de mer une pression supérieure à la pression osmotique, le phénomène s'inverse et l'eau salée se concentre par abandon d'eau douce qui franchit la membrane. La difficulté est de se procurer des membranes capables de résister aux pressions considérables (plusieurs dizaines d'atmosphères) nécessaires dans ce procédé.

DESSALEMENT OU MOYENS CLASSIQUES D'APPROVISIONNEMENT EN EAU ?

Si le prix de l'eau est un facteur souvent secondaire pour les usages domestiques, il n'en est pas de même pour les usages industriels où il faut rechercher l'approvision-



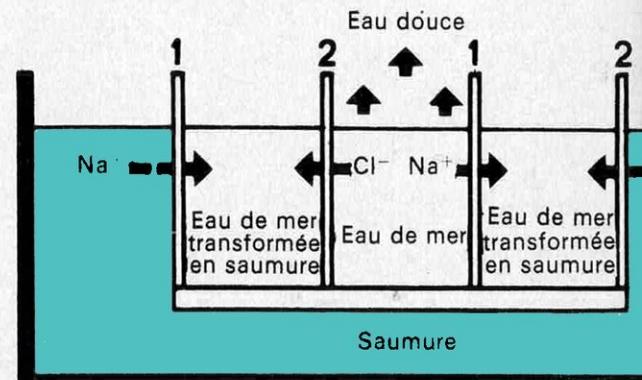
De principe assez simple, les procédés de dessalement par congélation sont de réalisation pratique beaucoup plus complexe.

Encore la technique décrite ici, du type « congélation directe », est-elle parmi les plus simples. L'avantage de ces procédés est une dépense d'énergie assez faible.

nement le moins cher. Le coût des techniques de dessalement est donc à comparer avec celui d'un approvisionnement en eau douce pouvant nécessiter stockage, transport et épuration.

Le dessalement est à coup sûr concurrentiel dans un certain nombre de cas. C'est ainsi que la production d'eau potable à partir d'une installation de dessalement solaire pour l'exploitation de la mine de Los Salinas au Chili en 1872, suivie de la première fourniture commerciale de l'installation de distillation de 1 m³ par jour en 1884, se compare favorablement à l'autre alternative possible qui est le stockage d'eau douce dans un navire. Il en est de même aujourd'hui pour les usines de taille moyenne (3 000 à 6 000 m³ par jour, et même au-delà) construite au bord de déserts ou dans les îles, lorsque les moyens concurrents devraient être un transport d'eau douce sur plusieurs centaines de kilomètres.

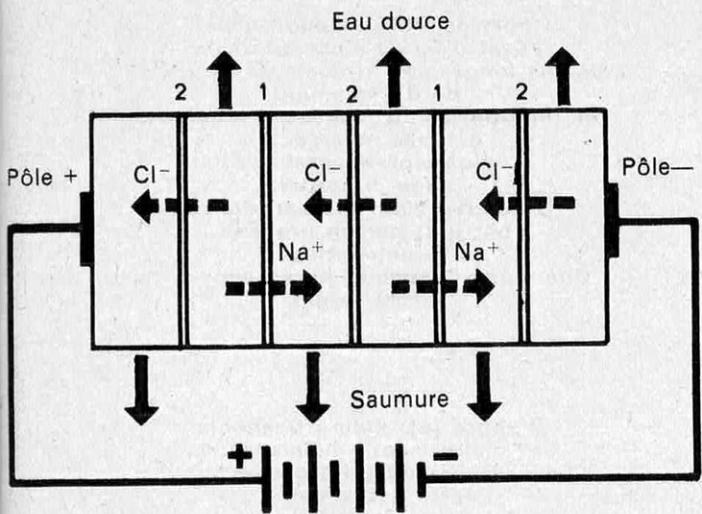
De plus, le dessalement se compare favorablement à la déminéralisation pour la production de certaines eaux industrielles de qualité particulière, malgré la concurrence



1. Membrane perméable aux cations (Na^+)
2. Membrane perméable aux anions (Cl^-)

L'osmose des ions est basée sur l'utilisation de membranes sélectives perméables aux ions chargés positivement ou aux ions chargés négativement.

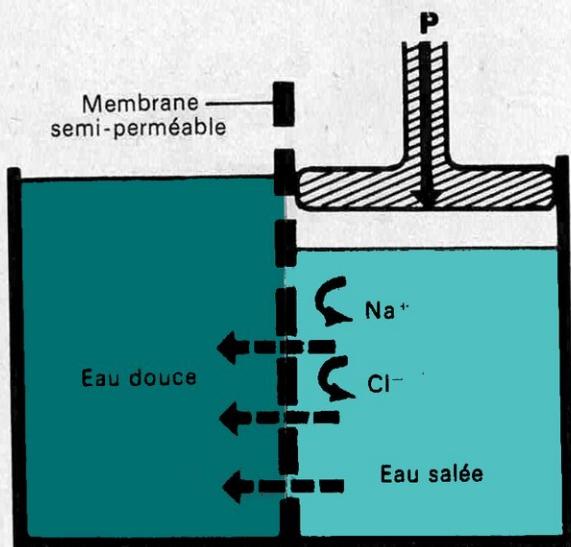
Le compartiment central, rempli d'eau de mer au début de l'opération, s'appauvrit en sels pour rétablir l'équilibre ionique à l'intérieur des compartiments latéraux, où passent des ions provenant de la saumure très concentrée du compartiment extérieur.



1. Membrane perméable aux cations (Na^+)

2. Membrane perméable aux anions (Cl^-)

Comme l'osmose des ions, l'électrodialyse met en jeu des membranes sélectives séparant des « cellules » en série, remplies d'eau de mer au début de l'opération.
Le déplacement des ions est déterminé non par un simple jeu de concentrations différentielles, mais par l'application d'un champ électrique aux bornes de la batterie de cellules.



Osmose inverse :
une membrane semi-perméable (perméable à l'eau mais beaucoup moins aux sels) est placée entre deux compartiments contenant l'un de l'eau douce, l'autre de l'eau salée maintenue sous pression ; le passage de l'eau pure s'inverse par rapport aux conditions normales.

sévere de moyens d'approvisionnements classiques.

Dans presque tous les pays, les volumes d'eau apportés par les pluies sont de beaucoup supérieurs au volume total des consommations, mais cette eau est en majeure partie perdue par évaporation, par l'écoulement des fleuves et des nappes souterraines dans les océans.

Le problème de l'approvisionnement en eau peut ainsi se ramener dans une assez large mesure à satisfaire les besoins en période de sécheresse, grâce au volume d'eau retenu au moment où les disponibilités sont excédentaires. Il faut donc disposer pour cela de stockages superficiels ou souterrains. Ainsi, en France, actuellement, le problème n'est pas tellement d'accroître l'approvisionnement global, mais de disposer d'eau en quantité suffisante pour pouvoir la distribuer durant les périodes et dans les régions où risque de survenir un déficit.

Quoi qu'il en soit, il est clair que tous les grands ouvrages d'adduction d'eau ou tous les procédés nouveaux de dessalement qui seront envisagés pour faire face aux besoins d'eau supplémentaires nécessiteront un capital très important en moyens financiers, en potentiel de fabrication de gros équipements, et en personnel qualifié. Cela signifie que le bénéfice attendu de l'approvisionnement en eau devra être comparé avec les bénéfices attendus d'autres utilisations de ce capital (exploration spatiale, nouveaux types de transport, urbanisation plus rationnelle, etc.).

S'il peut paraître séduisant, à première vue, de classer les principaux procédés de dessalement selon des zones préférentielles, les procédés à membranes étant particulièrement désignés pour les installations petites ou moyennes de quelques centaines à quelques milliers de m^3 par jour et s'adressant plus spécialement aux eaux saumâtres, tandis que les fortes productions à partir d'eau de mer feraient surtout appel aux procédés de distillation, ce classement sommaire est surtout issu de considérations historiques et d'un certain état de la technologie. Il faut tenir compte, en particulier, de la rapidité d'évolution des techniques. On assiste actuellement au développement des principaux procédés à membranes vers les grandes tailles et vers l'application à l'eau de mer, tandis que des procédés tels que la congélation commencent à trouver une application concrète à grande échelle. Cette évolution peut remettre en question les connaissances acquises sur le coût de l'énergie nécessaire pour faire fonctionner des installations de type classique par distillation par exemple.

PERSPECTIVES ÉCONOMIQUES DU DESSALEMENT

— Des tranches d'usine de dessalement produisant 4 000 m³ d'eau douce par jour fonctionnent déjà d'une manière satisfaisante. Des constructeurs sont prêts à fournir des installations produisant 20 000 m³ par jour. Des usines d'une taille unitaire encore plus grande sont certainement possibles et seraient plus rentables.

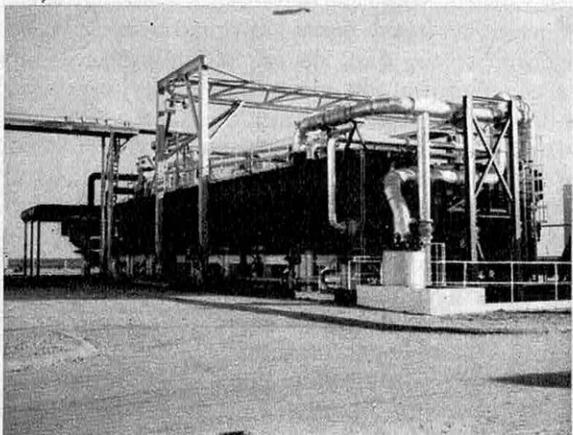
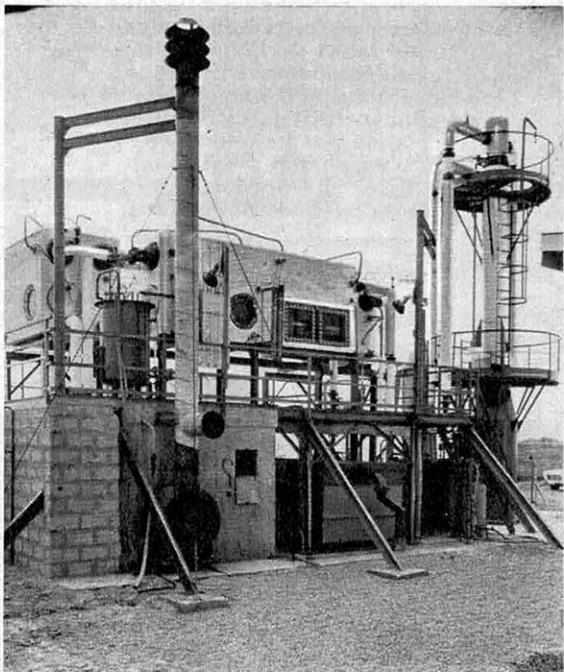
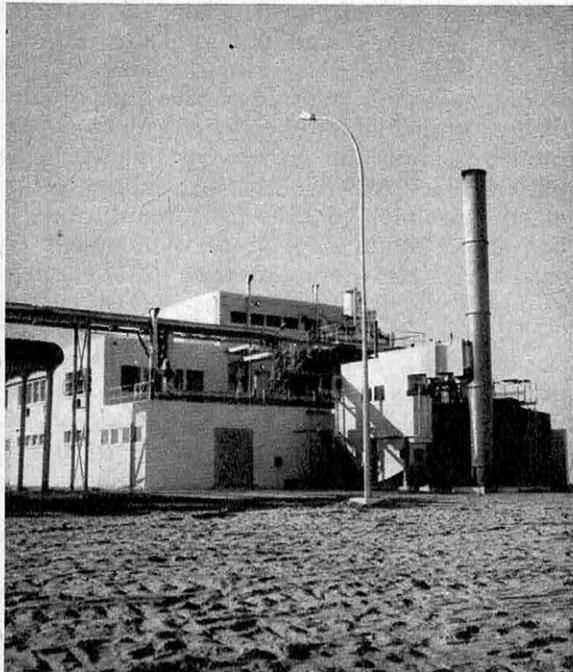
— Il est désormais possible de produire de l'eau douce à un prix acceptable pour certains usages municipaux et industriels. Mais, en l'état actuel des choses, il ne semble pas que l'on puisse produire de l'eau douce à un prix assez bas pour les usages agricoles courants.

— Une usine mixte produisant électricité et eau douce avec une souplesse suffisante peut fonctionner avec un facteur de charge éle-

Fort dépourvu d'eau douce, l'État d'Israël s'est intéressé depuis longtemps à plusieurs procédés de dessalement (distillation, électrodialyse, congélation, osmose inverse...).
L'usine expérimentale d'Eilath (page ci-contre) produit 1 000 m³ d'eau douce par jour par un procédé à congélation.
Une usine beaucoup plus importante est en projet.

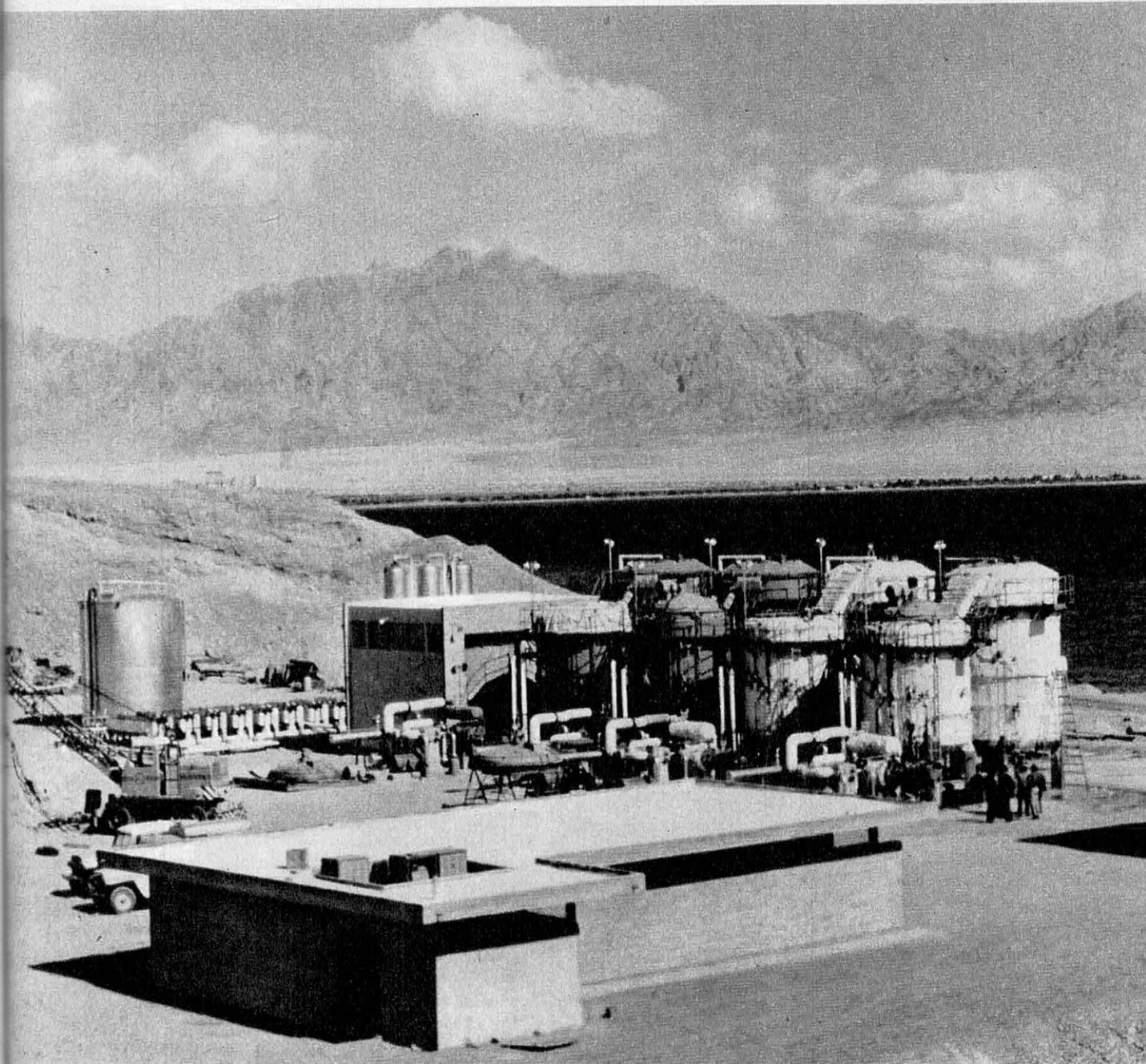
D'abord installée à Grenoble, et maintenant en Camargue, à Salin-de-Giraud (photo ci-dessous), cette petite usine de démonstration

(technique d'évaporation éclair à multiple effet) pourrait, à plein rendement, fournir l'eau potable à une ville de plusieurs milliers d'habitants.



DOCUMENTS CGE/LEADER

Nouakchott, capitale de la République de Mauritanie, a été dotée d'une usine de dessalement de l'eau de mer, entrée en fonctionnement au cours des derniers mois. Cette usine (photos à gauche) peut produire plusieurs milliers de mètres cubes d'eau douce par jour.



vé, ce qui est plus important dans le cas d'une usine nucléaire que dans celui d'une usine classique, les dépenses d'investissement étant plus élevées pour la première⁽¹⁾.

— Le combustible classique (mazout ou gaz) est plus économique pour les petites usines. Si la capacité de l'usine augmente, le prix de l'eau et de l'électricité produites dépendent surtout du prix du combustible classique rendu usine et des charges finan-

cières. Dans les usines de grande taille, la solution nucléaire est plus rentable.

— En conclusion, on peut toutefois dire qu'il semble qu'une période de 10 à 20 ans soit encore nécessaire pour que la technique des unités de dessalement à double fin (électricité et eau) de grande capacité puisse être commercialement disponible. A court terme, nous entrons dans une phase critique de développement technique du dessalement où il devient nécessaire de construire des unités de 10 000 à 20 000 m³ par jour et de coupler ces unités avec des centrales électriques.

(1) Tout ou partie de la vapeur produite dans une chaudière classique ou nucléaire peut, en effet, être détendue dans une turbine à contre-pression produisant de l'électricité, puis servir à distiller de l'eau de mer.

L. THIRIET

les pollutions marines

Une couche de mazout de dix centimètres d'épaisseur, circonscrite dans un carré d'un kilomètre de côté, il n'y a pas là de quoi frapper l'esprit : si cette nappe imaginaire se promène à la surface de la mer, elle ne représentera qu'un point imperceptible au regard de l'immensité océanique... Et pourtant, le volume d'une telle nappe correspond à peu près à celui du pétrole qui s'est échappé en mars 1967 des flancs du désormais célèbre « Torrey Canyon ».

C'est peu de chose d'un côté, mais c'est cependant énorme, car, pour les amateurs de chiffres, il convient d'ajouter que cette nappe s'amincissant jusqu'à ne plus être qu'un film monomoléculaire est capable de recouvrir plusieurs dizaines de milliers de km², l'équivalent de 5 ou 10 départements français. Elle constituera alors une couche imperméable qui bloquera pratiquement les échanges gazeux entre la mer et l'atmosphère et empêchera toute photosynthèse chlorophyllienne.

Cet exercice de calcul reste évidemment tout théorique et approximatif ; mais il place le problème des pollutions sous la lumière crue des chiffres.

Jusqu'à ces dernières années, l'homme ne s'était guère posé la question de la pollution des océans : l'énormité même de leur volume était rassurante, leur agitation perpétuelle — courants horizontaux et verticaux, houle, marées, etc. — semblait le gage d'une diffusion et d'une dilution rapides des produits nocifs qu'on pouvait y déverser ; leurs ressources biologiques étaient si grandes que la destruction accidentelle d'un stock de poissons, par exemple, ne pouvait avoir aucune conséquence. Aujourd'hui encore, il n'est pas rare d'entendre émettre par tel ou tel le conseil de rejeter directement à la mer — un peu au large évidemment — les eaux polluées d'une collectivité ou d'une industrie.

Mais voilà : la nappe de pétrole d'un kilomètre de côté et de 10 cm d'épaisseur refuse de s'enfoncer sous l'effet des courants vitaux ; elle flotte en surface, et les mouve-

ments de la mer, avant de la disperser définitivement, l'aident à s'étendre en une couche mince, mais redoutable. La nappe quasi ponctuelle devient surface mesurable en milliers de kilomètres carrés et, dans le cas choisi, son élimination coûtera finalement aux contribuables français la bagatelle de 35 millions de francs 1967 et sensiblement la même somme à nos amis anglais.

Surtout, si spectaculaires que soient les conséquences d'un accident comme celui du « Torrey Canyon », il ne doit pas faire oublier que, de manière plus discrète, les navires pétroliers rejettent annuellement trois millions de tonnes de pétrole au cours de leurs opérations de dégazage : trente fois autant que le « Torrey Canyon ».

Et ce n'est pas tout : aux pollutions provoquées par les navires s'ajoutent celles d'origine continentale, apportées par les fleuves, les émissaires urbains, les industries : pollutions bactériennes, chimiques, thermiques, qui agissent en doses si faibles qu'on ne sait pas encore les détecter systématiquement, tandis que se profile la menace des effluents radioactifs dont il faudra bien se débarrasser. Les océans seront-ils un jour aussi pollués que le sont dès à présent de trop nombreuses rivières ? La question se pose déjà dans certaines zones limitées, mais nous ne pensons pas qu'il y ait lieu d'être trop pessimistes : à la différence de ce qui s'est passé à terre, et à cause de cela même, l'homme a pris conscience, à temps espérons-le, des dangers auxquels étaient exposés les océans.

Nous allons nous efforcer, très brièvement, de passer en revue, selon leur origine et

PHOTO PAVLOVSKY-RAPHO

Des rochers englués de mazout, rendu plus visqueux encore par son séjour dans l'eau, tel fut en mars-avril 1967, le spectacle offert par les côtes de Cornouailles, de Bretagne ou du Cotentin. Et c'est ce qu'ont connu tout récemment des dizaines de kilomètres de côtes en Californie.



leur nature, les différents types connus de pollutions, les objectifs qu'il convient de se fixer pour en combattre les risques et en limiter les effets, les mesures pratiques à appliquer.

Les pollutions au large

C'est évidemment aux navires que l'on songe en premier, car ils sont les principaux responsables des rejets d'*hydrocarbures*, type de pollution avec lequel le grand public est familiarisé : plages souillées, oiseaux salis ou englués, poissons ou coquillages immangeables...

Cette pollution peut être accidentelle : tel fut le cas du «Torrey Canyon» ; les effets en sont spectaculaires, mais les nappes de pétrole s'étendant sur des zones limitées autour des lieux du sinistre, une bonne organisation pourrait permettre de les contrôler.

Peut-on les éviter ? Pas complètement, car aussi précises que soient les règles de la navigation, aussi habiles que soient les capitaines, aussi perfectionnés que soient les instruments du marin, on ne peut éliminer tout risque d'accidents ; tout au plus peut-on en réduire les conséquences.

Pour cela, et la leçon du « Torrey Canyon » a été sévère, il est nécessaire de mettre en place des moyens de lutte et de défense, un plan d'action coordonné, si — c'est le cas le plus fréquent en raison des dangers naturels et de la grande densité de la navigation — un sinistre se produit dans une région proche des côtes.

Le dispositif comprendrait un plan fixant à chacun ses responsabilités, la constitution de stocks de matériaux pour la construction de barrages et de produits destinés à éliminer les nappes de mazout (avec le minimum de risques pour la faune, la flore et les fonds), des moyens de récupération facilement adaptables à différents types de navires.

Mais le remède ne doit pas être pire que le mal : les détergents employés au moment de l'accident du «Torrey Canyon» se sont avérés plus nocifs pour les organismes vivants que le pétrole lui-même. Et il faut se souvenir, lorsqu'on précipite le pétrole au fond de la mer, qu'une concentration de 5 à 8 % d'hydrocarbures dans les sédiments détruit toute vie en quelques mois, d'où menace nouvelle pour les frayères. Peut-être aussi le pétrole remontera-t-il un jour à la surface.

Un plan de défense cohérent sous-entend enfin que l'on connaisse bien les paramètres, vents et courants, qui commandent les déplacements de la nappe et que l'on puisse constamment surveiller ces derniers, ce qui n'est pas facile.



PHOTO E.C. ARMÉES-MUSÉUM

*Entre autres techniques,
des tonnes de sciure de bois
furent larguées près des côtes françaises
sur le pétrole perdu par le «Torrey Canyon». Ainsi pouvait-on faire flotter le pétrole en émulsion, récupéré ensuite à l'aide de filets à mailles fines.*

Un tel plan est actuellement en cours d'élaboration en France.

Mais, et nous l'avons déjà souligné, les navires déversent dans toutes les mers du monde, de manière permanente, de grandes quantités d'hydrocarbures ; ceux-ci proviennent, soit de la vidange de routine des soutes, soit, surtout, du rejet à la mer des eaux de rinçage des citernes à bord des pétroliers.

Ces déchets couvrent, en couches très fines, pratiquement monomoléculaires, de très vastes superficies. Le plus souvent — la réglementation l'exige — ces opérations se déroulent au large et on pourrait penser qu'elles ne présentent guère de dangers.

En réalité, on ne sait pas très bien quel est le devenir du film d'hydrocarbures : une partie s'évapore, une autre s'oxyde, une fraction est dispersée par action mécanique, des processus bactériens interviennent également. Mais la survie d'une nappe est certainement très longue et tant qu'elle existe,

elle réduit considérablement la photosynthèse planctonique, c'est-à-dire, en définitive, la productivité biologique de la mer. Une bonne part de ces déchets, enfin, atteint les côtes, causant des dégâts importants aux exploitations ostréicoles, à la flore et à la faune de la zone de balancement des marées.

Pour prévenir ces rejets d'hydrocarbures, nous pouvons envisager deux armes principales :

— l'une, d'ordre réglementaire, qui consisterait, aux termes d'un accord international, à interdire tout rejet en mer ;

— la seconde, d'ordre technique, qui viserait à étendre à tous les pétroliers le procédé dit de « chargement sur résidus » : une des citernes recueille les eaux de lavage chargées de pétrole, qui doivent être reprises par des séparateurs d'émulsions. Seule l'eau parfaitement épurée est rejetée à la mer. Dans la citerne incriminée, le chargement s'effectue alors sur les résidus. Cette méthode a, d'ailleurs, été mise au point par les transporteurs de pétrole eux-mêmes. Mais ne faudra-t-il pas en arriver à l'interdiction absolue de tout rejet ?

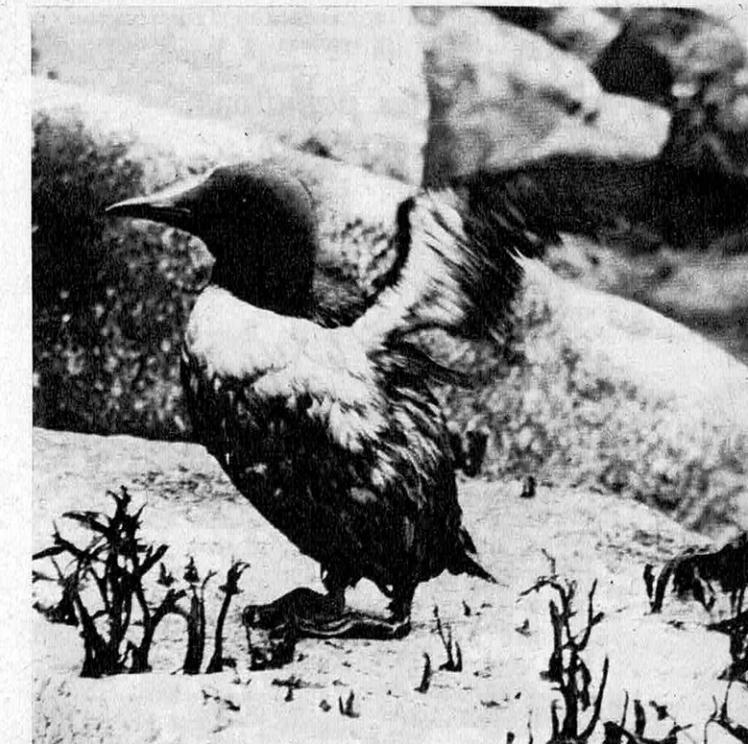
L'application rigoureuse de telles dispositions remédierait radicalement au mal, mais il faudrait qu'une surveillance sévère fût exercée et tout manquement sanctionné.

En 1954, l'Organisation Maritime Consultative Intergouvernementale (O.M.C.I.) a élaboré une Convention internationale, dite de Londres, qui a été ratifiée par la plupart des grandes nations maritimes y compris la France. Complétée en 1962, elle constitue une base réglementaire solide pour la lutte contre les rejets permanents d'hydrocarbures par les navires.

Quant à la récupération ou à l'élimination directes de ces nappes trop étendues et trop fines, elles semblent illusoires : certains ont songé à les dégrader par des ensemencements bactériens, mais les études n'ont pas dépassé le stade du laboratoire.

Les navires ne sont guère responsables d'autres types de pollution, les rejets d'objets divers et de détritus sont insignifiants. Toutefois, le risque de contamination radioactive provoqué par un sinistre survenant à un engin à propulsion nucléaire représente une grande inconnue ; des vives controverses qui se sont élevées, on peut retenir que, malgré l'ampleur des précautions prises, le risque n'est pas totalement exclu.

Une menace nouvelle est apparue, quant aux hydrocarbures, avec le développement des exploitations *off-shore*. De multiples précautions sont prises, mais il est permis d'envisager la redoutable hypothèse d'un puits échappant à tout contrôle et débitant direc-



SERVICE CONSERVATION DE LA NATURE DU MUSÉUM

Les premières victimes de la catastrophe du Torrey Canyon furent les oiseaux qui, déjà, meurent chaque année par milliers des pollutions de routine provoquées par le « dégazage » des pétroliers.

tement dans la mer comme ce fut récemment le cas à Santa-Barbara (U.S.A.).

De multiples pollutions d'origine continentale

Nous en venons maintenant aux pollutions, très nombreuses, très diversifiées, qui trouvent leur origine à terre, mais qui, d'une manière ou d'une autre, parviennent un jour dans les mers.

Il faut noter dès l'abord qu'elles sont beaucoup moins spectaculaires que les précédentes : pas de nappes visibles, pas de grands animaux lésés, pas de plages souillées.

Elles n'en sont pas moins redoutables et leur menace se fait chaque jour plus précise, car elle augmente en fonction directe de l'accroissement démographique et de la tendance très marquée des industries et, à la période estivale, des populations, de s'implanter en nombre toujours plus grand sur le littoral. Les déchets de l'activité humaine sont sans cesse plus importants, mais le volume récepteur reste le même, d'où un déséquilibre qui ne peut aller qu'en s'accentuant.

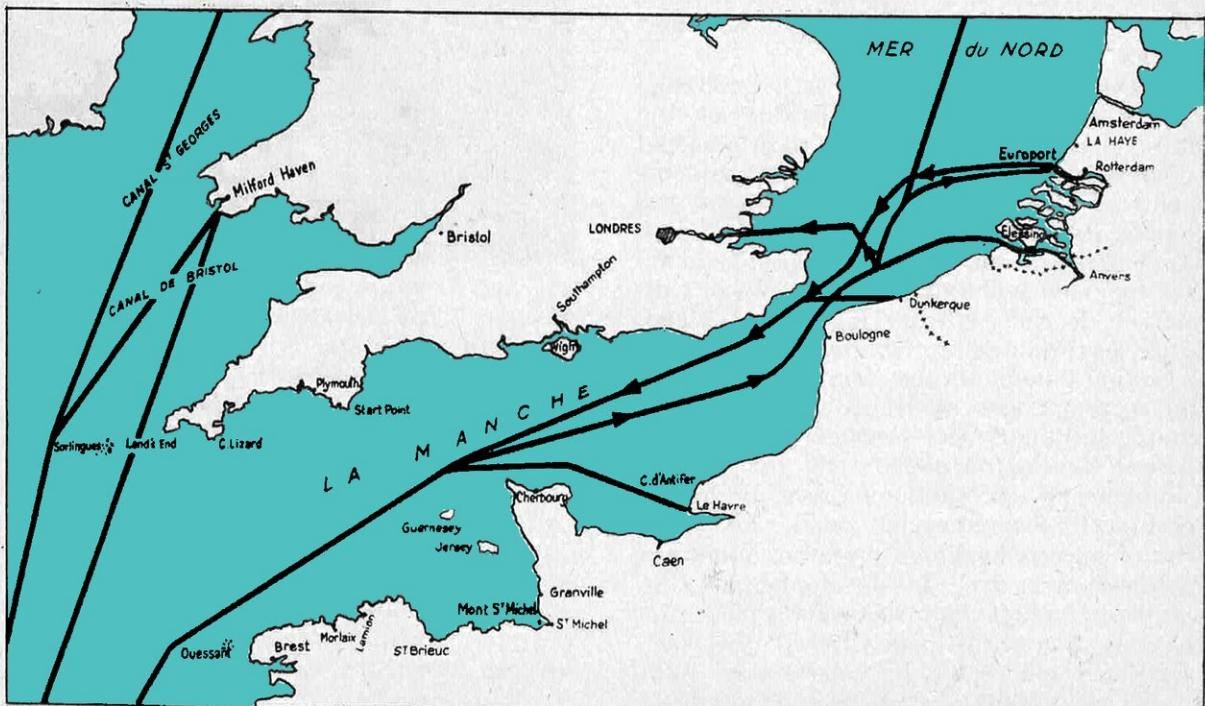
Ces pollutions sont d'ailleurs provoquées non seulement par les rejets effectués localement sur le littoral, mais aussi par des déchets et des résidus venus de très loin, drainés par les rivières, puis entraînés en mer. Avec les zones industrielles, les ports et les grandes agglomérations, les zones d'estuaires sont donc les plus touchées.

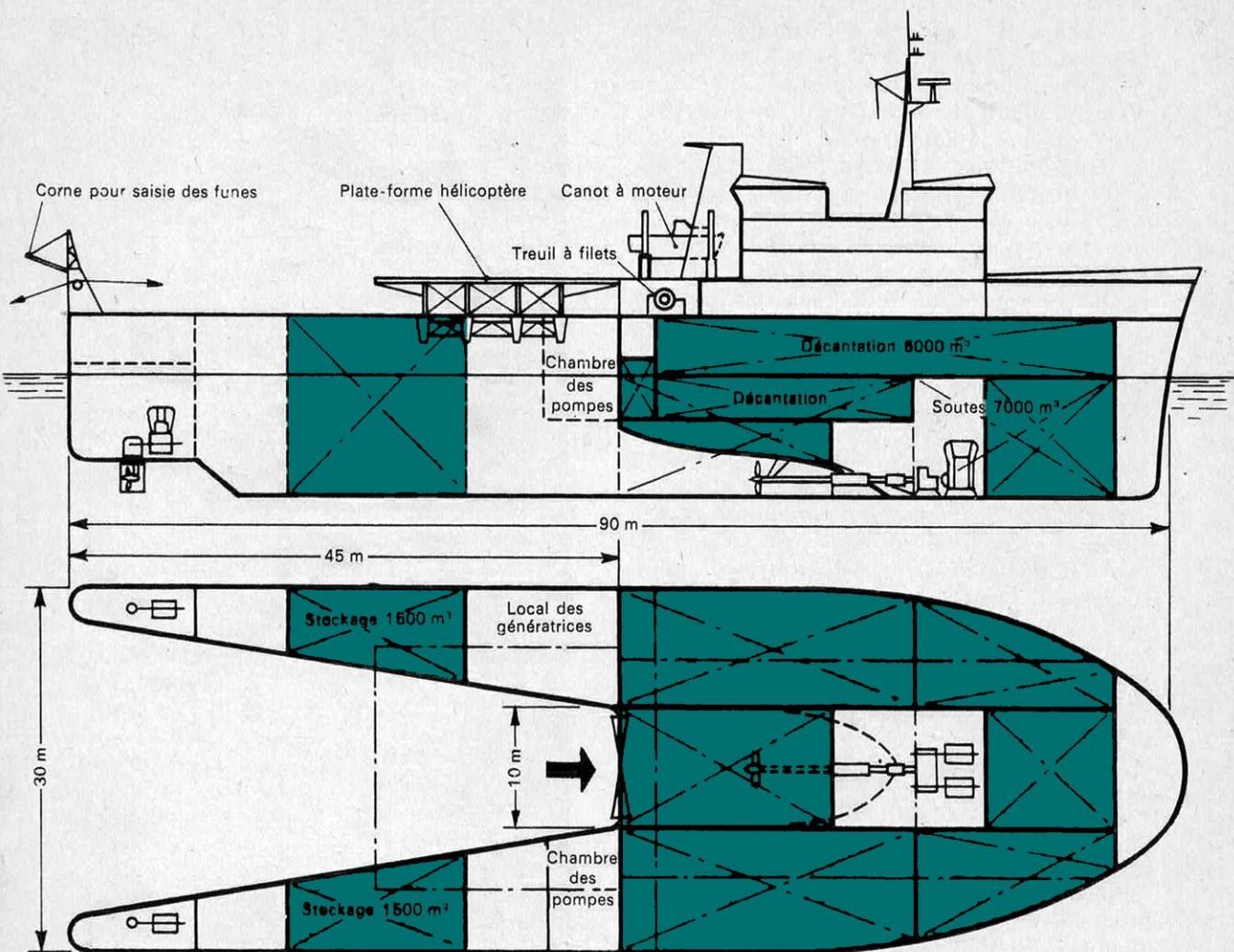
Il est évident que se prémunir contre les

pollutions apportées par les rivières suppose que la lutte soit entreprise en amont, là même où l'on pollue. Mais la tâche est noitamment complexe. A titre d'exemple extrême, précisons que les produits toxiques contenus par les fumées d'usine peuvent être dissous ou précipités par les eaux de pluie et peu à peu entraînés par le ruissellement jusqu'à la mer. On a même pu doser dans l'eau de mer de certaines régions océaniques du plomb tétra-éthyle provenant vraisemblablement des échappements de véhicules à essence!

Ici encore, on pourrait penser que les quantités de polluants rejetées sont si faibles par rapport au volume des océans qu'elles ne peuvent guère avoir d'incidence. Mais ces polluants viennent contaminer en premier lieu la zone littorale, celle-là même où les activités sont les plus importantes. La diffusion et la dispersion de ces produits ne se fait d'ailleurs pas de manière homogène. Ils se dispersent selon des lois mal connues où s'entremêlent phénomènes physiques et chimiques : ici les produits se concentrent et stagnent, ailleurs ils forment de véritables rivières sous-marines qui peuvent balayer tout un secteur avant de se diluer. On cite le cas d'une moulière ravagée sur plusieurs kilomètres par une coulée de sulfate de cuivre accidentellement rejetée par une usine. Actuellement, la zone littorale est de beaucoup la plus touchée, mais à mesure que les pollutions augmenteront, ce sera le tour des eaux du plateau continental.

Les principaux itinéraires pétroliers dans la Manche et au-delà.





Quelles sont les principales sources de pollutions continentales ?

Les pollutions industrielles

On trouve en premier lieu les **hydrocarbures** échappés des ports pétroliers au cours des opérations de chargement ou de déchargement ou rejetés par les industries. De nombreuses précautions sont prises, mais les fuites sont inévitables. Divers remèdes sont applicables : barrages flottants, rideaux de bulles qui contiennent la nappe et l'empêchent de s'étendre ; la mise au point d'engins récupérateurs légers devrait permettre d'assurer dans de bonnes conditions le nettoyage des surfaces souillées.

Toujours liées à l'industrie lourde, on trouve les **pollutions thermiques** : des eaux propres, mais chaudes, rejetées parfois en grande quantité, ont pour effet d'augmenter localement la température du milieu récepteur, modifiant l'écologie de ce milieu et pouvant entraîner la mort de certaines espèces sensibles. L'action est indirecte : d'une part,

A structure calamaran pour la partie arrière, le navire dépollueur étudié par le groupe français Technocéan paraît être

le premier bâtiment spécialisé pour la récupération des nappes de pétrole en haute mer.

En phase de travail, le navire avancera lentement, en marche arrière, dans le sens des mouvements de surface, l'espace entre les deux coques préservant une zone d'eau calme.

La vanne d'admission du mélange eau-pétrole est siluée au centre du navire, peu affectée par les mouvements de celui-ci.

Le mélange eau-pétrole sera pompé et déversé dans des cuves à décanlation de grande capacité.

Le navire pourra assurer le stockage d'une partie du mélange enrichi en pétrole jusqu'à l'arrivée de pétroliers.

l'élévation de température stimule le métabolisme des organismes vivants, d'où demande d'oxygène accrue, alors que le milieu réchauffé contient précisément moins d'oxygène dissous ; d'autre part, cette élévation de température accroît l'activité de certains polluants chimiques.

En France, ce problème ne concerne encore que les rivières, mais il est plus aigu aux Etats-Unis où certains estuaires sont touchés. Les Américains redoutent, dans un avenir immédiat, l'implantation sur le littoral de centrales nucléaires qui puiseront dans la mer les énormes quantités de réfrigérant dont elles ont besoin et, bien sûr, le rejeteront réchauffé.

L'idéal serait de pouvoir utiliser ces effluents chauds ; il n'est pas déraisonnable d'envisager que des installations d'aquiculture soient établies à quelque distance des usines ; la chaleur recueillie, dûment contrôlée, pourrait servir, lorsque cela est nécessaire, à éléver la température des bassins d'élevage.

Quant aux **pollutions chimiques** produites par l'industrie, leur liste est inépuisable.

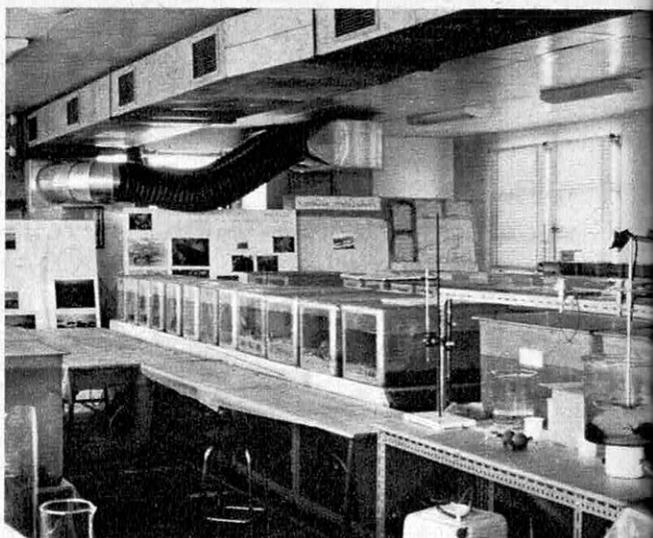
Il y a quelques années, une cinquantaine de personnes trouvèrent la mort au Japon à la suite d'une intoxication alimentaire causée par du poisson ; la difficile enquête menée alors fit découvrir qu'à 30 ou 40 kilomètres de là, une usine avait rejeté en mer du méthyle de mercure, toxique, en quantité indosable dans le milieu. Mais les concentrations progressives tout au long de la chaîne alimentaire avaient provoqué l'accumulation chez certains poissons comestibles d'une quantité de toxique mortelle pour l'homme. Cet exemple est typique et montre à quel point nos connaissances des processus peuvent être mises en défaut.

Quelles que soient les précautions prises, et même si la réglementation est respectée, il faut bien admettre que l'on ne sera jamais à l'abri d'une fausse manœuvre. Du moins peut-on en réduire le risque dans une proportion notable.

L'agriculture et les pesticides

Toute une série de pollutions chimiques est liée à l'agriculture, sous la forme des pesticides et tout particulièrement des insecticides employés sur les cultures (et, à doses massives, dans les opérations de démoustication). En 1967, la production totale d'insecticides s'est élevée aux Etats-Unis à 400 000 tonnes.

La plupart de ces produits sont des composés organochlorés dont la durée de vie est très longue, dix ans et plus pour certains. Le plus connu est évidemment le D.D.T. Ces



*Les risques de contamination
du milieu marin
par produits radioactifs
ne sont pas non plus négligeables.
En France, des études précises-*

*sont menées
par le Centre
de Radioécologie Marine,
installé à La Hague,
dans le Cotentin.*

*Les photographies ci-dessus
montrent les bacs et aquariums
dans lesquels sont réalisées
des contaminations artificielles d'algues,
d'invertébrés et de poissons,
à l'aide de produits de fission.*

*La technique, en circuit fermé,
fonctionne sans
renouvellement de l'eau,
simplement filtrée et réoxygénée.*

produits sont entraînés par les eaux de ruissellement et, tôt ou tard, les cours d'eau les amènent à la mer (ils peuvent également polluer les nappes phréatiques).

Leur nocivité est très grande : destinés aux insectes, dont ils inhibent une enzyme du système nerveux, la cholinestérase, ils agissent en fait sur tous les arthropodes et notamment sur les crustacés : les crevettes sont sensibles à des doses de l'ordre de une partie par milliard. A hautes doses, ils peuvent être nocifs, voire mortels pour les vertébrés. Or, on a découvert que ces composés, liposolubles, s'accumulaient dans les tissus adipeux ; il se produit une concentration progressive tout au long de la chaîne alimentaire et les consommateurs d'ordre IV (poissons carnivores) et V montrent dans certains tissus et dans leurs œufs, dans le cas des oiseaux, des concentrations de pesticides plusieurs milliers de fois plus fortes que celles dosées à l'échelon primaire, dans le phytoplancton. Des études sont en cours et on a pu mettre récemment en évidence une inhibition considérable du pouvoir photosynthétique du phytoplancton sous l'effet des insecticides organochlorés.

Si l'on se souvient que, d'un autre côté, une mince couche de pétrole constitue pour le même plancton une menace, celle constituée par une barrière peu ou pas perméable aux gaz, on peut concevoir de légitimes inquiétudes, non seulement pour l'avenir du potentiel biologique des océans, mais même pour le renouvellement des réserves d'oxygène de l'atmosphère : d'après un auteur américain, Cole, 70 % ou plus de l'oxygène atmosphérique seraient produits par les diatomées planctoniques.

Il n'est malheureusement pas possible d'interdire l'emploi des insecticides ; d'autres méthodes (stérilisation des géniteurs, par exemple) sont d'une mise en œuvre complexe et onéreuse ; actuellement, le seul remède envisageable est la substitution aux dérivés organochlorés (75 % des produits sur le marché), de produits dégradables assez rapidement au contact de l'eau, comme des esters phosphoriques ou des carbamates. Le problème est donc soluble, au prix d'un effort technique et d'un sacrifice économique.

La vie quotidienne

Le cas des **détergents** se rattache au chapitre des pollutions chimiques. Ce type de pollution est redoutable : il n'est pour s'en convaincre que de voir certaines rivières charriant des flots d'écume mousseuse. Conséquence de l'évolution démographique et du mode d'existence, de l'élévation du niveau de vie,

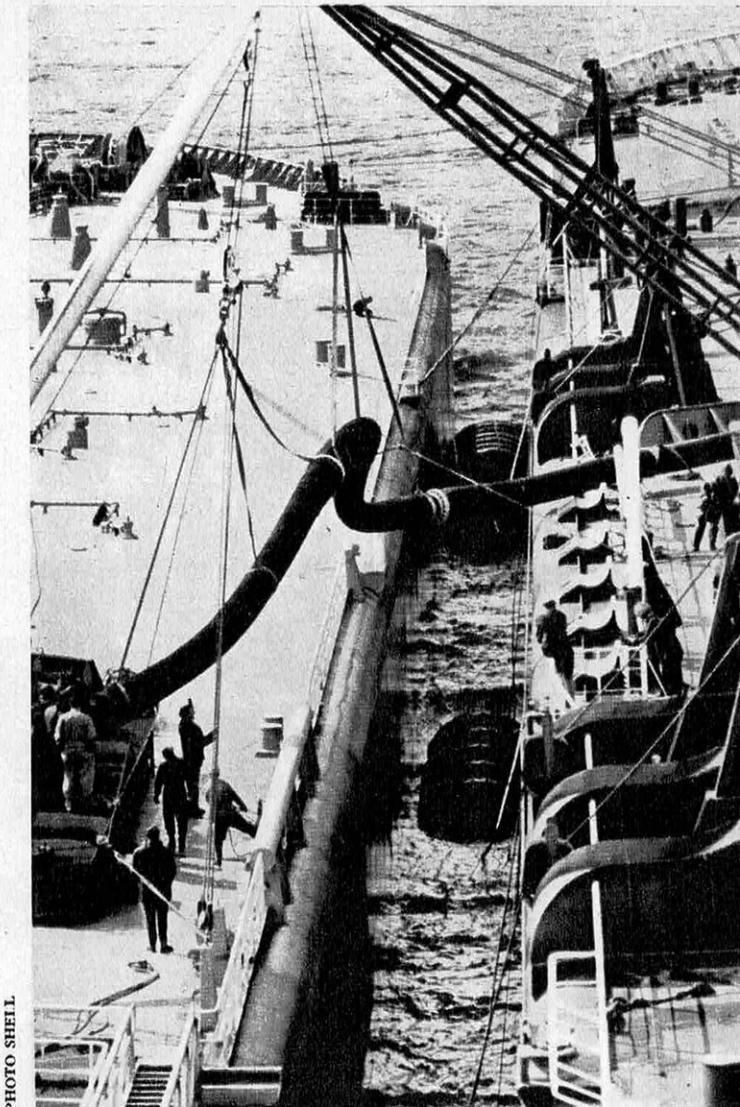
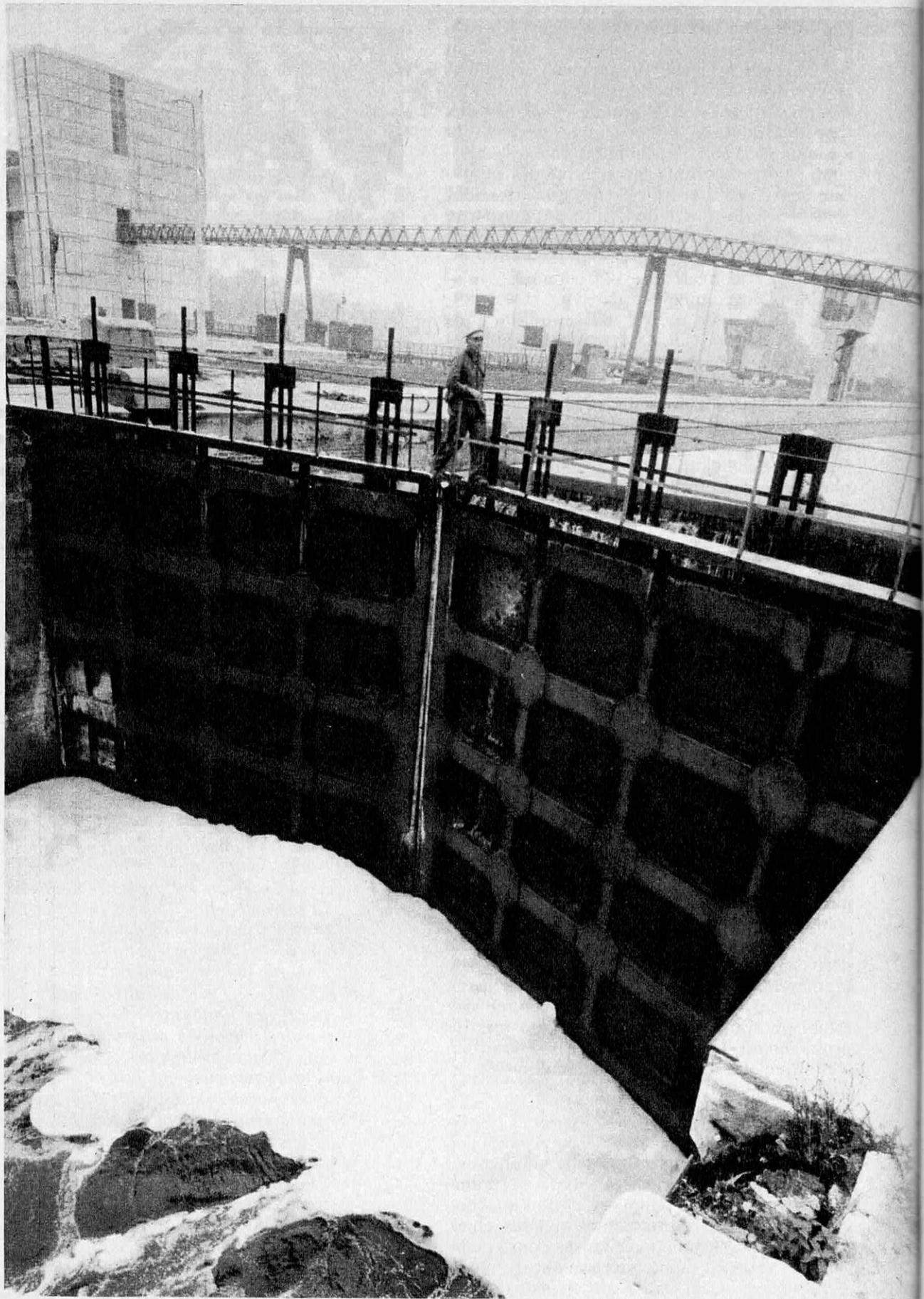
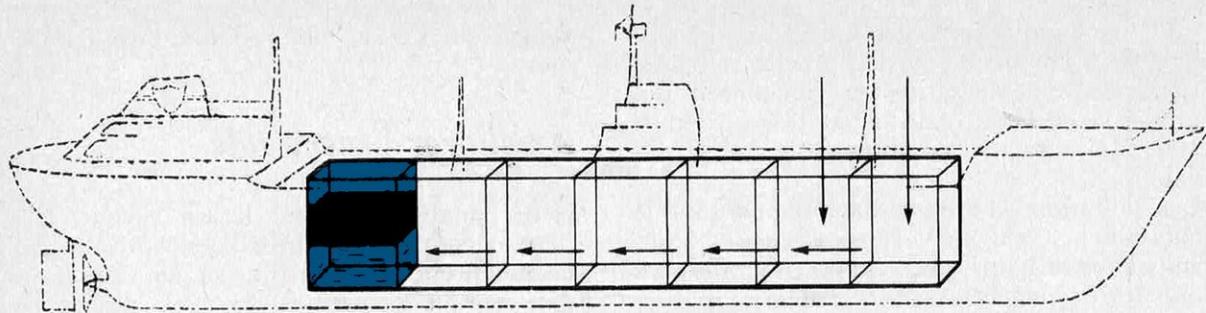


PHOTO SHELL

Avec les nouveaux pétroliers de 200 000 tonnes et plus, sont apparus des risques d'un genre nouveau : l'infrastructure portuaire fait encore souvent défaut pour accueillir de tels navires à pleine charge et l'on doit recourir à l'allégement en haule mer par des pétroliers plus petits (photo ci-dessus). D'importants moyens sont mis en œuvre pour parer à tout incident : en cas de décrochement du flexible, le pétrole emprisonné dans l'espace entre les coques et les « défenses » de caoutchouc serait immédiatement « noyé » par un mélange sous pression stocké à bord du navire allégur.





DOCUMENT PÉTROLES B.P.

La technique « load on top » évite le rejet en mer des résidus de lavage des cuves : la cuve arrière peut être équipée d'un système de réchauffe.



PHOTOS GÉRALD BLONCOURT-MUSÉUM

la consommation des détergents s'accroît sans cesse. Elle est actuellement en France de l'ordre de 2 kg par habitant et par an. Certains de ces produits, les détergents anioniques, sont extrêmement nocifs pour les organismes vivants ; cette catégorie est la moins chère, et aussi, hélas, la plus répandue (90 % environ des produits existant sur le marché).

Comme dans le cas des pesticides, on ne peut envisager d'interdire ni même de réduire l'emploi des produits incriminés, mais on peut améliorer les conditions d'épuration des eaux usées, mettre au point des pro-

Abondamment utilisés à l'échelon domestique, les détergents chimiques se manifestent d'abord sur les cours d'eau, ainsi que le montrent ces photographies, et au grand détriment de la faune. Ils iront finalement dans la mer, où leur présence, moins spectaculaire, n'en sera peut-être pas moins désastreuse.

duits biologiquement peu nocifs, ou dégradables rapidement par des processus bactériens ; la réglementation en vigueur en République Fédérale Allemande l'exige depuis 1964. Là aussi, de nombreux travaux se développent.

Les pollutions d'**origine bactérienne** sont la conséquence du déversement en mer des émissaires urbains, des égouts. On observe une forte concentration de bactéries pathogènes aux abords des grands centres urbains avec, comme conséquence, des risques de contamination pour les baigneurs (la preuve médicale en a été souvent administrée), des risques de contamination pour les coquillages, entraînant des épidémies de typhoïde. La durée de survie des bactéries en mer n'est pas connue avec précision ; elle peut être très grande, bien que certains auteurs estiment que le plancton, et plus spécialement le phytoplancton, est doué de propriétés antibiotiques. Mais ce pouvoir « auto-épurant » de la mer, dont le mécanisme est complexe et mal connu, n'est pas suffisant pour détruire les germes pathogènes ; il ne doit pas, en particulier, être invoqué par ceux qui sont responsables des installations d'épuration et qui pourraient être tentés, par souci d'économie, de réduire leur efficacité..

La seule technique de lutte valable consiste au contraire à doter les centres urbains de stations d'épuration qui rejettent assez loin au large des eaux débarrassées de la plus grande partie de leurs germes.

Mentionnons ici un phénomène secondaire, peu connu en mer (sauf, semble-t-il, en Adriatique, où plusieurs cas ont été observés), mais fréquent dans les eaux douces. Dans les stations d'épuration, les matières organiques des résidus urbains sont minéralisées avant leur évacuation ; elles sont alors chargées de sels nutritifs (phosphates, nitrates, etc.) qui provoquent un accroissement considérable des peuplements végétaux, notamment du phytoplancton : c'est l'eutrophisation ou fertilisation excessive du milieu récepteur. Survient alors une phase de multiplication du zooplancton, l'oxygène se raréfie et seules finissent par subsister, au détriment des autres, des espèces peu exigeantes en oxygène.

Ce tableau ne serait pas complet si l'on ne mentionnait encore :

- les **pollutions radioactives**, étroitement contrôlées, mais qui, elles aussi, mettent en jeu des processus de concentration élective encore mal connus et préoccupants.
- Les **rejets solides**, les plastiques notamment, peu putrescibles et qui encombrent certains fonds, réduisant les échanges entre eau et sédiments.
- Des rejets comme celui des fameuses **boues**

rouges de Cassis, objet d'une vive controverse.

Améliorer l'inévitable

Cette longue liste peut laisser rêveur. Elle peut encore faire sourire les sceptiques qui ne comprendront pas que si peu de choses dans autant d'eau puissent avoir des conséquences graves.

Nous n'insisterons jamais assez sur le fait que les polluants sont concentrés dans la zone littorale, que les mécanismes de diffusion, les processus de contamination sont mal connus, ou lorsqu'ils le sont, ne peuvent, dans l'état actuel des techniques, être maîtrisés par l'homme. Il faut donc commencer par conserver la mer propre.

Malheureusement, les résidus de l'activité humaine doivent forcément être rejetés quelque part et ce quelque part, c'est toujours, en fin de compte, la mer. Aussi faut-il développer les études, et, en premier lieu, sur les points suivants :

- conséquences des pollutions sur la faune, la flore et le milieu lui-même : mécanismes de la contamination, doses nocives, etc. ;
- étude des normes, c'est-à-dire de la qualité et de la quantité des produits dont on peut se débarrasser dans les océans ;
- détermination des zones où l'on peut procéder sans danger à ces rejets.

De telles études coûtent cher, mais un économiste montrerait aisément que la dépense sera sans commune mesure avec la valeur du capital épargné.

La réglementation devra être harmonisée sur le plan international : le sinistre du « Torrey Canyon » a montré que les pollutions ignoraient les frontières... Les législations nationales devront évidemment être alignées pour éviter que ne soient pénalisés les États les plus précautionneux au profit de ceux qui, plus désinvoltes, favoriseraient par leur indulgence les transferts d'industries sur leur territoire.

Il faudra enfin, lorsqu'un accident se produira, avoir sous la main un arsenal de récupération et de nettoyage efficace, immédiatement disponible.

Ce sont d'ailleurs ces objectifs qui ont été inscrits au programme du CNEXO et que l'on retrouve dans la Charte européenne de l'eau, élaborée par le Conseil de l'Europe. Comment, en effet, parler d'exploitation des ressources marines, si l'on ne commence pas d'abord par les préserver des atteintes inutiles ?

O. LE FAUCHEUX

Conseiller Technique
à la Direction Générale du CNEXO

LA GUERRE NUCLÉAIRE SOUS-MARINE

Première des nations européennes, la France s'est dotée d'une structure de coordination, le Centre National pour l'Exploitation des Océans. Le CNEXO a pour mission de mener à bien l'ensemble des études et de préparer les réalisations qui permettront à notre pays de tirer profit des ressources de la mer. Pour porter ces études et réalisations au niveau des États-Unis, il restera à lui accorder les quelques centaines de millions de dollars que se partagent actuellement, à peu près par moitié, les organismes civils et l'*U.S. Navy*.

L'avance américaine dans le domaine de la recherche sous-marine à grande profondeur, à des fins civiles ou militaires, sera difficile à rattraper. On estime que les États-Unis disposaient, au début de 1969, de 60 sous-marins de recherche à plus ou moins grande profondeur contre 15 dans le reste du monde. L'U.R.S.S. vient immédiatement, dans ce domaine, derrière les États-Unis, avec 5 sous-marins de recherche en service et 3 en construction. Elle détient d'ailleurs un record avec le plus luxueux, le « Severianka », aménagé à partir d'un sous-marin militaire de 80 m. Équipé de larges hublots en verre très épais, de puissants projecteurs, il a permis la prise de nombreux films. Tout comme la France avec l'*« Archimède »* et les États-Unis avec le *« Trieste II »*, la marine soviétique s'est fait construire deux sous-marins de recherche pouvant descendre à 10 000 m.

Les sous-marins à propulsion atomique

Quatre pays, dont la France est le dernier venu, sont actuellement lancés dans le développement d'une coûteuse flotte de sous-marins à propulsion atomique.

Le premier a été l'*Albacore*, lancé en 1953 aux États-Unis, sous-marin d'attaque équipé

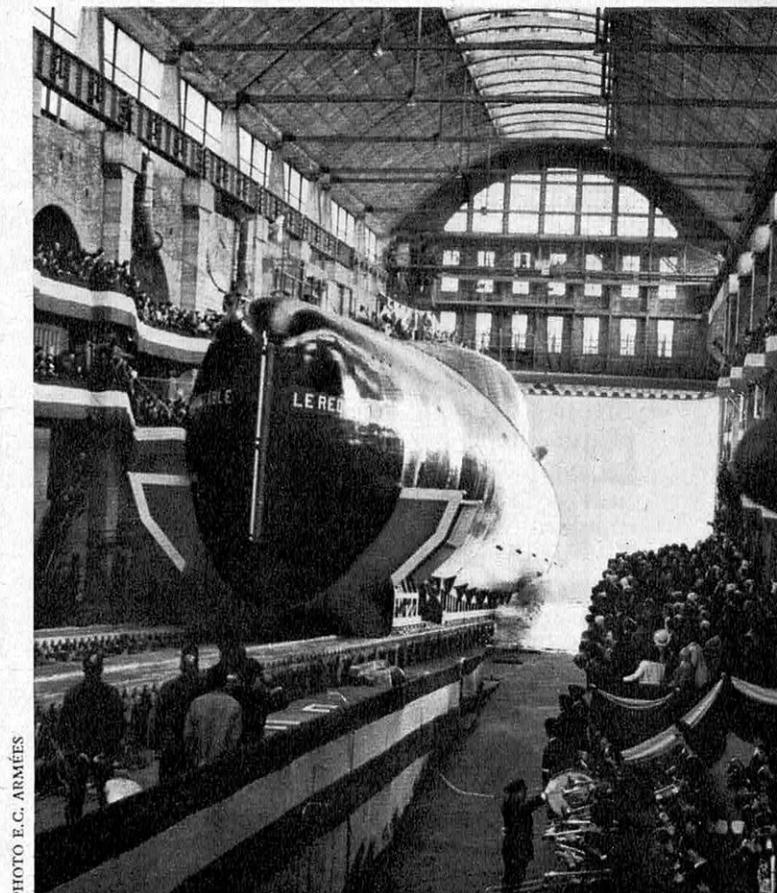


PHOTO E.C. ARMÉES

**Premier des sous-marins lance-engins
à propulsion nucléaire prévus
pour la Marine nationale française
des années 75, le
« Redoutable » (ci-dessus), lors de sa
mise à flot à Cherbourg en mars 1967.**

de tubes lance-torpilles classiques ; il en existe aujourd'hui 24 de ce modèle. En 1957, l'U.S. Navy décida d'y ajouter une série de 41 sous-marins, toujours à propulsion atomique, mais armés chacun de 16 missiles Polaris qu'on pouvait lancer en plongée. Leur déplacement en plongée s'est relevé de 7 000 à 9 000 tonnes. Ils sont tous en service aujourd'hui. Aux Polaris A-1, de portée de 2 200 km, ont succédé des Polaris A-2, de portée 2 800 km, puis des Polaris A-3, de portée 4 600 km. Le poids de ces missiles atteint 13 600 kg sur les dernières versions. La charge, de 500 kilotonnes au début, dépasse aujourd'hui la mégatonne.

Avec le concours des États-Unis, la Grande-Bretagne a suivi. Ses premiers sous-marins d'attaque et lance-missiles sont en service. D'autres sont en cours d'armement ou en construction.

La France a lancé en 1967 le *Redoutable*, premier d'une série de trois sous-marins à propulsion atomique qui doivent constituer la troisième génération de sa force nucléaire stratégique en 1975. Au déplacement en plongée de 9 000 t, le *Redoutable*, actuellement en essais, est armé, comme les sous-marins américains et britanniques, de 16 missiles M.S.B.S. (mer-sol-balistique-stratégique). Les charges thermonucléaires ne sont prévues que pour le troisième de ces sous-marins, les deux premiers ne disposant que de charges dopées de l'ordre de 500 kilotonnes. La marine soviétique, à laquelle on attribue près de 400 sous-marins, ne s'est intéressée que tardivement à la propulsion atomique. Elle a d'abord équipé des sous-marins classiques de missiles à charge nucléaire, missiles dont les premiers ont défilé à Moscou entre 1962 et 1967. On attribue aux derniers nés, les « Sawfly », selon la désignation OTAN, un diamètre de 1,75 m et une longueur de 12,8 m, nettement supérieurs aux chiffres correspondant des Polaris A-3 (1,37 m et 9,45 m). Comme pour les autres missiles nucléaires soviétiques, la puissance de la charge serait donc probablement nettement plus élevée que celle des Polaris. Mais chaque sous-marin n'emporterait qu'un nombre de missiles très inférieur.

Dans les conditions actuelles de détection des sous-marins à propulsion atomique, on s'accorde à reconnaître que ce type de navire doit pouvoir exécuter ses lancements en échappant à la destruction.

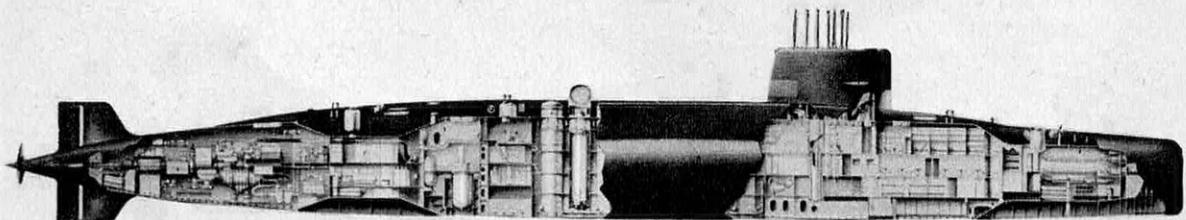
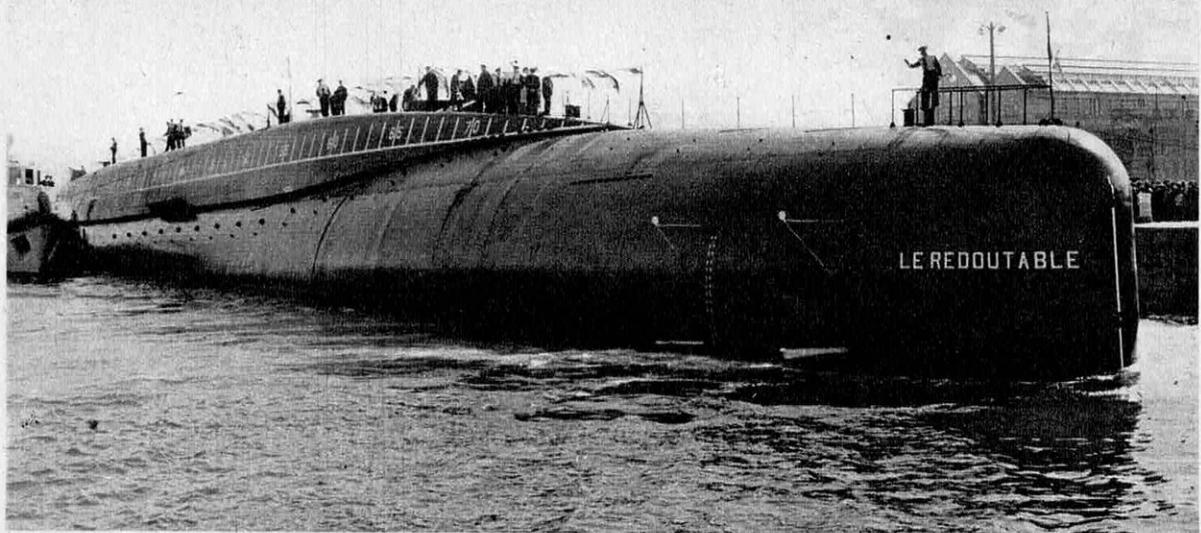
Le projet « Orca »

En 1962, General Dynamics présentait à la fois à l'U.S. Navy et à l'U.S. Air Force un projet révolutionnaire qu'elle désignait sous

le nom d'« Orca ». L'*Orcinus orca*, l'orque ou épaulard français, le *killer whale* anglais, est un petit cétacé qui n'hésite pas à s'attaquer aux plus grosses baleines ; il les déchire de ses dents aiguës et les consomme dans la limite de sa capacité stomacale. Pourquoi ne transposerait-on pas l'idée en substituant à ces monstres de 9 000 t que sont devenus les sous-marins lance-missiles à propulsion atomique, un simple missile, en container étanche, déposé au voisinage des côtes ennemis par un cargo ou même un chalutier ? General Dynamics allait même plus loin : elle se proposait de l'abandonner à des courants comme le Gulf Stream en suivant son déplacement à partir des Etats-Unis et en commandant le lancement à l'instant choisi vers l'un des objectifs sur lequel le guiderait son ordinateur. L'U.S. Navy jugea sans doute que l'adoption de l'Orca n'ouvrirait pas de perspectives de reconversion aux quelques centaines de milliers de marins qu'elle occupait sur ses navires de surface et ses sous-marins, à propulsion classique ou atomique, destinés aux missions d'attaque ou au lancement de Polaris. Elle déclina l'offre de General Dynamics.

L'U.S. Air Force qui, jusqu'à l'entrée en service des Polaris, détenait l'exclusivité des missiles stratégiques, s'empressa de l'accepter. Cette marine nucléaire sans marins lui paraissait une excellente réplique à l'avantage pris par l'U.S. Navy. En octobre 1962, elle réunit à Norton (Californie), 250 représentants de 80 sociétés et leur exposa ses projets d'études nouvelles, financées par le Département de la défense, pour des missiles destinés à entrer en service en 1968-1974. Les divers points se rattachant au projet Orca furent examinés en détail. L'U.S. Air Force finança une série d'études préliminaires pour le choix des emplacements, allant du mouillage des containers par petits fonds, en eaux territoriales neutres ou ennemis, jusqu'à leur abandon au gré des courants dans l'Atlantique ou dans l'Arctique. Tous les problèmes devaient être examinés et paraissaient solubles, y compris les innombrables sécurités, jusqu'à la dernière, celle qu'exigeait le président Kennedy pour activer ou désactiver lui-même les missiles sur leur trajectoire suivant les renseignements reçus par le « téléphone rouge ».

Menacée dans son existence même, il ne restait plus à l'U.S. Navy qu'à porter le débat au niveau du secrétaire à la Défense, M. Robert S. McNamara. Celui-ci, qui n'aimait guère voir bouleverser ses programmes par les rivalités entre ses subordonnés, fit arrêter les études financées par l'U.S. Air Force, et rendit à l'U.S. Navy le monopole des missiles sous-marins, fixes ou mobiles.



Au déplacement de 9 000 tonnes, le « Redoutable », dont le réacteur nucléaire à « divergé » pour la première fois à la fin du mois de février, sera équipé de 16 missiles balistiques à charge de type thermonucléaire.

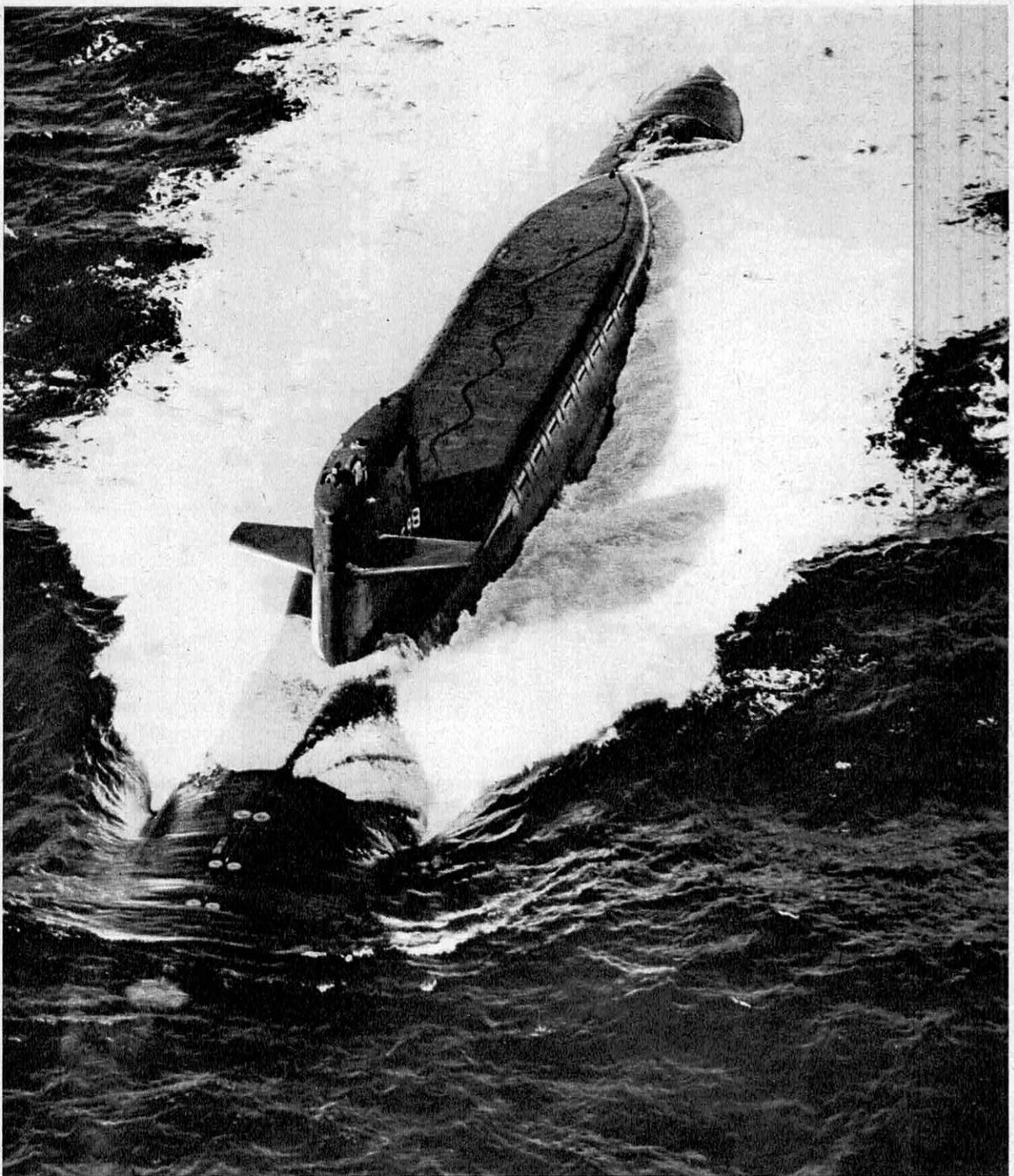
Discutée aux États-Unis avec la liberté de règle en ce pays pour toutes les questions, même militaires, l'affaire de l'Orca ne pouvait échapper aux dirigeants soviétiques. En février 1964, Robert Hotz rapportait, dans un éditorial d'*« Aviation Week »*, revue quasi officielle de l'industrie aérospatiale américaine, les recherches de l'U.R.S.S. Celle-ci, annonçait-il, venait d'adopter le projet Orca, en réplique à l'imposante flotte de 41 sous-marins armés de Polaris qu'achevait alors l'*U.S. Navy*. Elle estimait ne pas devoir suivre les États-Unis dans la coûteuse course où ceux-ci la devançaient. « Au moment où elle essayait, ajoutait-il, de faire condamner à Genève le sous-marin armé de Polaris, elle travaillait secrètement sur un projet de missiles en containers mis en place à proximité des côtes américaines. Ce projet est semblable au projet Orca, dont l'indifférence du Pentagone n'a pas permis qu'il dépasse le stade des études. Avec des containers sous-marins, l'U.R.S.S. va donc atteindre l'objectif qu'elle s'était proposé et où elle avait

échoué, lors de sa tentative pour armer Cuba de missiles balistiques en 1962 ».

Il semble bien que les progrès soviétiques dans ce domaine n'aient pas échappé à l'*U.S. Navy*. *Aviation Week* annonçait l'an dernier que celle-ci, revenant sur son refus de 1962, s'intéresserait à son tour au projet. La revue indiquait également la mise à l'étude, aux États-Unis, de containers géants pour missiles de près de 4 m de diamètre, dont on peut supposer que le cône de charge, dans un tir à faible distance, approcherait des plus puissants cônes de charge des missiles soviétiques.

Du Polaris au Poseidon

Peut-on intercepter le cône de charge d'un missile tel que le Polaris par un antimissile le mettant hors de service ou provoquant son explosion à une altitude où elle n'aura aucun effet sur l'objectif visé ? La réponse diffère, aussi bien aux Etats-Unis qu'en U.R.S.S., suivant que l'on pose la question aux responsables des missiles ou des antimissiles.



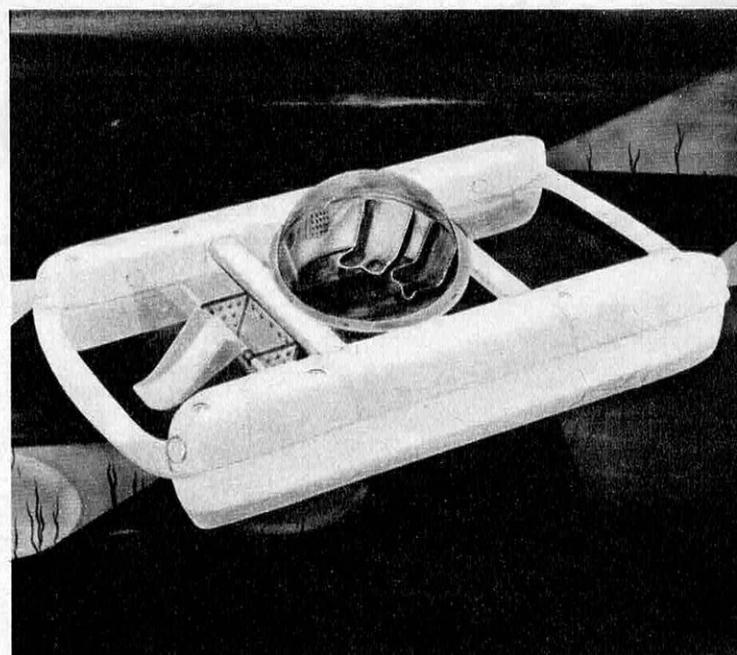
S'il ne fut pas le premier sous-marin américain à propulsion nucléaire, le « George Washington » devait être le premier équipé de missiles à ogive nucléaire. Ceux-ci (des Polaris, à l'origine), contenus dans 16 tubes verticaux, peuvent être lancés en plongée. Le premier tir réussi eut lieu en juillet 1960 au large de Cap Kennedy (alors Cap Canaveral).

Confiée à l'*U.S. Navy* qui avait déjà, avec les Nike-Ajax et le Nike-Hercules, la charge de la défense contre avions, la défense antimissiles américaine fut basée sur un Nike-Zeus, dont, après quelques essais jugés satisfaisants, on tenta, à la fin de la présidence Eisenhower, d'obtenir la construction de série. Celui-ci préféra laisser la décision à son successeur. M. McNamara, secrétaire à la Défense, n'eut aucune peine à prouver au Président Kennedy l'insuffisance du Nike-Zeus, même amélioré sous la forme d'un Spartan, et la nécessité d'y ajouter un deuxième antimissile à très forte accélération, le Sprint, pour arrêter les missiles qui auraient franchi le barrage des Nike-Zeus. Dénommé Nike-X, l'ensemble est toujours en cours d'essai. Un réseau complet de tels antimissiles protégeant les États-Unis contre l'ensemble des missiles sol-sol et mer-sol de l'*U.R.S.S.* aurait entraîné une dépense de 30 à 40 milliards de dollars que l'on ne pouvait évidemment engager. On pouvait du moins en établir un plus modeste, protégeant contre l'éventualité d'une attaque nucléaire chinoise. M. McNamara dut donc se résigner, fin 1967, après les premières explosions expérimentales en Chine, au déploiement d'un réseau dit « *Sentinel* », au coût de 5 milliards de dollars. Ce programme lui-même a été, au cours de ces dernières semaines, remis en question et fortement réduit.

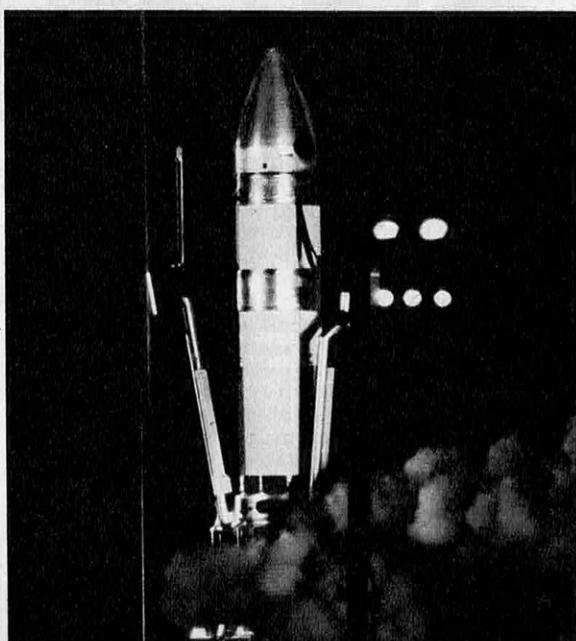
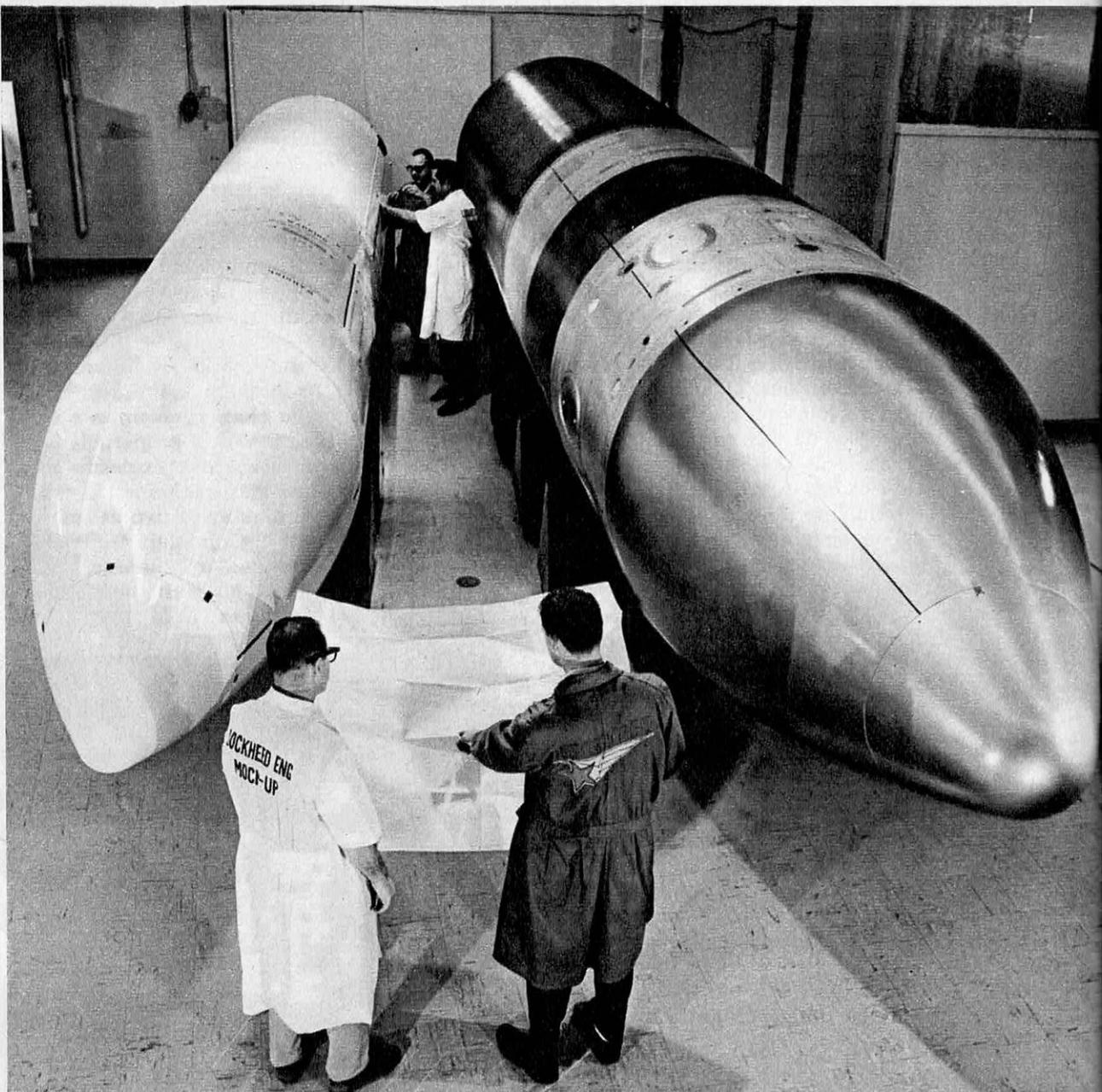
Avec le *Griffon* et le *Galosh*, présentés depuis novembre 1963 pour le premier, novembre 1964 pour le second, lors des défilés de Moscou, le matériel soviétique antimissile ne semble guère différent, quant au principe, du matériel américain. Le *Galosh*, en container de 2,75 m de diamètre, est l'antimissile lourd, à grand rayon d'action, de la formule du *Spartan*. Le *Griffon*, 1,07 m de diamètre, serait l'antimissile léger, à grande accélération, de la formule *Sprint*. Le dispositif ponctuel de défense installé d'abord autour de Léningrad dès 1962, a été depuis étendu à Moscou. Si l'on en croit l'*Institute of Strategic Studies* de Londres, son développement serait complètement arrêté.

Les adversaires de l'antimissile n'ont pas de peine à en trouver la raison. En même temps qu'il se résignait, sur l'insistance du Congrès et du groupe de pression des constructeurs d'antimissiles, au déploiement du réseau léger *Sentinel*, M. McNamara faisait en effet poursuivre l'étude des missiles le mettant en échec. Dans son numéro spécial du 23 octobre 1967, consacré au problème des antimissiles, la revue *Aviation Week* énumérait les 32 programmes de « *pénails* », d'« aides à la pénétration », actuellement aux divers stades de l'étude, de la recherche, du déve-

loppelement ou de la production de série. Ils ont absorbé en moyenne plus de 200 millions de dollars par an depuis six ans. Les aides à la pénétration comprennent 16 programmes de *decoys* (leurre) passifs, 5 de *contre-mesures* actives, 5 classés dans les études, recherches et développement de « *maneuverable re-entry* » et 5 dans les « *re-entry systems* » du Minuteman 3 et du Poseidon. Une parade aux antimissiles, qu'on peut juger à elle seule suffisante, a été expérimentée l'an dernier aux États-Unis avec les cônes de charges multiples du Minuteman 3 et du Poseidon. Ce dernier va remplacer maintenant le Polaris sur les sous-marins atomiques. Pour s'en tenir au Poseidon qui aura jusqu'à dix de ces cônes de charge, ce progrès suppose une amélioration des propulsions solides, une miniaturisation des explosifs thermocélestaires, résultat des centaines d'explosions souterraines poursuivies depuis une dizaine d'années, une microminiaturisation des composants électroniques de guidage. Aucune de ces réalisations n'est, sans recherches longues et coûteuses, à la portée des



Ce sous-marin biplace, à coque catamaran en fibre de verre et dont l'habitacle est une sphère de verre transparent d'un diamètre de 1,50 m, a été proposé par la firme américaine Dow Corning Glass. Celle-ci est spécialisée dans l'utilisation du verre, à titre expérimental, dans la construction de petits sous-marins de recherche. En raison des propriétés du matériau, la résistance du verre s'accroît avec la profondeur, un tel engin pourrait trouver des applications importantes dans le domaine militaire.



Côte à côté, un Polaris A-3 (à gauche) et un Poseidon (à droite) permettent de juger de la différence de taille entre les deux séries de missiles à longue portée, successivement mises en ligne par l'U.S. Navy. Trente et un sur les quarante et un sous-marins lance-missiles américains doivent être modifiés pour ce remplacement. Le premier tir du Poseidon (photo ci-contre), exécuté depuis la terre ferme à Cap Kennedy, fut un succès complet.

pays qui désireraient substituer à leur missiles balistiques mer-sol d'autres missiles de formule analogue à celle du Poseidon. Il leur reste heureusement le recours à des solutions aussi satisfaisantes et plus économiques que nous allons examiner.

Prospective de la guerre des profondeurs

Dans le livre qu'il vient de publier (¹) sur « L'An 2000 », M. Herman Kahn réunit le bilan des travaux sur la Commission de l'An 2000, créée par l'Académie américaine des Arts et des Sciences, et conduits en collaboration avec l'Hudson Institute qu'il dirige. Mathématicien de formation, M. Herman Kahn s'est spécialisé en prospective et plus particulièrement en prospective militaire. Il a été, de 1948 à 1961, le principal collaborateur de la Rand Corporation, une organisation « non-profit », c'est-à-dire à but non lucratif, qui travaille essentiellement pour le secrétariat à la Défense. Ce qui n'empêche pas la Rand de recevoir annuellement, pour l'entretien des quelques centaines de chercheurs et des ordinateurs électroniques indispensables à cette spécialité, quelques millions de dollars du budget militaire des États-Unis.

Dans « L'An 2000 », M. Herman Kahn ne pouvait manquer de faire une large place aux développements escomptés des armes nucléaires, sur lesquels il a déjà publié quelques gros livres.

Dans ce domaine des armes nucléaires, M. Herman Kahn distingue trois technologies : — celle de la fin des années 40 à la fin des années 50 : bombes A et premières bombes H, premiers missiles à portée intercontinentale ;

— celle des années 60, premiers missiles Minuteman et Polaris suivis de leurs versions à charges multiples que viennent d'expérimenter les États-Unis pour mettre en échec l'antimissile ;

— celle des années 1980—2000 avec en particulier l'apparition d'explosifs pour « tsunami », raz de marée engloutissant des régions entières, à côté d'autres « Doomsday Machines » (armes du « jugement dernier »), dont les plus puissantes disloqueraient la Terre en quelques morceaux.

La première expérience sur le raz de marée produit par une explosion nucléaire sous-marine remonte à l'essai Baker de Bikini en 1946. La dernière édition, en 1962, du règlement américain sur « L'effet des armes nucléaires » donne la formule théorique d'extra-

polation de ces résultats. Par les fonds accessibles au large de la côte nord-est des États-Unis, une explosion de 10 mégatonnes soulèverait une vague dont la hauteur de crête, 300 m à 2 km, serait encore de près de 200 m à 10 km et de près de 50 m à 100 km. L'été dernier, lorsque le Sénat et la Chambre des Représentants ont autorisé les premiers travaux du réseau « léger » d'antimissiles « Sentinel », un des nombreux professeurs d'université qui sont aussi sévères pour les antimissiles que pour les missiles, a rappelé aussitôt ces chiffres officiels.

L'immersion de charges nucléaires en profondeur apporte ainsi des solutions aussi aisées qu'économiques à la guerre nucléaire. La miniaturisation des charges ne sera certainement pas à la portée de tous les pays au cours des prochaines années, n'en jugeait-on que par les difficultés rencontrées par la France pour équiper ses missiles sol-sol ou mer-sol. Elle n'est nullement exigée d'une charge immergée au fond des mers par un cargo ou un simple chalutier. L'effet de tels raz de marée assurerait la destruction de régions aussi importantes que la côte nord-est des États-Unis avec des charges accessibles à la plupart des pays.

Prefère-t-on les destructions de la guerre radiologique, qui pourraient s'étendre beaucoup plus loin des côtes ? Avant 1950, le Dr Edward Teller avait déjà signalé la possibilité de lâcher, à bonne distance des côtes américaines, « des nuages radioactifs qui rendraient la vie difficile et même impossible à la population des États-Unis sans qu'il fût besoin de faire éclater une seule bombe au-dessus de leur territoire ». M. Donald A. Quarles, alors secrétaire adjoint à la Défense, en admettait la possibilité, avec des effets allant jusqu'à la destruction de continents entiers. La solution est alors l'immersion à faible profondeur, qui produira un effet moindre de raz de marée, mais des dégâts beaucoup plus lointains. On peut même accompagner la charge d'une de ces enveloppes se transformant en un isotope radioactif, dont le cobalt, qui fut un moment à la mode, n'est certainement ni le seul, ni le plus efficace.

Au reste, si l'on préfère une explosion haute, le lancement de missiles immergés du genre Orca ne paraît pas très difficile. Il ne faut pas tellement de poudre pour faire monter à 50 km une charge nucléaire au poids de quelques tonnes et à la puissance de quelques dizaines de mégatonnes. Et l'on ne voit pas très bien comment un antimissile pourrait l'intercepter sur cette trajectoire ascendante.

Camille ROUGERON

(¹) « L'An 2000 », traduction française (Robert Laffont - Paris).

L'aventure archéologique



L'« Archéonaute », longueur 30 m, déplacement 112 tonnes, représente une contribution essentielle des pouvoirs publics à l'archéologie sous-marine. Ce navire est surtout destiné aux recherches côtières, telle ici, l'exploration des grottes préhistoriques submergées de la région de Cassis.



L'archéologie sous-marine n'a pas subi la loi habituelle de l'évolution des sciences. Elle est née d'une aventure aux péripéties pleines de rebondissements, « l'aventure sous-marine ».

Les plus fervents disciples de cette jeune science, et parfois même les plus chevronnés, sont en effet, avant tout, des « aventuriers de la mer ». Ils se sont laissés prendre à ses profondeurs, ont connu les joies de la découverte d'un monde nouveau et ne redeviendront jamais tout à fait des terriens.

Les pionniers

Les premiers de ces chercheurs qui, en France, eurent l'idée d'aller fouiller sous les eaux de la mer pour y découvrir la trace des civilisations passées et nous en rapporter les vestiges, ne possédaient, en fait d'équipement de plongée, qu'un outillage rudimentaire si on le compare aux moyens dont peut disposer actuellement un simple plongeur. Une lunette étanche, un tube de caoutchouc, une paire de palmes et un vieux couteau en constituaient à peu près la seule panoplie.

C'est pourtant de cette époque, aux environs de 1938, que datent les premières tentatives d'exploration d'archéologie sous-marine.

Retenant leur souffle, plongeant jusqu'à quinze mètres de profondeur, ces aventuriers parvinrent, au prix d'efforts physiques épuisants, à arracher aux sables et aux roches et à révéler à la surface les premiers témoignages d'un lointain passé, qu'on pensait à jamais rayés de l'histoire des hommes.

Tels furent les premiers balbutiements d'une science qui allait progressivement se perfectionner d'année en année. Certes, l'archéologie pratiquée alors était impuissante à nous révéler les données du contexte, à préciser le milieu ambiant et à replacer la « découverte » dans son ordre propre pour en permettre une analyse approfondie. Elle s'attachait plus simplement au sauvetage de l'objet, sans qu'il lui soit permis de nous fournir l'explication raisonnée de sa présence sous les eaux ou de ses origines possibles. Ce sauvetage était cependant indispensable pour éviter le pillage des sites au fur et à mesure de leur découverte, car les mesures de protection envisagées s'avéraient, dans la majorité des cas, absolument inefficaces. Il était

nécessaire aussi de soustraire les objets, pour la plupart fragiles, aux destructions par les tempêtes et les courants.

L'invention du scaphandre autonome, conçu en 1925 par le commandant Le Prieur, devait élargir l'horizon des recherches. Il allait en effet permettre à l'homme de s'aventurer plus profondément sous les eaux, d'y séjournier plus longtemps et d'y exercer désormais une activité comparable à celle possible en surface : pose de repères fixes facilement décelables, prise de photographies, mesures plus vastes, observation du contexte et du milieu, comparaison des sites, etc. Mais c'est finalement moins l'immense valeur technique de l'équipement qui, perfectionné en 1933, se composait d'une bouteille d'air comprimé, d'un détendeur et d'un masque, que l'influence de son inventeur et son rayonnement qui donnèrent l'impulsion indispensable au développement de la jeune science. Le premier, le commandant Le Prieur, en effet, s'appliqua à tirer de sa découverte tous les avantages qu'elle pouvait entraîner dans tous les domaines, pour la connaissance de l'homme, de son passé, de son histoire.

L'homme avait désormais en sa possession le moyen de découvrir et de révéler au monde l'histoire cachée sous les eaux. Ce moyen allait se montrer bientôt encore plus efficace, lorsqu'en 1943 le commandant J.-Y. Cousteau et l'ingénieur Gagnan conçurent un scaphandre autonome permettant l'exploration des fonds de plus de 50 mètres. Ainsi allait-on voir peu à peu se constituer une science difficile exigeant des chercheurs discipline dans la réalisation des fouilles et méthode dans le travail de recherches.

Vingt-cinq ans d'effort

En 1944, sous l'impulsion de Philippe Taillez et Jacques-Yves Cousteau était créé un « Groupe de Recherches Sous-Marines ». Des campagnes de fouilles allaient se succéder en Méditerranée, qui permirent l'expérimentation et la mise au point de tout un matériel de dévasage, de levage, de mesure et de prise de vues sous-marines.

L'épave du « Tilan » repose en Méditerranée, près des îles du Levant, depuis près de 20 siècles.

Découverte par le docteur Piroux, elle a été fouillée pour la première fois en 1957 par le commandant Taillez.

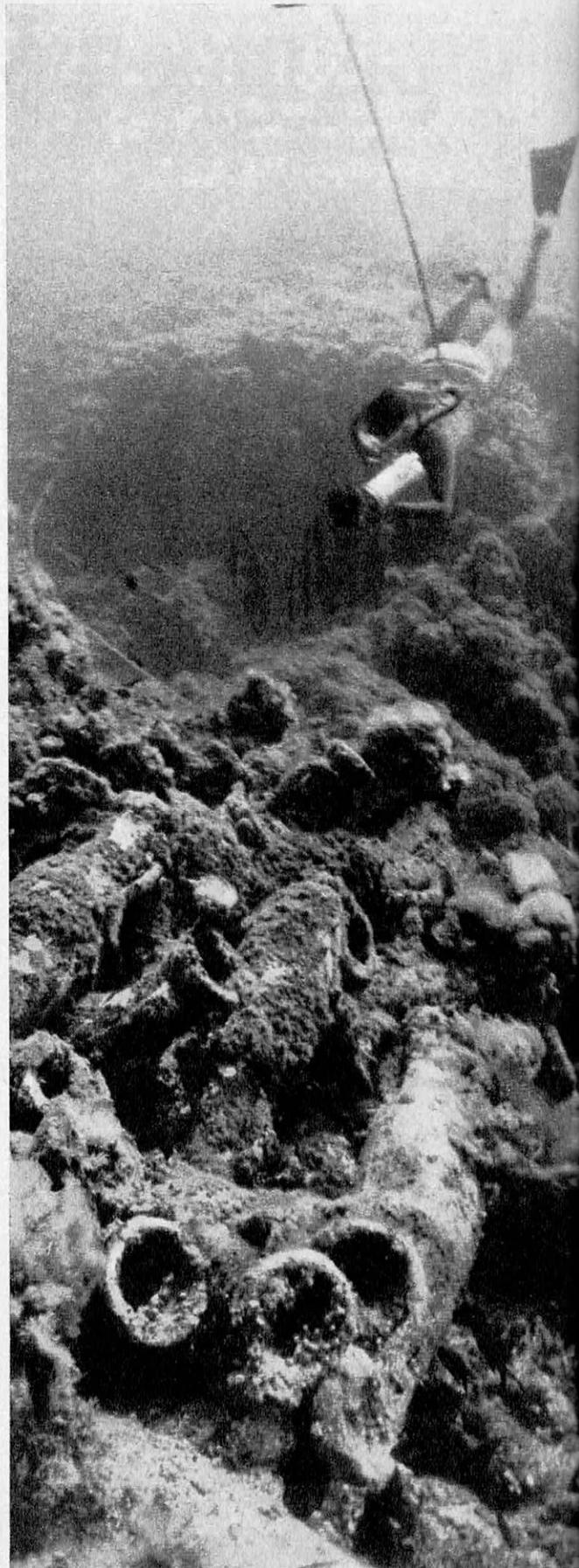


PHOTO REBKOFF - AFFAIRES CULTURELLES

1949 voyait le commandant P. Taillez explorer, à Anthéor, l'épave d'un navire ayant fait naufrage vers 80 avant J.-C.

1952 fut l'année de la première expérience mettant en œuvre d'importants moyens et une collaboration savants-plongeurs. Le commandant Cousteau dirigeait l'opération à laquelle prenait part l'équipe de plongeurs de la *Calypso*. Le professeur Fernand Benoît, directeur de la Circonscription des Antiquités de Provence s'associait aux recherches. 6 000 pièces de vaisselle campanienne, 2 000 amphores rhodiennes et romaines (¹), des pièces de gréement en plomb, des clous de bronze et des parties de la coque d'un navire ayant sombré vers le milieu du II^e siècle avant notre ère, fournissaient le premier bilan de cette fouille qui fit, en outre, l'objet d'une très belle étude publiée par le professeur Fernand Benoît (²).

En 1956, le docteur Georges Delonca, auquel on doit la découverte de nombreuses épaves antiques dans l'anse du Cap-Roux, à Cavalaire, fondait à St-Raphaël, le Groupe d'Etudes et de Sports Sous-Marins dont les magnifiques trouvailles devaient mener, le 2 août 1968, à la création d'un très beau musée (³).

En 1957, aux îles du Levant, le commandant Taillez fouillait l'épave du « Titan », datée de la fin du I^{er} siècle avant J.-C. et découverte par le docteur Piroux.

En 1959, le commandant Cousteau, à bord de l'*Espadon*, organisait avec l'aide de l'ingénieur A. Sivirine, des recherches sur une épave datée du dernier tiers du I^{er} siècle avant J.-C., découverte par C. L. Santamaria. En 1960, nous créions, à Agde, le Groupe de Recherches Archéologiques Sub-Aquatiques et de Plongée qui devait mener à la localisation de vingt et un sites ou gisements, de deux épaves du XVII-XVIII^e siècle et d'une importante construction d'architecture ionique. L'amoncellement de ses découvertes, parmi lesquelles il faut citer trois intéressantes chronologies d'amphores (⁴), des ancrages de toutes sortes de matériaux et des sondes de navires, des céramiques diverses, des pierres ouvrées, des bronzes, etc., permettait l'ouverture de salles spécialisées dans le vieux musée local. Ainsi Agde devenait un haut-lieu de l'archéologie sub-aquatique et sa municipalité envisageait la création d'un musée, actuellement en voie de réalisation.

(1) Musée Borély - Marseille.

(2) L'épave du Grand Congloué à Marseille - Fernand Benoit.

(3) Voir « Plongées » n° 50 ; décembre 1968.

(4) « L'aventure sous-marine » n° 36 (décembre 61 - janvier 62) et n° 59 (avril - mai 66).

PHOTO U.S.I.S.

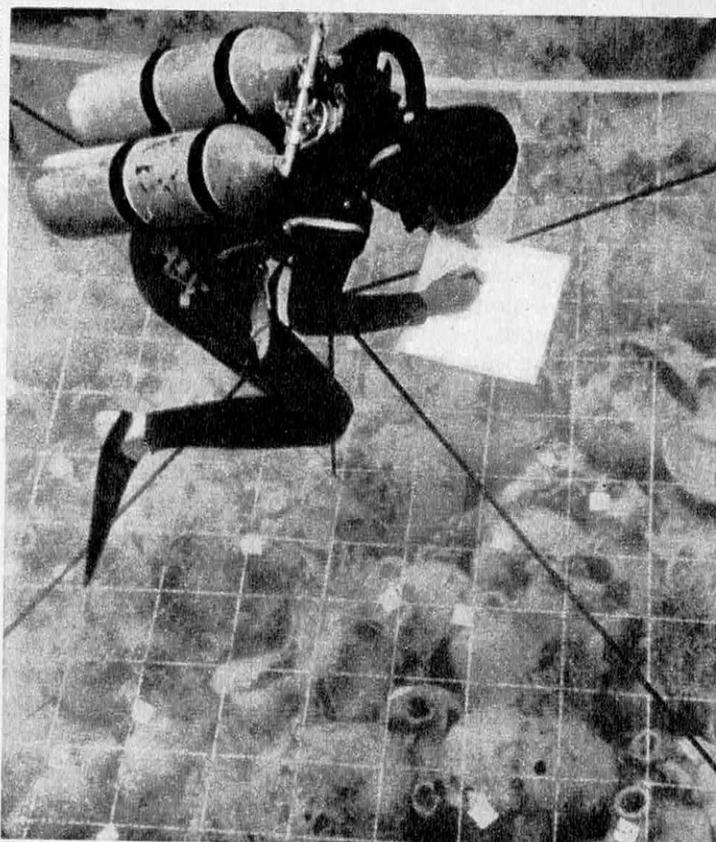


PHOTO C.G. DORIS



Avant qu'on commence à remonter à la surface les pièces d'un important gisement, un plongeur en exécute un relevé précis, à l'aide d'un carroyage de câbles légers établi au-dessus du fond (photo en haut).

En bas, un champ d'amphores photographié par 400 m de fond dans le détroit de Gibraltar.

En septembre 1966, le ministère des Affaires Culturelles créait une Direction des Recherches d'Archéologie Sous-Marine, installée dans les locaux du fort St-Jean à Marseille. En septembre 1967, il la dotait d'un bateau de 30 mètres, l'*Archéonaute*, équipé d'un matériel perfectionné : appareillage de plongée, radio, télévision sous-marine, laboratoire photographique, échosondeur, caisson de compression, appareil de levage perfectionné, suceuse, lance à eau, etc. Un équipage de sept hommes de la Marine nationale en assure la marche. Il est aménagé pour recevoir quatre plongeurs, un photographe, deux scientifiques et le chef de l'expédition.

Ainsi l'administration se lançait à son tour dans la grande aventure, avec des moyens importants.

Le bilan de ces quelque vingt-cinq ans d'exploration sous-marine est positif. Cette jeune science a en effet permis non seulement la découverte de richesses ignorées, mais aussi une meilleure connaissance de l'histoire des civilisations passées. De nombreuses hypothèses quant aux migrations, aux mutations, ou aux influences des civilisations les unes sur les autres, se trouvent confirmées ou infirmées par l'analyse des récentes découvertes sub-aquatiques.

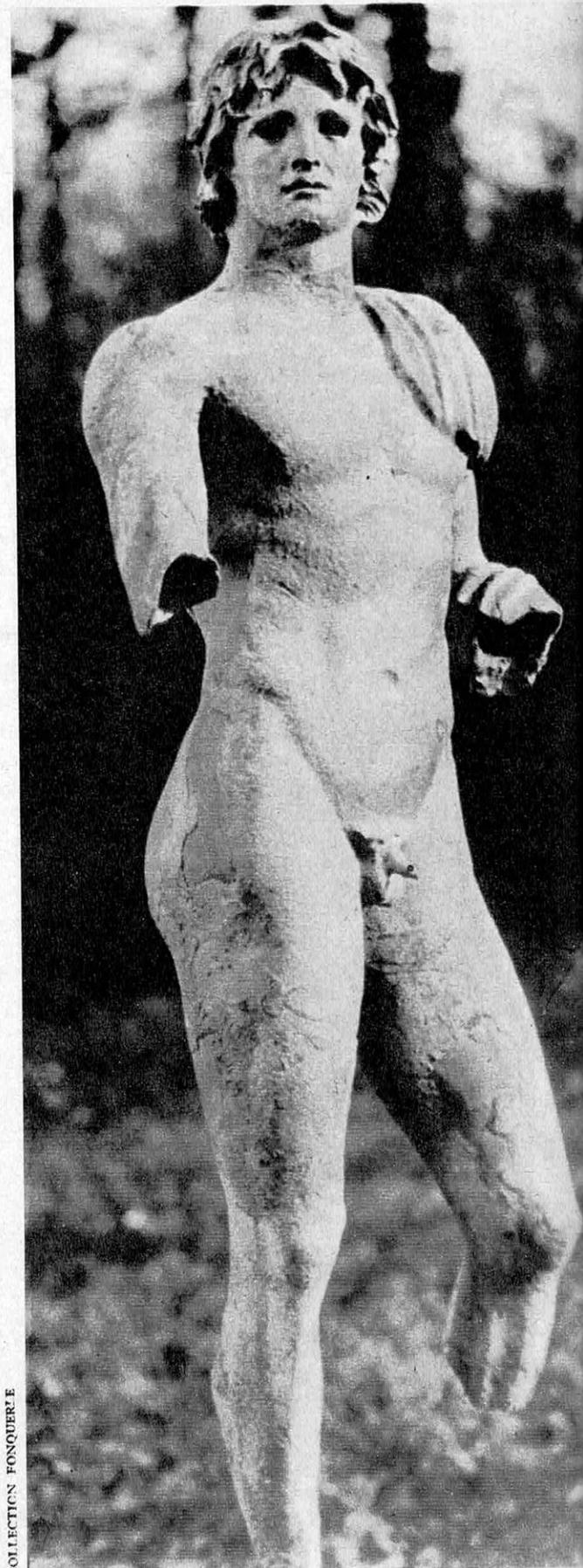
L'avenir de l'archéologie sous-marine

L'archéologie sub-aquatique a été jusqu'à nos jours le fruit d'initiatives privées, de dévouements individuels et collectifs. L'immen-
sité de la tâche à accomplir, en fonction de la multiplicité des découvertes, de l'importance et de la richesse des sites, rend de plus en plus difficile l'action des individualités bénévoles.

Dans ces conditions, quel est l'avenir de l'archéologie sous-marine ?

D'aucuns ont rêvé qu'elle passe un jour de « l'initiative privée à l'entreprise officielle régie par l'Etat » et que l'unique fouilleur reconnu par la Direction des Recherches Archéologiques en soit son directeur lui-même. C'est refuser de reconnaître ce qui a déjà été fait ; c'est nier aux bénévoles, sans l'action

Si les épaves livrent surtout des objets utilitaires et enrichissent notre connaissance de l'histoire des techniques, les édifices engloutis recèlent des vestiges d'ordre plus purement artistique, telle cette statue, sauvée des eaux par le Groupe d'archéologie sub-aquatique d'Agde.



COLLECTION FONQUERTE

desquels la recherche archéologique sous-marine n'existerait pas, le droit à la participation dans la découverte.

Certes, l'archéologie sous-marine exige désormais des moyens puissants, matériels, financiers. Elle exige aussi de profondes connaissances pour que, désormais, l'action entreprise ne soit plus réduite à un simple sauvetage de l'objet, mais à une analyse profonde de son contexte. Mais la preuve nous est apportée, tous les jours, aussi bien sur terre que sous les eaux, que de plus en plus les découvertes sont l'œuvre de ceux qui, sur les lieux qu'ils affectionnent, qu'ils parcourent chaque jour, sont attentifs à chaque modification de structure. L'apparition d'un vestige, d'une trace, d'un élément infime, ne saurait leur échapper, et cette attitude prend une valeur encore plus grande lorsque leur zone d'évolution se situe sous l'eau. Il est alors bien évident que l'entreprise officielle a besoin, pour s'exercer, de l'initiative privée.

Une preuve nouvelle en est la collaboration de l'*Archéonaute* et des plongeurs du groupe de recherches d'Agde durant une campagne de sept jours, pour la mise à jour d'éléments

d'architecture hellénistique enfouis dans le lit de l'Hérault.

Il ne convient nullement de donner une solution trop tranchée au problème de l'avenir de l'archéologie sous-marine.

Le rôle des services officiels est indispensable dans un souci d'uniformisation, d'homogénéisation et d'équilibre. Ils apporteront la contribution technique et l'aide matérielle nécessaires, ils seront le creuset de l'analyse et de la recherche. Mais les bénévoles, s'ils sont encouragés, convenablement aidés matériellement, pourront de plus en plus apporter un précieux concours au développement de cette science neuve pour laquelle ils professent un enthousiasme débordant. Ils ont une connaissance profonde des sites qui leur sont familiers et aucun élément étranger ne saurait leur échapper.

Ils savent aussi que, devant les moyens techniques mis à la disposition du premier venu, leur crainte de voir piller irrémédiablement des sites connus ou ignorés encore constitue une réalité de chaque jour.

Denis FONQUERLE

L'ARCHÉOLOGIE SOUS-MARINE ET LA LOI

Les dispositions législatives et réglementaires applicables en matière de police des épaves présentant un intérêt archéologique, historique ou artistique sont prévues par la loi n° 61-1262 du 24 novembre 1961, le décret 61-1547 du 26 décembre 1961 et l'arrêté du 4 février 1965. Les données essentielles en sont les suivantes :

1^o Les épaves présentant un intérêt historique, archéologique ou artistique appartiennent à l'État. Il s'ensuit que leur détournement, la tentative de détournement ou leur recel relèvent des dispositions des articles 401 et 460 du Code Pénal, assorties de confiscation au profit des collections nationales. Toute destruction intentionnelle, mutilation ou détérioration est punissable des peines prévues à l'article 257 du Code Pénal.

2^o La déclaration des découvertes d'épaves isolées ou de gisements homogènes est obligatoire auprès de l'Inscription Maritime habilitée à assurer leur protection et leur sauvegarde. Suivant les dispositions de l'article 31 du décret du 26 décembre 1961, l'omission de déclaration donne lieu à amende et, en cas de récidive, à emprisonnement.

La Direction des Antiquités est tenue informée par une copie de la déclaration, assortie de renseignements techniques et scientifiques complémentaires, et se prononce sur l'intérêt archéologique de la découverte : dans l'affirmative, les dispositions particulières prévues par la réglementation sont désormais applicables.

OBJETS ISOLÉS: Ces objets doivent être déclarés dans un délai de 48 heures et, dans la mesure où cela est possible, sont mis en

sûreté par le sauveteur au lieu de dépôt fixé par l'Administrateur de l'Inscription Maritime, en accord avec la Direction des Antiquités.

Toutefois, la mise en dépôt réel pouvant s'avérer délicate ou impossible, la reconnaissance d'un dépôt fictif chez l'inventeur pourra être proposée. Appartenant à l'État, les objets découverts et déclarés peuvent être :

- soit affectés et conservés dans les collections publiques, et, dans ce cas, une indemnisation peut être consentie au sauveteur ;
- soit remis par l'Administration de l'Inscription Maritime à l'inventeur après apposition d'une marque particulière et signature d'un procès-verbal de cession.

GISEMENTS ARCHÉOLOGIQUES: La découverte d'un gisement donne lieu à délivrance d'une attestation d'inventeur, après constitution d'un dossier complet de reconnaissance accepté par la Direction des Antiquités.

La récupération d'un gisement archéologique sous-marin peut être assurée :

- par l'État, et, dans ce cas l'inventeur a droit à une indemnité fixée à l'amiable ou à dire d'experts selon les dispositions de l'article 25 du décret sus-visé ;
- par l'inventeur ou un concessionnaire autre que celui-ci (dans ce cas ses droits sont garantis comme indiqué ci-dessus) sous le contrôle de la Direction Régionale des Antiquités.

Les objets découverts et ramenés à terre, lorsqu'il s'agit de l'exploitation d'un gisement, doivent obligatoirement être déposés dans un local désigné par le Directeur des Antiquités.

VERS UN STATUT JURIDIQUE DES OCÉANS

La mer apparaît de plus en plus comme une source de richesses. Si son rôle de voie de communication reste de toute première importance, si la pêche, en attendant l'aquiculture, fournit un apport essentiel à l'alimentation humaine, le développement des techniques récentes a permis de découvrir que le fond et le tréfond de la mer recèlent des richesses minérales, végétales et animales dont l'inventaire est loin d'être achevé.

Ainsi les océans, qui représentent 70 % de la surface du globe, constituent la « dernière frontière » de notre planète au sens où l'entendent les Américains et, partant, un domaine de compétition. Gouvernements et industriels consacrent des sommes de plus en plus importantes au développement des sciences et techniques de la mer qui connaissent un essor considérable. Certains pays se sont dotés d'organismes spéciaux, chargés de coordonner l'étude de ces problèmes complexes : National Council on Marine Resources and Engineering Development aux Etats-Unis, Centre National pour l'Exploitation des Océans en France.

Parallèlement, sur le plan du droit, on assiste à une véritable transformation de l'attitude des Etats à l'égard du milieu marin, qui n'est plus identifié à son seul élément liquide et aux activités traditionnelles de navigation et de pêche. La proclamation Truman du 28 septembre 1945 devait jeter les bases de la doctrine dite « du plateau continental » en marquant la première revendication de droits exclusifs sur celui-ci. Elle fut suivie de nombreuses déclarations unilatérales, d'Etats sud-américains notamment.

La Commission de droit international de l'ONU élabora une Convention qui fut signée à Genève le 29 avril 1958. La Convention reconnaît à l'Etat riverain des droits souverains sur le plateau continental « aux fins de l'exploration de celui-ci et de l'exploitation de ses ressources naturelles ». Elle précise qu'il n'est pas porté atteinte « au ré-

gime des eaux susjacentes en tant que haute mer ni à celui de l'espace aérien situé au-dessus de ces eaux ».

La définition de cette partie du sol sous-marin qui forme le plateau continental est le résultat de laborieux compromis et retient deux critères concurrents : l'un fixe (l'isobathe 200 mètres) ; l'autre de nature évolutive (le point où la profondeur permet l'exploitation), susceptible d'adaptation continue mais aussi générateur de nombreuses difficultés.

Quant aux fonds marins situés au-delà du plateau continental, qui semblaient inaccessibles, on ne s'en était guère préoccupé. Le rythme accéléré du progrès scientifique et technique laissant entrevoir des possibilités d'exploitation dans un avenir assez proche, le régime du lit de la mer et l'appropriation de ses ressources retiennent l'attention de divers groupements et des Nations Unies.

LA PROPOSITION MALTAISE ET LE CONTRE- PROJET AMÉRICAIN

L'Assemblée Générale et le Conseil Economique et Social de l'ONU ont invité le Secrétariat Général à présenter une série de rapports qui font le point de la question :

- rapport sur les ressources de la mer au-delà du plateau continental (ressources minérales et alimentaires, à l'exclusion du poisson), en application de la résolution du Conseil Economique et Social du 11 mars 1966 ;
- rapport du groupe d'experts sur les sciences et techniques de la mer créé par l'Assemblée Générale des Nations Unies le 8 décembre 1966.

En septembre 1967, le gouvernement de Malte proposait d'inscrire à l'ordre du jour de la XXII^e session de l'Assemblée Générale un point intitulé « déclaration et traité relatifs à l'utilisation pacifique des fonds marins et océaniques situés au-delà des li-

mites de juridiction nationale actuelles et à l'exploitation de leurs ressources dans l'intérêt de l'humanité».

Un aide-mémoire expliquait les raisons qui avaient conduit à proposer que les fonds marins soient déclarés patrimoine commun de l'humanité, à envisager d'en confier le contrôle et la gestion à un organisme international et à affecter les bénéfices financiers à l'aide au développement des pays pauvres. L'initiative maltaise traduit une évolution dans l'approche des problèmes juridiques posés par le progrès scientifique. Comme en matière spatiale, où dès 1966 fut établi un traité sur «les principes devant régir l'activité des Etats dans le domaine de l'exploration et de l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes», la réflexion devance ici l'expérience. On estime que le droit doit précéder la technique et prévoir le règlement de certaines situations avant qu'elles ne soient réalisées concrètement. Ainsi, dans le cas des fonds marins, pense-t-on éviter qu'ils ne deviennent l'enjeu de compétitions et l'objet d'appropriations nationales.

L'initiative vient cette fois d'un petit pays, porte-parole des pays en voie de développement, qui manifestent ainsi leur désir d'être à l'origine d'un nouveau droit international qui ne serait plus d'inspiration européenne, libérale et individualiste, consacrant l'avance des pays industrialisés, mais un droit de caractère interventionniste et collectiviste, assorti de mécanismes de redistribution.

Les développements qui suivirent la proposition maltaise ne firent que confirmer ce clivage entre les pays du tiers-monde, particulièrement sensibilisés, et les états techniquement avancés, très hésitants à s'engager dans un domaine incertain et encore mal connu.

L'Assemblée générale des Nations Unies adopta une solution d'attente : la résolution 2340 du 21 décembre 1968 institua un Comité *ad hoc*, composé de 35 membres, en vue d'étudier «l'affectation à des fins pacifiques du lit des mers et des océans ainsi que de leur sous-sol en haute mer, au-delà des limites de la juridiction nationale actuelle, et de l'exploitation de leurs ressources dans l'intérêt de l'humanité».

En réplique à l'initiative maltaise, les Etats-Unis présentèrent au Comité Spécial une proposition de *décennie internationale* d'exploration des océans qui révèle une approche beaucoup plus classique du problème et dont le champ d'application n'est pas li-

mité aux fonds marins, mais embrasse l'ensemble du milieu océanique.

Avant de s'engager dans une nouvelle aventure, sans doute prometteuse mais pleine de risques, la première démarche, selon eux, consiste à réunir les données de base essentielles, à développer les recherches pour établir un bilan des ressources océaniques. Ils proposent ainsi un programme coordonné par la COI (Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO) sur une série de thèmes, selon des plans formulés par les Etats qui s'engagent à fournir les crédits nécessaires. Ces thèmes sont les suivants :

- exploration des ressources biologiques ;
- exploration des fonds marins ;
- étude des phénomènes océaniques et météorologiques ;
- assistance technique aux pays en voie de développement.

Le projet de résolution sur la décennie des océans, considéré au début comme une manœuvre dilatoire par les pays du Tiers monde, a été cependant adopté à l'unanimité le 21 décembre 1968 par l'Assemblée Générale. A la demande des pays en voie de développement, le texte a subi de multiples retouches destinées à préciser que la décennie s'inscrit dans le cadre d'un programme à long terme, placé sous l'égide des Nations Unies.

L'UTILISATION PACIFIQUE DES FONDS MARINS

La résolution 2340 de l'Assemblée Générale des Nations Unies, adoptée à la suite de la proposition de Malte et évoquée plus haut, soulève deux séries de problèmes juridiques fondamentaux. Le premier est celui de l'affectation des fonds marins à des fins exclusivement pacifiques.

Les possibilités d'utilisations militaires des fonds marins suscitent un intérêt croissant. Souvent mal connues, elles font l'objet d'études et de recherches très actives.

Le relief sous-marin, au-delà de la marge continentale (plateau et pente continentaux), consiste en de vastes dépressions (plaines abyssales) au-dessus desquelles s'élèvent des chaînes océaniques, dorsales ou crêtes. Sans parler de l'éventuelle utilisation des plaines abyssales, le plateau continental et les pics océaniques (c'est-à-dire certaines parties des chaînes océaniques) pourraient être assez rapidement aménagés à des fins défensives

ou offensives, pour la mise en place d'armes nucléaires ou de type classique.

Plus généralement, l'océan offre un camouflage qui permet de mieux échapper à la surveillance par satellites. Il semble actuellement que des recherches intensives soient menées par les grandes puissances en vue d'améliorer les techniques de détection sous-marines et de mettre au point des contre-mesures pour s'y soustraire soi-même. Outre les sous-marins et les moyens de détection classiques, on peut envisager l'installation de bases habitées par des aquanautes.

La notion d'« utilisation pacifique » est cependant susceptible de diverses acceptations quant à l'étendue des zones concernées, à son contenu, et peut être mise en œuvre selon différentes procédures.

Le milieu marin forme un tout et il peut sembler artificiel d'interdire l'utilisation militaire des fonds situés uniquement au-delà de la juridiction nationale (c'est-à-dire au-delà du plateau continental).

Telle était pourtant la thèse de l'URSS qui a soutenu que le principe devait s'appliquer à partir de la limite extérieure des eaux territoriales. La délégation maltaise n'a pas manqué de relever qu'elle paraissait vouloir ainsi empêcher que les systèmes de détection installés sur le plateau continental repèrent sa flotte de sous-marins.

La notion d'utilisation pacifique elle-même a donné lieu à plusieurs interprétations. Elle implique, aux dires de l'URSS, l'exclusion de toute activité militaire. Selon une conception plus nuancée, l'utilisation pacifique serait une utilisation conforme au droit international et aux principes de la Charte des Nations Unies et ne saurait s'opposer à l'emploi par les Etats de leurs moyens maritimes de défense. Il s'agit avant tout, comme le remarquent les Etats-Unis, d'empêcher que ce nouveau milieu soit utilisé pour la mise en place d'armes de destruction massive. La France, quant à elle, a déclaré que l'acceptation du principe d'utilisation pacifique était liée aux progrès faits par ailleurs en matière de désarmement général.

Certains pays ont envisagé de renvoyer le problème au Comité de Genève sur le désarmement. L'Assemblée Générale a finalement estimé qu'il convenait « d'étudier plus avant, en tenant compte des études et négociations internationales entreprises en matière de désarmement, l'affectation exclusive à des fins pacifiques du fond des mers et des océans sans préjudice des limites qui pourraient être convenues à cet égard. »

EXPLOITER LES FONDS MARINS DANS L'INTÉRÊT DE L'HUMANITÉ

Tel est le deuxième problème posé par la résolution maltaise.

A qui appartiennent les fonds marins et leurs ressources ? Comment et au bénéfice de qui seront-ils exploités ? Ces questions provoquent d'infinies discussions.

Le problème du statut des fonds marins est étroitement lié à celui des limites de la juridiction nationale, c'est-à-dire du plateau continental, dont il suppose une définition claire et précise.

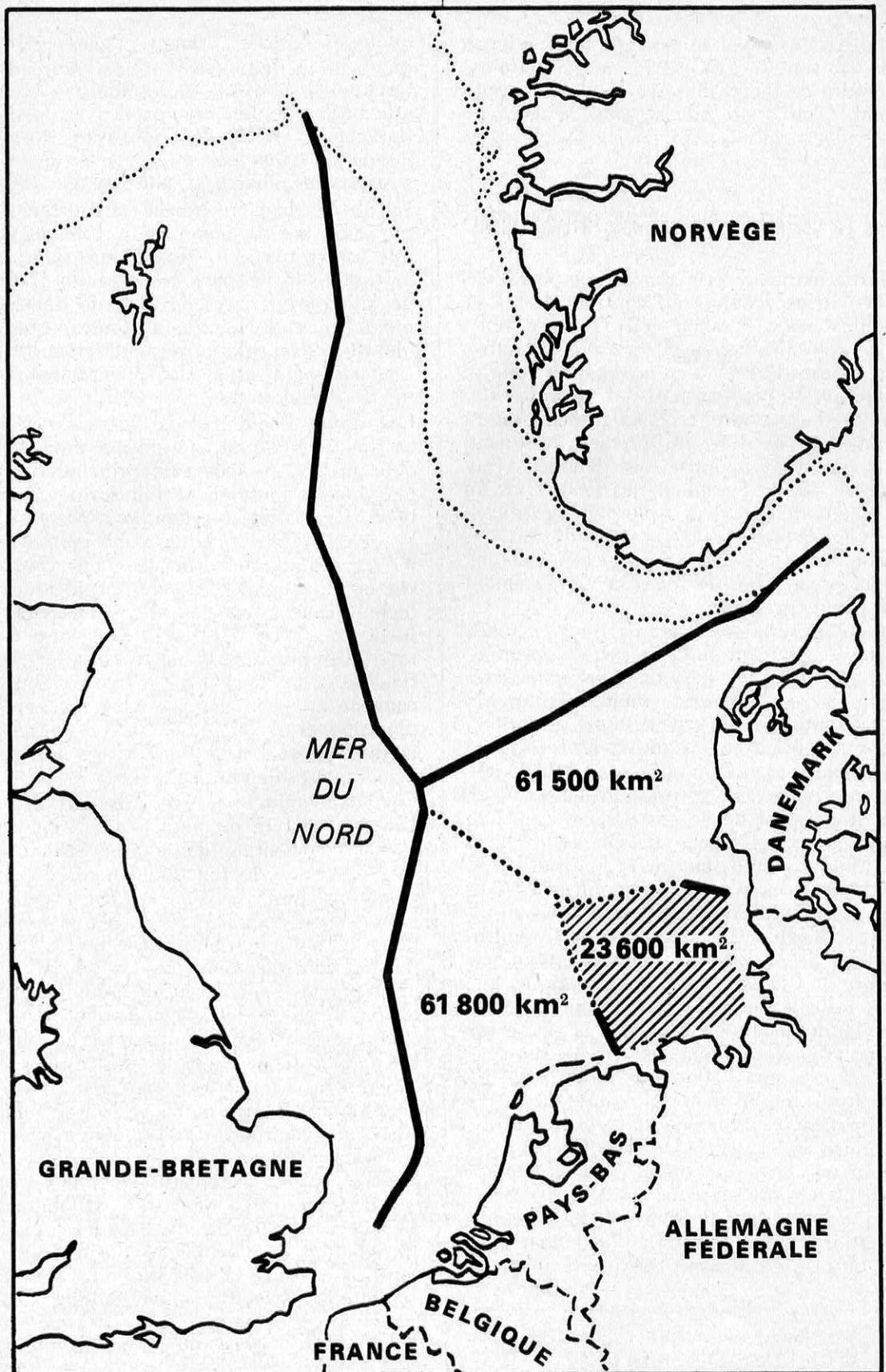
Si l'interprétation du critère d'exploitabilité retenu par la Convention de Genève conduirait à généraliser l'application du principe d'équidistance, l'Etat riverain étendrait sa souveraineté sur le fond de la haute mer jusqu'à une ligne tracée à moitié de la distance qui le sépare des Etats riverains sur le rivage opposé. L'on aboutirait à un partage des océans dans des conditions très discutables, en particulier en raison de la présence d'îles.

C'est une situation de ce genre que l'on trouve en mer du Nord où les fonds ne dépassent généralement pas 200 mètres et où la délimitation du plateau continental donne lieu à de sérieuses difficultés entre la République Fédérale d'Allemagne, le Danemark et les Pays-Bas (différend porté devant la Cour de La Haye qui a écarté l'application automatique du principe d'équidistance).

La nécessité de fixer de manière plus précise de nouvelles frontières aux fonds marins, par rapport aux juridictions nationales, se fait sentir non seulement parce que la limite extérieure du plateau continental est susceptible de se déplacer avec les progrès de la technologie, mais aussi parce que de nombreux pays (latino-américains notamment) ont émis des prétentions excessives sur les eaux et les fonds adjacents à leurs territoires. Certaines déclarations ont porté à 200 milles la limite des eaux territoriales ou revendiqué la souveraineté sur les eaux, le sol et le sous-sol marins dans la limite de 200 milles à partir de la côte.

Au cours des discussions, on a d'ailleurs reconnu l'existence d'une région du fond des mers non soumise à la juridiction nationale,

En page de droite, les zones de partage de la mer du Nord, entre la Grande-Bretagne, la Norvège, le Danemark, les Pays-Bas et l'Allemagne fédérale, qui font l'objet de discussions à l'heure où nous mettons sous presse.



et on a relevé que ni le droit international, ni la Convention de Genève, ne permettaient d'étendre de façon illimitée le plateau continental. Tel était précisément le contenu d'une déclaration jointe par la France à sa ratification de la Convention.

VERS LA DÉFINITION D'UN RÉGIME INTERNATIONAL

Une fois acquis le principe qu'une partie des fonds marins échappe au contrôle des Etats riverains, reste à savoir s'ils feront l'objet d'une appropriation exclusive ou collective. Si l'on considère la mer comme *res nullius*, la solution du pavillon national, selon le principe de laisser-faire technologique, conduit à consacrer le droit du premier occupant. Cette situation maintes fois dénoncée (notamment par le Président des Etats-Unis au lancement du navire d'exploration géophysique *Gloster Challenger*) risque de susciter de nombreuses rivalités de type néo-colonial, que la proposition de Malte avait justement pour but de prévenir.

Il a été généralement admis que les fonds marins ne peuvent faire l'objet d'appropriation nationale et doivent être considérés comme le patrimoine commun de l'humanité. L'adoption d'une déclaration de principes, semblable à celle figurant dans le traité sur l'espace extra-atmosphérique⁽¹⁾ ne devrait pas soulever de grandes difficultés.

Mais il convient de ne pas pousser trop loin l'analogie entre l'Espace et l'Océan, car l'exploitation des fonds marins et l'utilisation de leurs ressources posent des problèmes beaucoup plus complexes. Le système de consultations, d'échanges d'informations, autrement dit de laisser-faire contrôlé prévu par le traité de l'Espace ou de l'Antarctique, apparaît insuffisamment efficace pour éviter la création de monopoles de fait et préserver les activités traditionnelles (pêche, navigation) et les installations d'intérêt collectif (câbles sous-marins, bouées, signalisation).

D'autre part, l'octroi d'un titre juridique est nécessaire à l'exercice des activités de prospection ou d'exploitation et à la protection des dispositifs mis en place.

Si un accord s'est dessiné sur la nécessité de définir un régime international pour l'exploitation de cette zone du lit des mers, si

quelques grands principes généraux semblent admis (activités conformes au droit international, respect de la liberté des mers, affectation à des fins pacifiques, exploitation dans l'intérêt de l'humanité), le contenu de ces principes et leur mise en œuvre suscitent les plus vives controverses.

La liberté de la recherche scientifique, déjà pratiquée par la Commission Océanographique Intergouvernementale et qui figure dans le traité sur l'Espace, soulève des réserves de la part des pays en voie de développement qui s'attachent à démontrer que l'exploration scientifique ne peut servir de base à une revendication de souveraineté, voire même d'exploitation.

Les opinions sont très partagées sur l'opportunité de créer un mécanisme international pour mettre en œuvre le principe d'exploitation dans l'intérêt de l'humanité tout entière. Un projet de résolution présenté par les pays du Tiers-monde a été adopté, mais les pays du groupe socialiste ont voté contre et la plupart des pays occidentaux ou techniquement avancés se sont abstenus. Le texte, très nuancé, prie le Secrétaire Général d'entreprendre « une étude sur la question de la création en temps voulu d'un mécanisme approprié en vue de favoriser l'exploration et l'exploitation des ressources de cette zone et l'utilisation de ces ressources dans l'intérêt de l'humanité... »

En l'état actuel des travaux aux Nations Unies, il paraît prématuré de s'interroger sur la composition d'une telle structure et sur ses règles de fonctionnement. Faudrait-il établir un organisme rattaché plus ou moins étroitement à l'ONU, à représentation égalitaire, ou obéissant à des critères de pondération, disposant ou non de ressources propres ? Ce sont des problèmes que même les pays en voie de développement n'ont pas encore osé aborder au cours de débats. Les projets contenant des suggestions plus concrètes ne manquent cependant pas. On peut signaler, entre autres, celui du sénateur américain Clairborne Pell qui démarque de nombreuses dispositions du traité de l'Espace. Il préconise la création de deux instances relevant des Nations Unies, l'une chargée d'octroyer des licences et désignée avec approbation du Conseil de Sécurité, l'autre constituant sous le contrôle du Conseil de Sécurité une force de police (*sea-guards*) analogue aux *coast-guards* américains, destinée à surveiller et protéger les installations. Un projet de « traité » gouvernant l'exploration et l'utilisation du lit des océans a été

(1) L'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes, ne peut faire l'objet d'appropriation nationale par proclamation de souveraineté, ni par voie d'utilisation ou d'occupation, ni par aucun autre moyen.

élaboré par un Comité sous la présidence de Aaron Danzig. S'inspirant aussi du traité de l'Espace, il propose la création d'une institution spécialisée, d'une « Ocean Agency », chargée d'édicter une réglementation et de conférer des droits sur les fonds marins. Ses structures seraient calquées sur celles du Fonds Spécial des Nations Unies, c'est-à-dire que les membres en seraient élus par le Conseil Economique et Social.

Elisabeth Mann-Borgese vient de présenter, au nom du Centre d'Etudes des Institutions Démocratiques, de curieuses propositions de statut pour « l'utilisation pacifique de la haute mer et du lit de la mer au-delà des limites de la juridiction nationale », propositions qui devraient être mises en œuvre par un Comité Directeur composé d'un Américain, un Russe, un Anglais, un Français et un Japonais. Le projet prévoit un système fort compliqué s'inspirant à la fois de la structure de différentes organisations internationales et de constitutions nationales. Ce mécanisme ne comporte pas moins de six séries d'institutions (une Commission maritime, une Assemblée maritime, une Agence maritime de planification, trois secrétariats pour l'exploration minière, l'extraction pétrolière en mer profonde, la pêche et l'aquiculture, et une Cour maritime), et trois catégories de membres : états membres fondateurs, organisations intergouvernementales et non-gouvernementales, membres associés et individus. Tout est prévu, même le siège des institutions à La Valette (Malte).

Tout récemment, la Commission Stratton, nommée par le Président des Etats-Unis en 1967, propose, dans le rapport intitulé « *Our Nation and the Sea* » qui vient de paraître, l'étude de nouveaux accords internationaux permettant de créer :

- un Bureau International d'Enregistrement qui traiterait des demandes d'exploration ou d'exploitation dans certaines régions maritimes, formulées par des gouvernements ;
- un Fonds International auquel chaque demandeur serait tenu de verser une contribution proportionnelle à la valeur de son exploitation. Le revenu serait consacré au financement d'activités scientifiques et océanologiques en faveur des pays en voie de développement.

PERSPECTIVES A COURT TERME

Il paraît superflu de souligner le décalage existant entre ces projets et les travaux des

Nations Unies qui n'en sont qu'au stade exploratoire.

Un long chemin reste à parcourir au Comité Permanent issu de la résolution du 21 décembre 1968. Le texte n'a été adopté qu'après bien des marchandages sur la composition du Comité et des modifications des termes de son mandat.

Aux 35 membres du Comité *ad hoc* se sont ajoutés, à l'exception de rares changements (l'Equateur ayant cédé sa place à Trinité et Tobago, la Somalie et le Sénégal au Soudan et à la Mauritanie), sept pays du Tiers-monde (Mexique, Sierra-Leone, Cameroun, Madagascar, Nigeria, Koweit, Malaisie).

La répartition traduit le souci d'établir un équilibre entre pays techniquement avancés et pays en voie de développement qui sont largement représentés : 26 en tout (groupe latino-américain : 7, groupe africain : 11, groupe asiatique et Yougoslavie : 8), contre 11 pour les états occidentaux et 5 pour le groupe socialiste. Une représentation appropriée est également réservée aux pays sans littoral.

Des années seront certainement nécessaires pour élaborer un traité du genre de celui de l'Espace, car les intérêts en jeu, immédiats et plus tangibles, revêtent une acuité très vive et ne concernent pas seulement les grandes puissances. L'on assiste à un partage très net, non point entre pays capitalistes et socialistes (ces derniers s'étant révélés jusqu'à présent les plus fermes partisans du laissez-faire technologique), mais entre le Tiers-monde et le reste de la communauté internationale.

Tout au plus peut-on voir se dessiner quelques lignes directrices. Une partie du lit des mers et des océans échappera au contrôle et à l'appropriation nationale. Elle sera soumise à un régime international qui reste à définir. De nombreux Etats se montrent très prudents quant au contenu à donner à ces formules et leur attitude est susceptible d'évoluer en fonction d'éléments très divers, de nature politique, technique ou économique. Les pays en voie de développement entendent, eux, instituer un ordre juridique nouveau appliquant les principes de participation, d'égalité et de solidarité, en redistribuant à l'échelle mondiale les richesses des profondeurs océaniques.

Georgette C. MARIANI

Service des Relations Internationales
du C N E X O

LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE

24, Rue Chauchat, Paris 9^e - Tél. 824 72 86
C.C.P. 4192-26 Paris

LA MER LES POISSONS LA PÊCHE

Cette bibliographie, établie d'après le stock d'ouvrages sélectionnés de notre librairie, ne représente qu'une partie des ouvrages figurant dans notre catalogue général. Prix F 6,50

OCÉANOGRAPHIE

OCÉANOGRAPHIE BIOLOGIQUE ET BIOLOGIE MARINE. Pérès J.M. et Devèze L. — Tome I - La vie benthique. — Introduction. Le benthos aphylal. Le benthos du système phytal; les végétaux benthiques. La vie animale; biologie des animaux benthiques. Les unités de peuplement dans le domaine benthique. Essai de classement des peuplements benthiques du système phytal. 542 p. 13,5 × 17,5. 35 fig. 6 tabl. Cart. 1961 F 40,00

Tome II - La vie pélagique. — Le milieu. Le plancton: le phytoplancton, le zooplancton. Interrelations phyto-plancton-zooplancton. Cycle biologique des eaux. Quelques aspects des communautés planctoniques dans le monde. 514 p. 13,5 × 17,5. 51 fig. Cart. 1963 F 40,00

COURS D'OCÉANOGRAPHIE PHYSIQUE. Théories de la circulation générale. Houles et vagues. La combe H. — L'Océanographie. L'eau de mer. Principales propriétés physiques. Les mesures hydrologiques à la mer. Généralités sur les courants. Forces agissant sur le milieu marin. Échanges océan-atmosphère. Diagrammes T.S. Analyse des masses d'eau. Équations générales de l'hydrodynamique. Équation de continuité. Tensions de Reynolds. Diffusion turbulente. Conditions aux limites. Courants permanents en présence des seules forces internes. La méthode dynamique. Théorie d'Ekman. Courants provoqués par des forces externes dans une mer homogène. Causes des courants réels. Théories générales récentes des courants océaniques. La houle et les vagues. Généralités. La houle d'amplitude très faible. Ondes capillaires et ridges. Houle irrotationnelle fine. Houles de Stokes et Levi-Civita. Houles en coordonnées de Lagrange. Houle rotationnelle de Gerstner. Les houles de M. Miche. Bilan d'énergie de la houle. Aperçu sur sa genèse. Principes des méthodes de prédiction de la houle monochromatique. Caractères statistiques de l'agitation. Leur prédiction. Les modifications des vagues et de la houle près du rivage. Observation et enregistrement de la houle. 392 p. 21 × 27. 224 fig. 1965 F 97,00

LES MARÉES. Rouch J. Le niveau de la mer. Observation de la marée. Les différents types de marée. Relations de la marée avec les positions de la lune et du soleil. La prédiction des marées d'après les méthodes empiriques. La théorie des marées. Théories de Newton et de Laplace. Analyse harmonique des marées. Prédiction des marées par l'analyse harmonique. Ondes stationnaires ou seiches. Les marées dans les océans; les lignes cotidiales. Les cartes d'amplitude de la marée. Cartes des types de marée. Quelques particularités des marées des côtes de France. La marée, phénomène de résonance. Courants de marée. Marées dans les fleuves. Marées internes. Marées terrestres. Utilisation industrielle de la marée. Les marées et la morphologie littorale. Les travaux maritimes. La biologie marine et la marée. La pêche à pied. Marées atmosphériques. Influence de la lune sur le temps. Appendices. 230 p. 14 × 23, 27 fig., 1961 F 16,50

BIOGRAPHIE DE LA MER. - Carrington R. — Traduit de l'anglais par Lartigau R. — Le monde océanique : La terre et la mer. L'origine des bassins océaniques. Les transformations de la mer et de la terre. L'eau de mer. Les mouvements de la mer. La mer et le climat. La vie de la mer : La mer, habitat d'êtres vivants. Les organismes marins. Les vagabonds de l'Océan. La vie au fond de la mer. Les nageurs libres. Dans les abysses. Incursions dans le temps. Les reptiles marins. Les oiseaux de mer. Les mammifères marins. L'hom-

me et la mer : La découverte des océans. Le développement de la science de la mer. La moisson de la mer. La mer et l'esprit humain. 288 p. 14 × 23, 28 fig., 1962 F 19,60

LES RICHESSES DE LA MER. Technologie biologique et océanographique (Boudarel N.). Aspect des océans; physique terrestre. Composition de l'eau de mer. Mouvements de la mer. La vie dans les océans. Les algues. Productions d'origines animales. Les engins de pêche. Les pêches. Les conserves et industries annexes. 548 p. 16,5 × 25,5, 1 020 fig., 1948 F 45,00

LES FRONTIÈRES DE L'OCÉAN (Bourcart J.). La limite entre terre et mer. Les mécanismes d'action de la mer. L'érosion marine : les côtes rocheuses et les falaises. Les apports de la mer : les côtes sableuses et vaseuses. L'ingression de la mer dans le continent : rias, fjords et estuaires. Le socle continental. 318 p. 14 × 19, 77 fig., 1952 F 9,40

LES DÉCOUVERTES OCÉANOGRAPHIQUES MODERNES (Rouch J.). Sondages : La mesure de la profondeur. Applications diverses des sondeurs par le son. Modifications aux cartes bathymétriques. La nature du fond. L'eau de mer : La température de la mer. La salinité et les gaz dissous. Optique de la mer. Les glaces. Les mouvements de la mer : Vagues et houle. La marée. Les courants marins. 251 p. 14 × 23, 22 fig., 1959 F 16,50

GÉOGRAPHIE DU FOND DES MERS (Bourcart J.). Étude du relief des océans. Le lever du relief sous-marin. Les formes du relief océanique. Le contour des océans. La marge continentale. Le relief des grands océans. 307 p. 14 × 23, 107 croquis et cartes, 1949 F 12,35

LES MERVEILLES DES OCÉANS (Douglas J.-S.). Traduit de l'américain. L'exploration des profondeurs. Les terres sous-marines. La course des fleuves salés. Les jardins de l'océan. Les limons primitifs. « Insectes » des mers. Étoiles de mer, oursins et holothuries. Poissons et mammifères. Mammifères déguisés en poissons. 236 p. 14 × 23, 1954 F 10,30

PHYSIQUE DE L'OCÉAN (Coll. « Le Rayon de la Science » n° 25). — Romanovsky V. — Océnographie physique. Océnographie géologique. Océnographie appliquée. 190 p. 12 × 18, tr. nbr. fig., photos et cartes, 1966 Bibliographie F 6,50

LA VIE DANS L'OCÉAN (Coll. « Le Rayon de la Science » n° 26). — Pérès J.M. — Les océans et la vie. La vie au sein des eaux. La vie sur les fonds. Voyage aux fonds de la nuit éternelle. Océnologie et avenir de l'humanité. 192 p. 12 × 18, tr. nbr. fig. et photos, 1966 F 6,50

LE MONDE MERVEILLEUX DES ABYSSES. Gunther K. et Deckert K. Traduit de l'allemand. — L'homme et les abîmes de la mer. Indigence et uniformité des abysses. Une exploration sous-marine. L'extension et l'exploration du domaine abyssal. L'alimentation des abysses. L'alimentation inorganique dans la mer. Les différentes régions de la vie abyssale. La faune benthale des abysses. La faune pélagique des abysses. Particularités biologiques de la faune abyssale. Extension et origine de la faune abyssale. Les migrations de la faune abyssale. 192 p. 14 × 23, 155 fig. et photos, 1962 F 8,25

LES FONDS SOUS-MARINS. Bertino S. — L'exploration des profondeurs: Un monde difficilement pénétrable. La mer, cette inconnue. Les terres englouties. La biosphère marine. L'homme et la mer: Les croyances des Anciens. Homère ou le mythe de l'éternel retour. Les richesses de la mer: La conquête de la mer. Le marché océanique peut naître. L'énergie des mers. L'eau et le sel, bases de l'aquaculture. Un puits au fond de la mer. L'homme subaquatique. Notes. 256 p. 16 x 17,5. 40 illustr. Relié toile. 1968 F 21,20

LA MER. Le plus grand continent du monde. - Wenzel H. Traduit de l'allemand. Préface (W.A. de Salis). — L'homme et la mer (Hiltbrunner H.). — L'exploration marine (Gagel E.). — Dans les profondeurs des océans (Picard A.). — Poisson parmi les poissons (Hass H.). — 188 p. 24 x 30, 20 fig., 80 planches photos en noir, 19 planches en couleurs. Cart., 1965 F 56,00

LA MER (Life. — Coll. « Le Monde Vivant »). — Engel L. — La mer, phénomène incomparable. L'origine de la mer. Le paysage sous-marin. Courants de surface et de grands fonds. Vagues, houles et marées. La grande pyramide de la vie. Requins et autres assassins des mers. Mammifères marins. L'homme et l'avenir de la mer. 190 p. 21 x 27, 128 illustr. en noir et 64 en couleurs. Cart. 1962 F 25,70

L'ÉNERGIE DES MARÉES. Gibrat R. — Les marées et leur énergie: Théorie et observations. Nature de l'énergie des marées. Source de l'énergie des marées: énergie de rotation de la terre ou chaleur du soleil. L'exploitation de l'énergie des marées: Cycles d'utilisation. Valeur économique de l'énergie des marées. Équations de fonctionnement. Les problèmes de réalisation: De l'usine classique à l'usine bulle. La corrosion par l'eau de mer. L'usine de la Rance: réalisation. Modèles réduits, modèles mathématiques et accélération de Coriolis. L'avenir de l'énergie des marées. La mer et l'énergie des marées. 220 p. 13,5 x 18, 67 fig., 19 planches photos hors texte, 12 tabl. 1966 F 18,70

LES POISSONS

NOUVELLE HISTOIRE NATURELLE DES POISSONS (Norman J.-R.). Traduit de l'anglais et annoté par Le Danois Éd. — Introduction. Forme et locomotion. Respiration. Nageoires. Peau, écailles et épines. Bouche et mâchoires. Dents et nourriture. Organes venimeux, électriques, lumineux et reproducteurs de son. Organes internes. Système nerveux et organes des sens. Coloration. Conditions de vie. Distribution et migrations. Reproduction. Accouplement, mœurs nuptiales et instinct familial. Développement. Poissons fossiles et phylogénie. Classification. Les poissons et l'industrie humaine. Mythes et légendes. Appendice sur un coelacanthe vivant. 352 p. 14 x 23, 150 fig., 1950 F 10,30

ATLAS DES POISSONS: POISSONS MARINS (Bougis P.). Tome I: Généralités. Requins. Raies. Clupes. Gades. Poissons plats: Anatomie et physiologie. Classification générale des poissons fossiles et actuels. 202 p. 13,5 x 18,5, 52 fig., 16 photos et 12 pl. couleurs hors-texte, représentant 52 espèces, couverture quadrichromie pelliculée, 1959 F 18,00

Tome II: Perches de mer. Thons. Rascasses. Poissons de récifs. Poissons coffres. Coelacanthe, etc. 234 p. 13,5 x 18,5, 50 fig., 16 photos et 12 pl. couleurs hors-texte, représentant 62 espèces, couverture quadrichromie pelliculée, 1959 F 18,00

GUIDE DES POISSONS DE MER ET DE PÊCHE. Muus B.J. et Dahlström P. Traduit du danois. — Généralités sur les poissons: Organes, mode de vie, nourriture, etc. Clé de détermination. — Description systématique de 173 espèces: utilisation, reproduction, méthodes de pêche professionnelle de chacun de ces poissons. — Histoire de la pêche. Les instruments et les navires de pêche modernes, l'industrie de la pêche basée sur la biologie marine appliquée. 244 p. 13,5 x 20, 800 illustr. en couleurs, cartes et graphiques. Cart. 1964 F 35,00

GUIDE DE LA FAUNE SOUS-MARINE DES COTES MÉDITERRANÉENNES. — Luther W. et Fiedler K. Traduit de l'allemand par Bovet Ph. et J. — Des caractéristiques simples en regard de 46 planches hors-texte en couleurs et en noir, permettront au lecteur de déterminer rapidement et même en bien des cas d'identifier immédiatement le sujet observé en le comparant avec l'image en couleurs. — Introduction. Vertébrés. Invertébrés. — 270 p. 12 x 19, 500 espèces reproduites dont 260 en couleurs, 40 reproductions des algues marines les plus importantes, 28 fig., relié, 1965 F 35,00

LES POISSONS (Life. Coll. « Le Monde Vivant »). — Omannay F.D. — Héritiers d'un ancien monde. La vie dans le milieu aquatique. Le creuset de l'évolution. Requins et raies: errants légendaires des mers. Les complexités de la reproduction. La vie et la mort dans un royaume silencieux. La carte des grandes migrations. La ruineuse moisson de la mer. Appendice: noms communs et scientifiques des poissons. 192 p. 21 x 27, 128 illustr. en noir et 64 en couleurs, cart., 1964 F 25,70

LES POISSONS (Nouveaux Guides du Naturaliste). — Guibé J. et Hvass H. — Description détaillée des poissons. Index. 112 p. 12 x 18, 211 illustr. couleurs, couverture souple plastifiée, en couleurs, 1958 F 9,20

VIE ET MŒURS DES MOLLUSQUES. — Fischer P.-H. — Place des mollusques dans la nature. Les peuplements de mollusques. Activité individuelle. Evolution individuelle. Sensibilité et psychisme. 312 p. 14 x 23, 180 fig., 1950 F 12,35

MŒURS ÉTRANGES DES MOLLUSQUES. — Hyatt Verrill A. — Structure et développement. Comment se produisent les dessins et les couleurs des coquilles. Coquillages rares. Constructeurs de radeaux. Perceurs de rochers. Naufragés. Coquillages géants, etc. 173 p. 14 x 23, 108 fig., 1953 F 7,20

LE MONDE SOUS-MARIN. Animaux de la Méditerranée. — Mohres F.P. Traduit de l'allemand. — La Méditerranée. Un monde étrange. Conditions de vie en mer. Le monde de surface. Variations d'intensité lumineuse. Les zones de la vie marine. Les éponges. Fleurs meurtrières. Les méduses. De beaux vers. Les bryozoaires. Chevaliers cuirassés: les crustacés. Créatures molles et coquilles dures: Lamellibranches, Gastéropodes. — Céphalopodes. De l'art de changer de couleur. Disparaître en terrain découvert. Echinodermes. Organismes à colonne vertébrale rudimentaire. Les plus belles créatures de la mer. Créatures isolées de la mer. La lumière de la mer. Aperçu sur la systématique des groupes animaux envisagés. Schémas de l'organisation de ces groupes. Sur la plongée et la photographie sous-marine. 256 p. 12,5 x 18,5, 107 photos couleurs. Cart. 1965 F 16,80

GUIDE DU ZOOLOGISTE AU BORD DE LA MER. Le Neuthiec R. — Mollusques à coquille d'une seule pièce. Mollusques à deux valves. Crustacés. Echinodermes. Vers. Autres formes non mentionnées au Tableau Général Préliminaire. 180 p. 12 x 18,5, 220 photos en noir, 16 planches hors-texte couleurs. Index alphabétique des noms d'espèces. Relié toile, 1962 F 30,00

LES PRODUITS DE LA PÊCHE (Penso G.). Traduit de l'italien par Montero P. (de). Les produits de la pêche dans l'alimentation humaine: composition chimique et valeur alimentaire des produits de la pêche. Inspection sanitaire des produits de la pêche: fraîcheur et avarie des produits de la pêche. Poissons et mollusques venimeux. Maladies des poissons, des mollusques et des crustacés. Les mollusques comestibles vecteurs de maladies infectieuses. Altérations des conserves de poissons, de mollusques et de crustacés. Conservation du poisson frais: conservation du poisson vivant. Réfrigération. Congélation. Industrie des produits de la pêche, conserves et produits dérivés. Salage. Séchage. Fumage. Marinage. Stérilisation. Extraits de poisson. Huiles et farines de poisson. Colle de poisson et autres sous-produits. Équipement industriel. 418 p. 18,5 x 27, 334 fig., en noir et en couleurs, 1953 F 55,00

LA PÊCHE À PIED. Coquillages et crustacés. Sinoilliez R. — Cet ouvrage est le résultat de vingt années de patientes observations sur les grèves et de fructueuses pêches à pied pratiquées avec des marins professionnels qui, peu à peu, ont bien voulu dévoiler leurs secrets. Il s'adresse à tous: l'amateur débutant ou confirmé, le vacancier désœuvré, le promeneur solitaire, ou tout simplement le lecteur curieux. — Une étude technique détaillée de la pêche à pied au bord

EXPLORATION, CHASSE-SOUS-MARINES

de la mer, une esquisse vivante des mœurs des coquillages et des crustacés. — **Les mollusques** : Les coquillages. Les céphalopodes. — **Les crustacés** : Les macrourès. Les brachyures. — **L'oursin**. 176 p. 14,5 × 20, tr. nbr. fig., 8 p. photos hors-texte, 1968 F 15,00

PÊCHE EN MER

TRAITÉ DE LA PÊCHE EN MER. Manche - Océan - Méditerranée. — Naintré L. et Oddéno C.-J. — La somme pratique des connaissances halieutiques à ce jour : poissons « pêchables » et leurs mœurs; procédés de pêche et tour de main; matériels et accessoires. L'ouvrage technique et pratique le plus complet pour les pêches sur le bord des côtes aussi bien qu'en pleine mer. Notions générales. Le matériel. Les amores. Les pêches à la ligne. Les pêches aux engins et les pêches de grèves. Résumé des règlements régissant la pêche en mer sur les côtes de France. Pêche en Méditerranée. 352 p. 21 × 27, nbr. graphiques, dessins et schémas, cartonné, 1960 F 46,70

TRAITÉ PRATIQUE DE LA PÊCHE. — Duborgel M. — Tome II : La pêche en mer. — Le milieu marin. Les poissons de mer. Réglementation de la pêche en mer. Le matériel du pêcheur à la ligne. Les appâts du pêcheur en mer. Montage des lignes. Pratique de la pêche à la ligne en mer : pêche à bord, pêche en bateau. Les poissons et leur pêche. 608 p. 11 × 18, 1 200 figures et tableaux Relié, 1966 F 33,00

LA PÊCHE EN MER. — Naintré L., Oddéno C. et Burnand T. — A l'utilité d'un dictionnaire, ajouter les services d'un traité pratique, tel a été l'objectif des auteurs de ce livre ainsi doublement original et complet : dictionnaire en ce sens que les mots y sont classés par ordre alphabétique et leur sens clairement expliqués, mais aussi traité, puisque l'on y trouve, immédiatement ce que chaque terme désigne et résume sur le plan pratique, technique. 360 p. 15,5 × 20,5, tr. nbr. fig., 40 p. photos hors-texte, 1967 . F 32,00

TECHNIQUES ET GRANDS POISSONS. — Réal del Sarte G. — La pêche sportive du gros poisson de mer est-elle à notre portée ? Ce qu'il faut connaître du thon et de tous les poissons grégaires. **Prélude à la pêche sportive.** Les conditions du succès : La recherche : La recherche du thon rouge. Les indices de présence du thon. Itinéraires. Le matériel : Le bateau. Le matériel de pêche. **A pied d'œuvre:** Les leurres. L'action de pêche. Technique de la traîne rapide. Technique du combat : La pêche et la lutte. Combattivité. « Retour sur la touche ». Rencontres. Avec les espadons de notre Atlantique oriental. 248 p. 21 × 27, nbr. dessins et photos, cartonné, 1960 F 40,50

LA PÊCHE SPORTIVE DES GROS POISSONS DE MER. — Burnand T. — Quels sont les gros poissons de mer ? Procédés et matériel de pêche au moyen gros : Les pêches de terre. La pêche à la traîne. Les différentes actions de pêche au moyen gros. Pêches métropolitaines. La pêche au moyen gros sur les îles d'Afrique Noire. Où trouver les gros poissons de mer ? La pêche au tout gros. 134 p. 16 × 20, 50 photos, 1960 F 12,40

LA PLONGÉE. Marine Nationale (Groupe d'études et de recherches sous-marines). — Notions de physique appliquées à la plongée. Appareils et matériel de plongée. Physiologie et accidents de la plongée. Tables de plongée. Calcul des tables de plongée. Mélanges respiratoires. La plongée libre. Pratique du scaphandre autonome. Matériel d'exploration et de travail sous-marin. Tables de plongées, table française de plongée à l'air et table de plongées successives avec réglette. 240 p. 15 × 20, 32 illustr. hélio, relié. Nouv. édit., 1967 F 40,00

CONNAISSANCE ET TECHNIQUE DE LA PLONGÉE. — Poulet G. et Barincou R. — Définition de la plongée. Le milieu physique : Les mélanges respiratoires. L'homme. Le scaphandre. L'équipement complémentaire. La préparation à la plongée. La technique individuelle : Tables de plongée, paliers de décompression : Table de plongée à l'air jusqu'à 91 mètres (Marine Nationale). Table de plongées successives. Dangers et accidents : La faune et le plongeur. Réanimation et récompression. Enseignement et plongée en collectivité. Les vraies richesses : La photographie sous-marine. La chasse sous-marine en scaphandre. Le tour du monde de la plongée en 80 mètres. 386 p. 14 × 22, 36 fig., 15 photos en noir et 4 en couleurs, relié toile, 1967 F 24,40

NOUVELLES BASES DE LA PLONGÉE LIBRE. — Boissin E. — Un peu d'histoire. Plongée libre XX^e siècle. Le matériel. Utilisation du matériel. Les accidents. Sauvetage et réanimation. La chasse. Les poissons. L'exploration. La photographie sous-marine. Les coquillages. Conclusion. 140 p. 14,5 × 20, 70 fig., 7 photos hors-texte, 1964 ... F 8,80

LES DÉCOUVERTES SOUS-MARINES MODERNES. — Doukan (Dr G.). — Exploration sous-marine indirecte. Chasse sous-marine. Exploration directe au scaphandre autonome. Tourisme sous-marin. Archéologie sous-marine. Les épaves. Profondeurs extrêmes. Photographie et cinéma sous-marins. Télévision sous-marine. Plongées et biologie marine. 229 p. 14 × 23, 47 dessins de l'auteur et 23 photos hors-texte, 1954 F 15,45

LA CONQUÊTE DES FONDS MARINS (Coll. « Le Rayon de la Science »). — Romanovsky V. — Le début d'une épopée. De Neptune à Cousteau. L'exploration sous-marine. Le scaphandre autonome au service de la Science. Du scaphandre rigide au bathyscaphe. Bilan provisoire. Accessoires. 190 p. 12 × 18, nbr. fig. et photos, 1959 F 6,50

GUIDE PRATIQUE DE CHASSE SOUS-MARINE. — Doukan G. — Matériel du chasseur sous-marin. Pratique de la chasse sous-marine. Les divers gibiers. Dangers de la chasse sous-marine. Où pratiquer la chasse sous-marine. Réglementation de la chasse sous-marine. Les écoles de plongée. Photographie et cinéma sous-marins. 142 p. 11 × 17,5, 31 fig., 4 pl. hors-texte couleurs, 1960 F 9,70

COMMANDES PAR CORRESPONDANCE

Les commandes doivent être adressées à la **LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE**, 24, rue Chauchat, Paris (9^e). Elles doivent être accompagnées de leur montant, soit sous forme de chèque bancaire ou de mandat-poste (mandat-carte ou mandat-lettre), soit sous forme de virement ou de versement au Compte Chèque Postal de la Librairie: Paris 4192 - 26. Au montant de la commande doivent être ajoutés les frais d'expédition, soit 10 % (avec un minimum de F 1,40). Taxe urgente: F 1,30. Envoi recommandé: France: F 1,30, étranger: F 2,60.

Il n'est fait aucun envoi contre remboursement

LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE, 24, rue Chauchat, PARIS (9^e)

La Librairie est ouverte de 8 h 30 à 12 h 30 et de 14 h à 18 h 30. Fermeture du samedi 12 h au lundi 14 h.

Le directeur de la publication : Jacques DUPUY — Dépôt légal : 1969, N° 9020 — Imp. des Dernières Nouvelles de Strasbourg
Imprimé en France - Couverture réalisée par Impr. Blanchard-Le Plessis-Robinson.



“ÉTUDES CHEZ SOI”

L'enseignement par correspondance de

L'ÉCOLE UNIVERSELLE

59, boulevard Exelmans - Paris 16^e

permet de faire chez soi, à tout âge, dans le minimum de temps et avec le minimum de frais, des études complètes dans toutes les branches du savoir, d'obtenir, dans les conditions les plus favorables, tous diplômes et toutes situations.

Demandez l'envoi gratuit de la brochure qui vous intéresse :

- T.C.** 590 : **Toutes les Classes, tous les Examens** : du cours préparatoire aux classes terminales A, B, C, D, E — C.E.P., C.E.G., B.E., E.N., C.A.P., Entrée en 6^e, B.E.P.C., Baccalauréat — Cl. préparatoires aux Grandes Ecoles - **C.I. des Lycées Techniques** : Brevet de Technicien, Baccalauréat de Technicien.
- E.D.** 590 : **Etudes de Droit** : Admission en Faculté des non-bacheliers. Capacité, Licence, Carrières Juridiques (Magistrature, Barreau, etc.).
- E.S.** 590 : **Etudes supérieures de Sciences** : Admission en Faculté des non-bacheliers, I.P.E.S., D.U.E.S., 1^{re} et 2^e année, Licence, C.A.P.E.S., Agrégation - **Médecine** : 1^{er} cycle - **Pharmacie** : 1^{er} cycle - **Etudes dentaires** : 1^{er} cycle.
- E.L.** 590 : **Etudes supérieures de Lettres** : Admission en Faculté des non-bacheliers, I.P.E.S., D.U.E.L., 1^{re} et 2^e année, C.A.P.E.S., Agrégation.
- G.E.** 590 : **Grandes Ecoles, Ecoles Spéciales** : Industrie, Armée, Agriculture, Commerce, Beaux-Arts, Administration, Lycées Techniques d'État, Enseignement. (Préciser l'Ecole).
- O.R.** 590 : **Cours pratiques** : **Orthographe**, Rédaction, Calcul, Ecriture, **Conversation**.
- L.V.** 590 : **Langues Etrangères** : Anglais, Allemand, Espagnol, Italien, Russe, Chinois, Arabe, Espéranto - **Chambres de Commerce étrangères - Tourisme - Interprétariat**.
- P.C.** 590 : **Cultura** : Perfectionnement culturel. **Universa** : initiation aux études supérieures.
- A.G.** 590 : **Agriculture** : (France et Rép. afric.), Classes des Lycées techniques agricoles ; B.E.A., B.T.A., Industries agricoles, Floriculture, Culture potagère, Arboriculture, Elevage, Génie rural, **Radiesthésie, Topographie**.
- C.T.** 590 : **Industrie, Travaux Publics, Bâtiment** : toutes spécialités, tous examens - Mécanique, Métallurgie, Mines, Chauffage, Froid, Matières plastiques, Chimie - Stages payés (F.P.A.).
- L.E.** 590 : **Électronique, Électricité** : C.A.P., B.P., B.T.S., Préparations libres.
- D.I.** 590 : **Dessin industriel** : C.A.P., B.P. - Mécanique, Électricité, Bâtiment, etc.
- M.V.** 590 : **Métré** : C.A.P., B.P. : Aide-Métreur - Métreur - Métreur-Vérificateur.
- E.C.** 590 : **Comptabilité** : C.A.P., B.P., B.E.P., B.S.E.C., B.T.S., D.E.C.S., Expertise : Certif. de Révision Comptable, C.S. juridique et fiscal, C.S. d'organisation et de gestion des entreprises. **Préparations libres** : Caissier, Chef-Magasinier, Teneur de livres, Comptable, Chef comptable, Conseiller fiscal.
- P.R.** 590 : **Informatique** : **Programmation** - C.O.B.O.L.
- C.C.** 590 : **Commerce** : C.A.P., B.P., B.E.P., B.S.E.C., Employé de bureau, de banque, Sténodactylo, Représentant, Vendeur-Publicité, Assurances, Hôtellerie, - Mécanographie.
- C.S.** 590 : **Secrétariats** : C.A.P., B.P., B.E.P., B.S.E.C., B.T.S. - Secrétaire de Direction, de Médecin, de dentiste, d'Avocat, d'Homme de Lettres, Secrétariats techniques, Correspondance - **Journalisme - Graphologie**.
- R.P.** 590 : **Relations Publiques** et Attachés de Presse.
- C.F.** 590 : **Carrières Féminines** : Ecoles : Assistantes Sociales, Infirmières, Jardinières d'enfants, Sages-Femmes, Auxiliaires de Puériculture - Visiteuses médicales, Hôtesses, Vendeuses, etc.
- C.B.** 590 : **Couffure** (C.A.P. dame) - **Soins de Beauté** : C.A.P. d'Esthéticienne - Visagisme, Manucurie (Stages pratiques gratuits) - **Parfumerie**. Ecoles de Kinésithérapie et de Pédicurie - Diet-Esthétique.
- C.O.** 590 : **Couture, Mode** : C.A.P., B.P., Coupe, Couture (Flou et Tailleur, Industries de l'habillement) - **Enseignement ménager** : moniteur et professeur.
- D.P.** 590 : **Dessin - Peinture et Beaux-Arts** : Illustration, Mode, Aquarelle, Peinture, Portrait, Caricature, Nu, Décoration - Antiquaire.
- E.M.** 590 : **Etudes Musicales** : Solfège, Guitare classique, électrique et tous instruments.
- C.I.** 590 : **Cinéma** : Technique Générale, Scénario, Décor, Prises de vues, de son, Projection, Cinéma 8 et 16 mm - **Photographie**.
- M.M.** 590 : **Marine Marchande** : Ecoles - Navigation de plaisance.
- C.M.** 590 : **Carrières Militaires** : Terre, Air, Mer. Admission aux écoles.
- C.A.** 590 : **Aviation civile** : Pilote, Fonctions administratives, Ingénieurs et Techniciens, Hôtesses de l'air.
- R.T.** 590 : **Radio** : Monteur, Dépanneur - **Télévision** : noir et couleur - **Transistors**.
- F.P.** 590 : **Pour devenir Fonctionnaire** : P.T.T., Finances, Travaux Publics, Banques, S.N.C.F., Police, Sécurité Sociale, E.N.A., Préfectures, Affaires étrangères et administrations diverses (Préciser la branche).
- E.R.** 590 : **Tous les Emplois Réservés** : Examens de 1^{re}, de 2^e et de 3^e catégorie. Examens d'Aptitude Technique.

*La liste ci-dessus ne comprend qu'une partie de nos enseignements. N'hésitez pas à nous écrire.
Nous vous donnerons gratuitement tous les renseignements et conseils qu'il vous plaira de nous demander.*

ENVOI GRATUIT
N° 590

ÉCOLE UNIVERSELLE
PAR CORRESPONDANCE DE PARIS

59, Boulevard Exelmans - PARIS 16^e

14, chemin de Fabron - 06-Nice - 11, place Jules-Ferry - 69-Lyon (6^e)

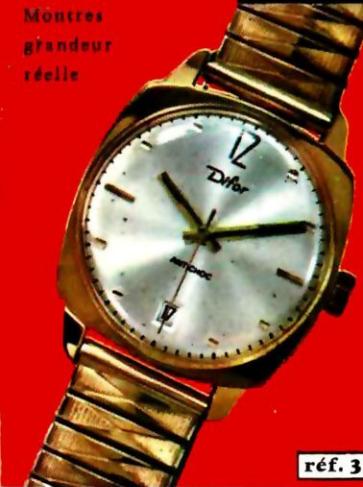
NOM, PRÉNOM

ADRESSE

Initiales et N° de la brochure demandée



RIEN A VERSER ...

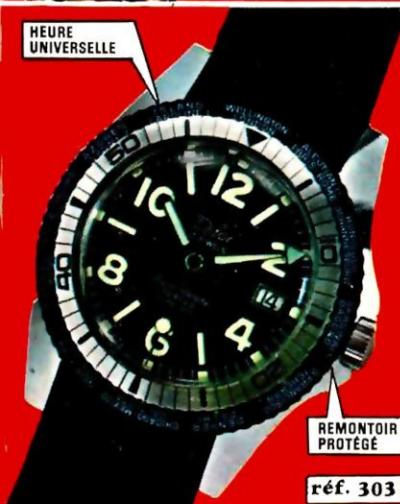


301 125 F comptant.
A crédit 140 F en 5 fois 28 F.
Date automatique, étanche, plaqué or, cadran luxe satiné, lumineux, "heures" relief, ancre 21 rubis, bracelet extensible plaqué or (indiquez la dimension du poignet).

302 La même sur bracelet en porc naturel.

Au comptant **99 F**. A crédit 110 F en 5 fois 22 F.

réf. 301



réf. 303

303 121 F comptant.
A crédit 135 F en 5 fois 27 F.
Pour le sport et la plongée, étanche à 50 mètres, date automatique, lunette mobile : contrôle des temps et heure universelle, remontoir protégé, cadran très lumineux, ancre 21 rubis, bracelet "spécial plongée" en gomme souple, perforé, ne durcissant pas et ne cassant pas.

Les références 301, 302, 303 avec : protection antichoc, spiral autocompensateur, ressort incassable, contrôle électronique aux 3 positions.



JOUR, DATE ET
REMONTAGE AUTOMATIQUES

réf. 304

304 279 F comptant.
A crédit 320 F — 50 F à réception et 9 fois 30 F. Automatique et calendrier, jour et date, étanche à 30 mètres, plaqué or, cadran luxe lumineux, index dorés et onyx, ancre 25 rubis, remontage assuré par vos gestes habituels, 40 heures de réserve de marche, saut instantané de la date à minuit, riche bracelet crocodile gold.

Cette montre avec : spiral autocompensateur ISO-VAL, ressort incassable INCAREX, protection INCABLOC, contrôle suisse C.T.M.

pour essayer chez vous l'un de ces nouveaux modèles 1969, à nos frais et sans obligation d'achat. Appréciez son fini, sa solidité, son élégance, sa précision. Prenez connaissance du bon de garantie net et sans détour (un an de garantie totale couvrant même les accidents, 5 ans de garantie de fabrication, échange ou remboursement pendant 1 mois).

Si vous êtes convaincu, nous vous adresser, **après l'essai**, le montant du prix comptant (ou le premier versement) et vous avez encore un mois pour échanger la montre ou vous la faire rembourser, sans avoir à fournir d'explication. Si vous ne désirez pas l'acheter, vous la renvoyez (après 5 jours maximum) et ne devez absolument rien. C'est l'opération confiance totale, entre vous et une grande marque : 28 médailles d'or, 27 médailles d'argent au cours de 58 ans de participation aux concours de l'Observatoire de Besançon.



305 109 F comptant.
A crédit 125 F en 5 fois 25 F.
Pour le sport et la plongée (homme ou dame), étanche à 50 mètres, date automatique, lunette mobile : contrôle des temps, joli cadran bleu, lumineux, ancre 21 rubis, bracelet "spécial plongée" en gomme souple, perforé, ne durcissant pas et ne cassant pas.

306 La même, avec cadran, lunette et bracelet NOIRS.

Au comptant **101 F**.
A crédit 115 F en 5 fois 23 F.

307 198 F comptant.
A crédit 228 F. — 46 F à réception et 7 fois 26 F.
Rhodiée façon or gris, bracelet ceinture réglable, boîtier serti de pierres taillées, synthétiques mais étincelantes, ancre 17 rubis.

les réf. 305-306-307 avec : protection antichoc, spiral autocompensateur, ressort incassable, contrôle électronique aux 3 positions.

CATALOGUE GRATUIT N° 20

merveilleux de couleurs et de fidélité : MONTRES DE BESANÇON et splendide collection de MONTRES ET CHRONOGRAPHES SUISSES de haute qualité, la plus belle sélection de BIJOUX D'OR (colliers modernes et classiques, gourmettes et semainiers, diamants solitaires, alliances simples et en brillants, bagues et chevallières, broches et pendentifs, croix et médailles, perles de culture, bijoux pour Messieurs...) et maintes suggestions de cadeaux en pendularie, en orfèvrerie soignée, transistors, électrophones et petites « trouvailles » à offrir.

Demandez-le à DIFOR service n° 20 — 25 BESANÇON

BON D'ESSAI GRATUIT

Envoyez-moi à l'essai, sans rien payer et sans obligation d'achat, la montre référence accompagnée de vos garanties. Si je ne l'achète pas, je m'engage à vous la renvoyer après 5 jours maximum.

Si je l'achète, je la paierai :
(barrez la mention inutile)

AU COMPTANT	A CRÉDIT, SOIT
soit	F
port : 2 F 20	port : 2 F 20
suivant conditions de l'annonce	

Pour la réf. 301, votre tour de poignet cm

M
(lisiblement S.V.P.)

Prénom
Rue N°

Ville N° Dép'

Profession Signature

Date de naissance



Difor

BESANÇON