

**La MISE en VALEUR
des SUBSTANCES MINÉRALES
du DOMAINE MARIN**

**TRAVAIL PERSONNEL
de FIN d'ÉTUDES n°1**

Portant sur les cours de formation générale

François-Xavier BIBERT

Elève-Ingénieur de quatrième année

ÉCOLE des MINES de DOUAI

1968 / 1969

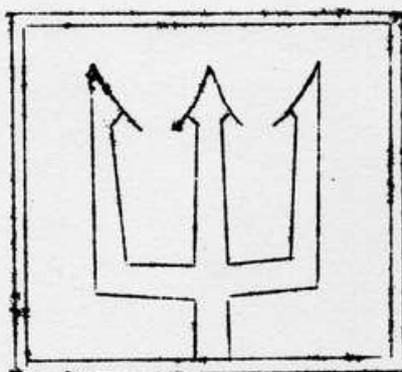


Ce document, qui est une étude d'un sujet général, correspondant à l'option « Mines » que j'avais choisie, a été réalisée au premier trimestre 1969. Elle a été dactylographiée avec la petite « Olivetti Lettera 22 » qui ne me m'a pas quitté pendant mes quatre années d'études à l'École des Mines de Douai, utilisée en particulier pour rédiger les 5 rapports de stage obligatoires (11 mois au total) de notre scolarité : pour moi ; 3 en **Mines** ; 1 en Métallurgie ; 1 en **Travaux-Publics**, les trois options de l'École, faisant l'objet de cours spécifiques en quatrième année.

C'est pour le moment un document « image », présentant les scans de l'exemplaire un peu défraîchi en ma possession ! Une version numérique remise en page via un O.C.R. verra peut-être le jour plus tard....

Il est mis en forme pour pouvoir être imprimé en recto-verso (78 feuilles).

LA MISE EN VALEUR
DES SUBSTANCES MINÉRALES DU DOMAINE MARIN



Avril 1969

F-X. BIBERT
Elève-Ingénieur à l'Ecole
Nationale des Mines de Douai
Option Mines
Promotion 1965 - 1969

ECOLE NATIONALE DES MINES DE DOUAI

ANNEE SCOLAIRE 1968-1969

CONTROLE DES CONNAISSANCES
EXAMENS 4^e ANNEE

Les Elèves-Ingénieurs de 4^e Année auront, en fin d'année, à présenter et discuter devant un jury, 2 travaux personnels. Ces travaux porteront :

- le premier : sur les cours de Formation Technique Générale (Maths appliquées, R d M, topo, Electricité et Electronique Ind. Thermodynamique, Hydraulique Automatisation etc...)
- le second : sur les cours de formation Générale (O.S.T., Recherche Opérationnelle, Economie, Ordinateur, Comptabilité etc...)

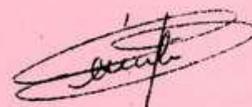
Chaque élève me remettra, avant le 15 Novembre, pour chaque travail une liste de 2 à 3 sujets avec commentaire succinct.

Une Commission étudiera les différentes listes et retiendra, dans chacune d'elles, le sujet lui paraissant le plus intéressant ou le mieux adapté à nos possibilités actuelles.

En Mai, chaque Elève me remettra ses travaux écrits; en juin ces travaux seront discutés devant un jury.

DOUAI, le 17 OCTOBRE 1968

L'INGENIEUR DES T. P. E.
Chef du Service Technique



M. GERENTE

Cautelle 5 juin 1959

Mon cher Robert,

J'ai reçu ce matin votre admirable et volumineux fascicule de synthèse sur les réserves en pétrole de la zone maritime; je ne saurais trop vous en féliciter et vous en remercier pour les très nombreuses et utiles rectifications qu'il contient.

Le sujet était extrêmement vaste et vous avez dû vous limiter en ne documentant que des réserves très succinctes sur des sujets qui n'étaient pas essentiels à l'étude entreprise. Vous êtes optimiste sur l'avenir des réserves océaniques et leurs résultats et je crois pour de bonnes raisons. Vous notez que les réserves terrestres diverses ne sont pas insaisissables et vous avez certainement raison, mais sur ce point il ne faut pas être aussi excessif, vous semblez l'être page 8 en ce qui concerne le pétrole et le gaz.

Pour le pétrole, déjà dans ma jeunesse on estimait que les réserves seraient épuisées en 15 ans. Mais les connaissances actuelles, stimulant la recherche, reportent l'épuisement plus loin, ce délai est aujourd'hui en partie encore de 15 ans.

Pour le gaz, en Europe, excepté la dernière partie ou ne commencent guère que le petit gisement de la zone de la Saumière et le gaz d'ailleurs inutilisé accompagnant les gisements de pétrole de Beck et le Roumanien (Ploesti) - Et en 1939 on recherchait le gisement de St Marcet qu'on exploitait à partir de 1942 et qui coûtait environ 5 milliards/m³. On pensait commercialement que la France devrait abandonner tout espoir d'un travail d'acier, en 1951 on découvrit Lacq et on 200 milliards/m³. puis en 1957 d'autres réserves avec ces réserves (Meillon, St Faust Pour d'As et Roctave) - Et ce n'est peut-être pas fini. D'ailleurs, ce n'est de trouver un peu partout,

J. WATERLOT

INGÉNIEUR DU CORPS
DES MINES

—

La corrosion en tout la continuité des
hétérogénéités du métal ou de l'électrolyte
d'attaque, elle en fait d'ailleurs profondément
influence par le phénomène de passivité.

La surface du métal présente de nombreux couples
bi-métalliques soit par coexistence, si l'alliage est
formé de 2 phases ou, même, si il est formé d'une
solution solide unique, il est hétérogène si cette
solution, n'a pas une concentration uniforme (les
impuretés peuvent avoir une grande influence)
soit par structure si elle est grossière (plus elle est
fine plus la corrosion est faible.) Il y a aussi hétéro-
généité si le métal est éroché ou si il y a une
soudure, ou si il y a des tensions internes non-
équilibrées après soudage non suivi d'un recuit
suffisant, ou enfin, selon l'état de surface
(degré de poli, traces, rayures, rayons de courbure)
les divers traitements mécaniques, chimiques
ou thermiques peuvent accentuer plus ou moins
ces causes et en fait considérer par l'homogénéité
parfaite est un état idéal jamais atteint.

D'après la hétérogénéité de milieu, comme
la température, la concentration, et surtout, de différences de
teneur en oxygène. Cette répartition non uniforme
de O_2 est un facteur de corrosion très important
indépendant de la nature du métal, les
parties les plus aérées fonctionnent comme
cathodes et les moins aérées (rayons par exemple)
comme anodes et sont attaquées.

Quant à la passivité elle consiste dans l'apparition
d'une pellicule protectrice à la surface du métal
diminuant les différences de potentiel, causées
de l'électrolyte. Mais évidemment la pellicule doit
être insoluble dans le milieu, local, risque

" La prédominance de l'élément marin saute aux yeux quand on regarde une carte du monde : La teinte bleue qui recouvre les étendues marines sur la plupart de ces cartes a été pendant longtemps et constitue encore dans bien des cas, le voile pudique de notre ignorance à leur égard "

(P. WILLIM)

Si l'homme ne détruit pas l'équilibre du milieu par des interventions ou des exploitations inconsidérées, les ressources de la biosphère sont appelées à se renouveler suivant un cycle suffisamment court pour ne pas poser de problèmes majeurs. Par contre, jusqu'à preuve du contraire, les gisements minéraux une fois exploités ne peuvent être reconstitués. Lorsque les gisements de surface sont épuisés par une exploitation des substances les plus riches, il faut alors s'attacher à l'extraction des substances les plus pauvres, puis à la recherche des gisements en profondeur, par des méthodes d'exploitation et de prospection de plus en plus élaborées.

Il faut constamment mettre en évidence de nouvelles réserves sûres et potentielles, pour couvrir non seulement les besoins des prochaines décennies mais aussi pour assurer les sources d'approvisionnement des générations à venir.

Si les ressources des terres émergées s'épuisent, il est alors normal de penser atteindre les réserves insoupçonnées enfouies sous le milliard de kilomètres cube d'eau de l'hydrosphère et à plus longue échéance les gisements qu'il faut espérer vierges des planètes et satellites de notre système solaire

TABLE DES MATIERES

Table des matières	4
Bibliographie.....	6
<u>Situation actuelle des ressources minérales.....</u>	8
<u>Le domaine marin</u>	10
L'hydrosphère	10
La marge continentale.....	14
Le plateau continental.....	14
Le talus continental.....	18
Les plaines abyssales.....	18
Rides miocéaniques.....	19
<u>Le travail en mer.....</u>	21
Les sources de difficultés.....	21
Les conditions météorologiques.....	21
L'élément liquide.....	23
La résolution des problèmes.....	24
L'ancrage dynamique.....	24
La corrosion.....	25
La plongée humaine	28
Les véhicules sous-marins.....	31
<u>La carte bathymétrique</u>	37
La localisation.....	37
Procédés optiques classiques.....	37
Systèmes de radio-navigation.....	37
Le lever de la carte bathymétrique.....	40
<u>La prospection en mer.....</u>	42
Les procédés géophysiques.....	43
La méthode gravimétrique.....	43
La prospection magnétique.....	44
La prospection sismique.....	45
Les procédés mécaniques.....	51
Echantillonnage superficiel.....	51
Carottages et sondages.....	52
<u>L'exploitation sous-marine des hydrocarbures.....</u>	54
Le domaine exploitable.....	55
Les réserves.....	57
Le forage en mer.....	58
Structures fixes.....	59
- Iles artificielles.....	59

.../...

- plateformes fixes autonomes.....	60
- plateformes assistées.....	61
Plateformes semi-mobiles.....	61
- chalands submersibles.....	61
- barges submersibles.....	62
- plateformes oscillantes.....	63
Plateformes mobiles.....	63
- plateformes auto-élevatrices.....	63
- bateaux de forage.....	66
- plateformes semi-submersibles.....	67
La production en mer.....	69
Le groupement des puits.....	69
Les puits.....	70
Les installations de production en mer.....	72
Les installations cotières.....	75
Eléments économiques.....	76
Eléments du coût des investissements.....	77
Eléments du coût de l'exploitation.....	79
 <u>L'exploitation des substances minérales</u>	
<u>autres que le pétrole</u>	80
L'élément liquide.....	80
L'exploitation de l'eau douce.....	80
L'exploitation des éléments dissous.....	82
- le chlorure de sodium.....	82
- le brome.....	83
- Le magnésium.....	84
- l'or.....	84
- poches sursalées.....	85
Les dépôts meubles non consolidés.....	85
Les gisements.....	86
- gisements de plages actuelles.....	86
- les placers off shore.....	87
- les matériaux pour Travaux-Publics.....	89
- les concentrations biologiques.....	91
- les boues abyssales.....	91
- concrétions et nodules.....	92
Les méthodes d'exploitation.....	94
Le substratum rocheux immergé.....	97
Gisements cotiers.....	97
Gisements enfouis off shore.....	98

BIBLIOGRAPHIE

Océanographie

- Le premier programme français d'Océanographie
Jean Claude HUBERT
- L'homme et le milieu sous-marin
Robert STENUIT
- Travailler sous la mer
Michel GRENON
- Le génie civil par 50 mètres de fond
Antoine FLORAND

Géologie

- Géologie
BERTIN
- Géologie
MORET
- Le fond des océans
Jacques BOURCART
- Les fonds marins dans la géophysique moderne
Xavier LE PICHON

Prospection

- L'intensification de la prospection des ressources continentales et marines pour assurer les sources d'approvisionnement de demain.
A.G OBERMULLER
- Quelques réflexions sur la prospection en mer
P WILIM
- Le problème du forage en mer
M. REY GRANGE
- La prospection géophysique et la recherche minière
J-J BREUSSE
- Les méthodes de forage en mer
R DELMAS

.../...

Pétrole

- La recherche pétrolière OFF SHORE a ouvert la voie à la mise en valeur des océans.
Georges PIVERD
- Les recherches de pétrole sous les mers.
M. MAINGUY
- Des îles flottantes en métal au service de la recherche pétrolière.
M. RORET
- L'activité pétrolière en mer.
S. SAROCCHI
- Le développement et l'exploitation des gisements pétroliers sous-marins.
L. LAMAZOU
- Considérations économiques sur l'exploration et l'exploitation des gisements pétroliers sous-marins.
J. MONTEL
- Les gisements pétroliers OFF SHORE
A. VARTANIAN

Exploitation minière

- L'exploitation des minerais sous marins: De grands espoirs à long terme.
Philippe BOUYASSE et Robert HORN.
- The Mineral Ressources of the Sea
John J. MERO
- Mining offshore alluvials
M. J. CRUICKSHANK
- Exploitations minières au fond des mers.
Michel SORGER

Techniques

- La géophysique et la détermination des positions en mer.
R. DESAINT et H. RICHARD
- Choix des matériaux pour application marine
AH TUTHILL et CM SCHILIMOLER
- La corrosion
LORTIWARE
- La mer en bouteille
M. D. MOYEN.

(Tous ces articles ou ouvrages ont été largement utilisés, adaptés ou tout simplement pillés pour la rédaction de cette étude...)

Situation actuelle
des ressources minérales

Avant d'aborder le vif du sujet de cette étude, il est nécessaire de faire le point sur les ressources minérales exploitables mises en évidence à l'heure actuelle, car nous verrons que c'est l'évolution même des réserves potentielles des terres émergées qui a entraîné un essor prodigieux de la recherche vers les fonds marins.

Pour le fer, les réserves probables et possibles sont de l'ordre de 250 milliards de tonnes de minerai à la fin de 1967, auxquels il y a lieu d'ajouter 150 à 200 milliards de tonnes de réserves potentielles grâce aux découvertes de gisements importants en Afrique, aux Etats-Unis, au Canada, en Amérique Latine, en Inde et en Australie. En se basant sur la consommation annuelle de 1967 de 600 millions de tonnes de minerai, correspondant à environ 300 millions de tonnes de Fer métal contenu, et en admettant un taux d'accroissement de 5%, la couverture des besoins en Fer est assurée pour 50 ans environ.

En ce qui concerne les métaux non ferreux, leur position est comparable à celle du fer, pour le cuivre, le nickel et l'antimoine, mais plus critique pour le plomb, le zinc, l'étain, le mercure et l'uranium.

Pour les hydrocarbures, la situation n'est guère plus brillante que pour les minerais. Début 1968, les réserves mondiales prouvées de pétrole étaient estimées à 55 milliards de tonnes. Une exploitation annuelle constante de 1,7 milliards de tonnes, qui représente la production de 1967, épuiserait les réserves reconnues en environ 30 ans, et moins de 15 ans si on admet un taux d'accroissement annuel de 8%. Pour les gisements de gaz, les réserves reconnues sont encore plus faibles, par rapport aux besoins des prochaines décennies.

Le tableau n° 1 permet de se faire une idée de la situation des différentes substances minérales importantes, mais il est difficile d'avancer des chiffres en toute certitude, car les statistiques relatives aux réserves mondiales, à la production minière et à la consommation des minerais, avec indications des teneurs en métal contenu, sont très fragmentaires.

Ce que l'étude des statistiques permet néanmoins d'apprendre, c'est que dans un délai de 2 à 3 ans, l'accroissement de la demande a généralement été suivi du développement de la production, mais que ce délai a tendance actuellement à devenir de plus en plus long.

Jusqu'à présent d'autre-part, on s'est efforcé d'avoir des réserves couvrant la demande sur une période de 20 à 30 ans, compte tenu des taux d'accroissement annuel, souvent difficiles à fixer d'avance lorsqu'il s'agit de prévision à long-terme. Cette période devient maintenant beaucoup plus restreinte.

On peut donc être relativement inquiet au sujet d'une pénurie en matières premières de base dans un avenir plus ou moins lointain, en ce qui concerne le domaine minéral.

Mais la situation peut être redressée en lançant ou en hâtant la recherche de l'inventaire des substances minérales par une prospection intensive systématique, non seulement des terres émergées, mais aussi des fonds marins, et proposer des techniques nouvelles pour l'exploitation des gisements de plus en plus profonds et des GISEMENTS IMMERGES.

C'est sur ce dernier point que portera l'essentiel de cette étude, qui est motivée par les raisons précédemment évoquées et aussi par des raisons économiques. En effet, bien que l'inventaire des ressources minérales des terres émergées est loin d'être terminé et que les espoirs sont encore grands étant donné les progrès constants des techniques de prospection, il peut d'ores et déjà s'avérer plus rentable, pour des raisons politiques, économiques et techniques, d'exploiter certains gisements immergés d'accès facile, plutôt que d'entreprendre l'exploitation de gisements continentaux soit trop profonds, soit trop isolés.

De nombreuses Sociétés ont compris cet état de chose, et c'est pourquoi nous assistons actuellement à l'"explosion" des activités de l'homme en mer, dans ce domaine que les Américains ont appelé l' "INNER SPACE".

TABLEAU N°1
SITUATION MONDIALE DES SUBSTANCES MINÉRALES

Substances	Production minière (métal)			Consommation métal.			Reserves Mondiales Métal	Couverture des besoins	Remarques
	1957	1966	Accroissement	1957	1966	Accroissement			
FER					300 millions de t.		80 milliards de tonnes	50 ans	Baisse des teneurs des gisements découverts.
CUIVRE (millions de tonnes)	3,5	5,3	50%	3,2	5,2	61%	250 millions de tonnes	50 ans	production supérieure de 8% à la consom- mation de 1957 à 1966
PLOMB (millions de tonnes)	2,3	2,9	26%	2,4	3,3	38%	70 millions de tonnes	15 ans	Equilibre actuel de la production et de la consommation.
ZINC (millions de tonnes)	3,2	4,4	38%	2,6	4,2	60%	130 millions de tonnes	20 ans	Equilibre global sur la période considérée.
ETAIN (millions de tonnes)	0,2	0,214	7%	0,18	0,224	24%	6,6 millions de tonnes	25 ans	Défaut de production.
MERCURE (milliers de tonnes)	8	9	12%				200 milles tonnes	20 ans ?	absence de statistiques de consommation.
ANTIMOINE (milliers de tonnes)	410	630	35%				4 millions de tonnes	50 ans ?	"
NICKEL (millions de tonnes)	0,30	0,42	40%	0,23	0,46	100%	41 millions de tonnes	50 ans	Tendance au défaut de production
ALUMINIUM (millions de tonnes)				3,2	5	55%	?	?	Demande en hausse considérable.

Le Domaine Marin

Pour étudier le domaine marin, il est nécessaire de distinguer:

- l'hydrosphère, qui représente la masse liquide des mers et des océans.

- la marge continentale, aussi appelée "Socle sous-marin des continents" comprenant en général une plateforme dite "plateau continental", bordée par un abrupt, la pente continentale qui se prolonge vers le large par un glacis se raccordant aux grandes plaines abyssales.

- la plaine abyssale, généralement très plate, mais comprenant parfois des reliefs plus ou moins accentués (montagnes sous marines, guyots, etc...) et des fosses sous marines plus ou moins profondes.

- les rides midiocéaniques.

L'HYDROSPHERE

Environ 70% de la surface du globe sont occupés par les mers, ce qui représente 360 millions de km². Les terres émergées occupent pour leur part les 150 millions de km² restants.

La prédominance de l'élément marin est évidente. Cependant, les mers ne sont pas également réparties dans les deux hémisphères: l'hémisphère sud est plus riche en étendues marines que l'hémisphère nord puisqu'il comprend 206 millions de km² d'océans contre 155 millions de km².

La profondeur moyenne des mers est de 3 800 mètres. En comparaison avec l'élévation moyenne des terres qui est de 840 mètres, ce chiffre est considérable. En effet, si la limite solide du globe était une sphère, celle-ci serait couverte d'environ 2 440 mètres d'eau.

Le tableau de la page suivante, donne la répartition des profondeurs des océans.

Le volume océanique est de 1375 millions de kilomètres cube. De ce fait, l'eau de mer peut être pratiquement assimilable à l'hydrosphère, puisque chaque centimètre carré de surface terrestre dispose, en supposant une répartition uniforme, de 276 litres d'eau ainsi répartis:

- 269 litres d'eau de mer
- 7 litres de glace
- 0,1 litre d'eau douce
- 0,003 litre de vapeur

Profondeurs (mètres)	% de la surface des océans	surface (x 10 ⁶ km ²)
0 - 200	7,6	27,4
200 - 1 000.....	4,3	15,5
1 000 - 2 000.....	4,2	15,2
2 000 - 3 000.....	6,8	24,6
3 000 - 4 000.....	19,6	70,9
4 000 - 5 000.....	33,0	119
5 000 - 6 000.....	23,3	84,0
6 000 - 7 000.....	1,1	4,0
7 000	0,1	0,4
Total	100,0	361,0

Tableau N°2

Répartition des profondeurs des océans

La densité moyenne de l'eau de mer est de 1,025, chiffre dû au fait que les mers et océans sont en fait, un mélange d'eau, de sels dissous et d'autres substances organiques.

Tous les éléments naturels connus se trouvent pratiquement à l'état dissous dans l'eau de mer. Sa salinité moyenne est d'environ 35 grammes par litre. La masse totale des sels dissous serait donc de 5×10^{16} tonnes.

Deux éléments, le sodium et le chlore constituent à eux seuls 85% des sels contenus dans l'eau de mer. Les 9 éléments les plus importants représentent plus de 99% du total.

Le tableau n°3, page suivante, donne la concentration moyenne en mg/l et le poids total des éléments dissous contenus dans l'eau de mer.

Ces chiffres sont évidemment des moyennes. De nombreux facteurs interviennent sur la composition saline de l'eau de mer. En général par exemple, les mers chaudes sont plus salées que les mers froides: la mer Méditerranée a une salinité de 38 p.l 000, la mer Rouge de 42 p.l 000 tandis que la Baltique n'atteint pas 20 p.l 000. Certaines mers ont une salinité de 65 p.l 000.

TABLEAU N°3
ELEMENTS DISSOUS CONTENUS DANS L'EAU DE MER.

Eléments	Concentration (mg/l)	Tonnage total dans les océans.
1. Chlore	19 000,0	29,3.10 ¹⁵
2. Sodium	10 500,0	16,3.10 ¹⁵
3. Magnésium	1 350,0	2,1.10 ¹⁵
4. Soufre	885,0	1,4.10 ¹⁵
5. Calcium	400,0	0,6.10 ¹⁵
6. Potassium	380,0	0,6.10 ¹⁵
7. Brome	65,0	0,1.10 ¹⁵
8. Carbone	28,0	40,0.10 ¹²
9. Strontium	8,0	12,0.10 ¹²
10. Bore	4,6	7,1.10 ¹²
11. Silicium	3,0	4,7.10 ¹²
12. Fluor	1,3	2,0.10 ¹²
13. Argon	0,6	0,9.10 ¹²
14. Azote	0,5	0,8.10 ¹²
15. Lithium	0,17	0,3.10 ¹²
16. Rubidium	0,12	0,2.10 ¹²
17. Phosphore	0,07	0,1.10 ¹²
18. Iode	0,06	93,0.10 ⁹
19. Baryum	0,03	47,0.10 ⁹
20. Indium	0,02	31,0.10 ⁹
21. Zinc	0,01	16,0.10 ⁹
22. Fer	0,01	16,0.10 ⁹
23. Aluminium	0,01	16,0.10 ⁹
24. Molybdène	0,01	16,0.10 ⁹
25. Sélénium	0,004	6,0.10 ⁹
26. Etain	0,003	5,0.10 ⁹
27. Cuivre	0,003	5,0.10 ⁹
28. Arsenic	0,003	5,0.10 ⁹
29. Uranium	0,003	5,0.10 ⁹
30. Nickel	0,002	3,0.10 ⁹
31. Vanadium	0,002	3,0.10 ⁹
32. Manganèse	0,002	3,0.10 ⁹
33. Titane	0,001	1,5.10 ⁹
34. Antimoine	0,0005	0,8.10 ⁹
35. Cobalt	0,0005	0,8.10 ⁹
.....
39. Argent	0,0003	0,5.10 ⁹
.....
43. Cadmium	0,0001	0,2.10 ⁹
44. Tungstène	0,0001	0,2.10 ⁹
.....
47. Chrome	0,00005	78,0.10 ⁶
.....
50. Plomb	0,00003	46,0.10 ⁶
.....
57. Or	0,000004	6,0.10 ⁶

L'eau océanique gèle à $-1,9^{\circ}\text{C}$, mais en gelant une bonne partie des sels est expulsée de la glace qui est donc moins salée que l'eau.

Les variations de densité dues aux différences de salinité (par exemple des apports d'eau douce) sont susceptibles de donner naissance à des courants de densité.

Fréquemment, les masses d'eau sont stables et ne se mélangent pas: on a ainsi des eaux de salinité et de densité différentes qui se superposent. Un excellent exemple est la convergence antarctique, zone où, tout autour du continent antarctique, entre 55° et 60° de latitude, les eaux polaires froides s'enfoncent en biseau sous les eaux subpolaires: en quelques kilomètres la température varie de 4 à 5°C . Il s'ensuit des conséquences climatiques, biogéographiques et sédimentologiques tout à fait remarquables. Schématiquement, le sud est le domaine de la vase à Diatomées et le Nord celui de la boue à Globigérines.

Plusieurs faits permettent de penser que la salinité des mers n'a probablement pas beaucoup varié au cours des âges:

- la teneur moyenne des sels en eaux douces est très différente de celle de l'eau de mer.
- les dépôts salins englobés dans la lithosphère peuvent compenser les apports
- la survie de genres considérés comme des fossiles vivants est incompatible avec de grandes variations de salinité, au moins depuis l'ère primaire.

Le pH de l'eau de mer est de $7,8$ à $8,4$. Il n'a vraisemblablement que peu varié, puisque la précipitation des carbonates ne s'effectue pas en dessous de pH 7 .

Au point de vue température, celle-ci décroît en surface régulièrement de l'équateur vers le pôle. Elle ne varie que de quelques degrés en fonction des saisons. La chaleur emmagasinée par les eaux superficielles joue un rôle régulateur vis à vis du climat des continents. En profondeur, la température diminue régulièrement et se stabilise entre 0 et -2°C à $3\ 000$ mètres. Elle est plus élevée au voisinage du fond.

L'eau de mer a une coloration propre due au plancton. Cette coloration est modifiée par les alluvions des grands fleuves et la prolifération de certaines espèces planctoniques. En profondeur la transparence diminue rapidement. La moitié de la lumière est absorbée à 1 mètre, 80% à 11 mètres. A partir de 40 mètres c'est pratiquement la nuit. La visibilité horizontale au voisinage de la surface ne dépasse pas 20 mètres.

L'eau de mer est en réalité un milieu fort complexe qui suffit à assurer l'existence d'innombrables êtres. On y trouve comme nous l'avons vu toutes les matières minérales, mais aussi de l'albumine et des matières grasses qui contribuent à la formation de l'écume. L'eau de mer imprègne les organismes marins et tient lieu de sang à beaucoup d'entre eux. Aussi considère-t-on généralement qu'elle constitue le milieu vital par excellence et que c'est dans la mer qu'ont du prendre naissance les premiers organismes.

LA MARGE CONTINENTALE

I. Le plateau continental

Le plateau continental est la zone la mieux connue de tous les océans.

La notion de plateau continental est connue d'assez longue date. Elle était passée dans le droit international dès 1919 puisque la Russie en tirait argument pour considérer que les îles arctiques, reposant sur le même socle que le continent Sibérien, faisait naturellement partie de l'Empire Russe.

A. Définition et caractéristiques

Les continents se présentent en principe comme des boucliers et inversement les océans sont en général des cuvettes. A priori, il existe donc une zone d'inflexion au changement de courbure qui peut être considérée comme la limite des océans et des continents, et qui correspondrait au talus continental. Le plateau continental, compris entre la terre ferme et ce talus ferait donc partie du continent.

Très large en face des grandes plaines cotières, il est plus étroit et même parfois inexistant près des côtes bordées par un relief terrestre accusé (cordillère des Andes). Cette loi n'est malgré tout pas générale, puisque les montagnes cotières élevées de Norvège sont bordées par une immense plate-forme, le Strandflat qui porte de nombreuses îles et notamment les Lofoten. Il en est de même du Groenland.

Sa caractéristique principale est sa pente très faible ($1/8$ de degré). De ce fait, il est relativement peu profond.

La Convention de Genève, ratifiée par un grand nombre de pays en 1958, le limite à l'isobathe de 200 mètres, car c'est la profondeur moyenne du talus continental qui avait été calculée à cette époque. En fait, celle-ci est de 135 mètres.

Le plateau continental est continu entre l'Australie et la Nouvelle-Guinée, Bornéo et l'Indochine, la Chine et le Japon, sous la Manche, la Mer du Nord et la Baltique.

Il représente 27,5 millions de km², soit 17,5% des terres émergées. La France, ayant 3500 km de côtes, se trouve particulièrement avantagée. Le plateau continental prolonge de 30 % le territoire Français, ce qui représente 160 000 km².

Sa largeur moyenne à la surface du globe est de 68 km.

La profondeur moyenne des zones les plus plates est de 64 m.

B. Nature

La nature du plateau continental a été longuement contraversée.

- Murray supposait que le plateau continental était un immense delta de débris prolongeant partout la plateforme entaillée par les vagues des continents, d'où l'appellation impropre de talus continental pour la limite de ce qu'il croyait être un prisme de débris.

- F. Von Richtoffer avait bâti la théorie de la plateforme d'abrasion. Le plateau continental serait entièrement rocheux et du à l'abrasion progressive par la mer au cours des temps géologiques.

Ces théories ont été contredites par des découvertes plus récentes telles que la présence généralisée des canyons sous marins.

Le plateau continental est maintenant considéré comme le lieu des allées et venues de la mer au cours des temps géologiquement récents, et son usure s'est plutôt faite au cours des époques de retrait de la mer (régressions) que de celles d'invasion (transgressions).

Du point de vue morphologique, on retrouve donc dans le plateau continental la continuation de toutes les grandes lignes structurales du continent sous un voile de sédiments meubles.

Du point de vue géologie du substratum on manque encore de renseignements très précis en ce qui concerne la prolongation des formations sédimentaires observées vers la côte. Les progrès de la prospection moderne ont néanmoins permis de corréler les données stratigraphiques terrestres avec celles des échantillons arrachés sur le rebord du talus continental, en prenant pour point intermédiaire les carottages effectués dans les puits forés en mer, en particulier pour la recherche du pétrole. En effet, l'histoire géologique du globe est commandée par de perpétuelles allées et venues de la mer sur les

continents qui ont en particulier permis les dépôts charbonniers. La ligne des côtes actuelles, qui paraît immuable à notre échelle de temps, n'a aucun caractère définitif et en conséquence n'a aucun caractère de limite géologique.

C. Canyons sous marins

Comme il a été signalé plus haut, on observe sur le plateau continental un véritable réseau fluviatile, constitué de canyons sous-marins prolongeant le plus souvent les cours d'eau actuels du continent, avec méandres, captures, gorges épigéniques comme celle qui au large de St-Tropez recoupe une barre granitique...

Le canyon sous-marin le plus anciennement connu est le Gouf de Cap-Breton, souvent considéré comme un ancien cours sous-marin de l'Adour. La houle, comme au dessus de toute dépression marine n'y est pas dangereuse même par tempête, et c'est un lieu de refuge très sûr lorsque le ressac sévit à Hossegor.

Les canyons offrent un moyen de connaître directement la géologie profonde du plateau par carottage ou observation directe.

Leurs origines restent largement controversées. En tous cas, il semble impossible de les attribuer à la seule érosion des fleuves subaériens à des époques de régressions. Celles-ci auraient dû atteindre en effet parfois plusieurs centaines de mètres, ce qui est en contradiction avec l'amplitude généralement admise et qui est calculée par les spécialistes du glaciaire.

L'action érosive des "courants de boues" ou "courants de turbidité" au moment de la fusion des glaces qui laissent en fondant un désert boueux a été envisagée par R.A. DALY. Les études et expériences effectuées à ce jour n'expliquent encore pas tous les phénomènes..

Pour sa part le Français Jacques BOURCART, après de nombreux travaux, pense que les canyons sous-marins ont été creusés pendant les moments d'exagération de la courbure continentale et océanique sous l'effet des plissements.

Comme toujours en géologie, on peut penser que c'est la juxtaposition de tous ces problèmes qui constitue la véritable interprétation.

D. Sédiments du plateau continental

Les sédiments qui se déposent aux embouchures des fleuves

et sur la région cotière du plateau continental sont à la fois détritiques, organiques et physico-chimiques. Ils sont de granulométrie variée, depuis le gros galet jusqu'aux particules de vase, et de formes morphoscopiques diverses.

D'après leur milieu de formation on distingue :

- Les sédiments fluviaux-marins constitués par les quantités importantes de boues et de sables apportés aux océans par les fleuves et par les vases des estuaires.

La vase des estuaires est un sédiment complexe qui comprend une phase minérale inerte, et une phase active colloïdale qui sert de liant à la précédente. Cette phase est composée de matières organiques (pollen et humus venant du continent, diatomées et algon venant de la mer, et substances diverses venant de l'estuaire même) et de fer sous forme d'hydroxydes, de sulfures ou de pyrites.

- Les sédiments de rivage constitués par :

1) Les blocs et galets offrant une grande variété lithologique, arrachés aux falaises et provenant de torrents côtiers et érodés par la mer.

2) Les sables marins formés de minéraux détritiques résistants et de petits fragments de coquilles.

3) Les vases littorales fort variées semblables aux vases estuariennes, mais riches en sablon quartzeux et en micas.

- Les sédiments de lagunes sursalées dus à l'évaporation de l'eau et au dépôt des sels contenus dans l'eau de mer, et à l'accumulation de substances organiques.

- Les organismes constructeurs, sédiments dus aux animaux constructeurs et aux algues incrustantes qui s'agglomèrent en bancs récifaux et en platiers ou trottoirs.

Les dépôts du plateau continental lui-même sont dits néritiques et sont constitués pour une part des éléments organiques qui prolifèrent étant donné la pénétration de la lumière et pour leur majorité d'éléments détritiques.

Ceux-ci sont en grande partie d'origine subaérienne. Les autres ont été apportés dans les eaux marines par les vents (cendres volcaniques, poussières, et sables désertiques), par les glaces (moraines de fond des icebergs) ou par les courants de retour qui entraînent les dépôts littoraux.

Il faut savoir que l'on n'a pas décelé de relation constante entre la granulométrie des dépôts et la distance au

rivage. La distribution n'est due qu'aux mouvements de la mer, et à la trituration qu'elle provoque.

II. Le talus continental

La bordure du plateau continental, dite "talus continental" ou plus justement "pente continentale", a une largeur variant entre 15 et 50 km et s'étend jusqu'aux fonds océaniques abyssaux dont la profondeur varie entre 1 000 et 3 000 m.

Ce talus continental a une pente moyenne de 4° qui ne dépasse que rarement 15°, et se raccorde à la plaine abyssale par un glacis en pente douce de l'ordre de 1°.

Il est parfois inexistant comme entre la Louisiane et la Floride où le rebord du plateau continental disparaît sous une sorte d'immense cône de déjection provenant des dépôts fluviaux du delta du Mississippi se raccordant sans rupture à la plaine abyssale.

La pente continentale est la zone des dépôts bathaux constitués de vases qui ne se distinguent des boues pélagiques des grands fonds que par la présence d'une phase active importante. Les vases bleues sont les plus répandues. Elles sont formées de fines particules argileuses et d'organismes siliceux. Elles doivent leur teinte à la présence de sulfure de fer très divisé qui s'oxyde à l'air avec dégagement de H₂S. Elles abondent dans les mers fermées.

Les boues rouges colorées par la présence d'ocre rouge (hématite) sont surtout développées à l'embouchure des grands fleuves tropicaux.

Les vases jaunes se déposent au voisinage des embouchures des fleuves charriant beaucoup de limon.

Les vases vertes souvent sableuses doivent leur coloration à la présence de glauconie et renferment souvent des concrétions de phosphate de chaux.

C'est également sur le talus continental que l'on rencontre les "phosphorites", dépôt d'origine bio-chimique. Des conditions hydrologiques très particulières semblent nécessaires à leur formation, telles qu'un courant froid ascendant.

III. Les plaines abyssales

Les plaines abyssales ont une pente globale inférieure à 1/1 000 mais comportent de nombreux reliefs. Leur profondeur est comprise entre 3 300 et 5 500 m.

Elles comportent :

- Des fosses sous marines, qui sont des sillons relativement étroits dont la profondeur peut avoisiner 10 000 m.

- Des guyots, qui sont de curieuses montagnes à sommet tronqué, qui semblent être des volcans arasés lors d'une baisse de niveau des eaux ou d'appareil volcanique n'ayant pas atteint la surface.

Les plaines abyssales sont le domaine des dépôts pélagiques. Leur caractéristique est d'être constituées de particules ayant été transportées en suspension ou d'organismes vivants à grande profondeur. Les éléments extérieurs sont des poussières et des cendres volcaniques apportées par le vent, des colloïdes et des argiles venus des Pleuves et des côtes et dispersés par les courants généraux. L'essentiel de la sédimentation des mers profondes provient donc de matériaux biologiques, chimiques et volcaniques, ce qui l'oppose à la sédimentation continentale.

Les boues calcaires sont formées par le dépôt du squelette calcaire d'organismes planctoniques et existent jusqu'à 4 500 m. Parmi les boues calcaires on distingue :

- Les boues à globigérines qui caractérisent surtout les régions chaudes et qui renferment d'innombrables coques calcaires de Foraminifères (30 à 98% de CO_3Ca). Elles sont de couleur laiteuse ou jaune clair.

- Les boues à ptéropodes caractérisées par la présence des débris de mollusques portant ce nom.

Les boues siliceuses sont constituées par les restes d'animaux planctoniques à tests siliceux végétaux (Diatomées) ou animaux (Radiolaires). La boue à diatomées caractérisant les eaux peu salées des régions circumpolaires contient 2 à 40% de $CaCO_3$ et de 3 à 25% de minéraux divers, de la matière organique, des radiolaires et surtout des frustules ou squelettes de diatomées. Elle est de couleur jaune clair. Les boues à radiolaires répandues dans l'Océan Indien et le Pacifique à grande profondeur, sont dues à la disparition par dissolution des autres espèces planctoniques.

L'argile rouge des grands fonds est un sédiment qui tapisse au delà de 4 000 m. les plus grandes profondeurs connues. Elle semble résulter de l'altération des matériaux volcaniques, de poussières cosmiques et des éléments terrigènes les plus ténus. La couleur rouge s'explique par la présence d'hydroxyde de fer et d'oxyde de manganèse fréquemment concrétionnés en nodules.

C'est de 1873 à 1876 que l'expédition "Challenger" découvrit d'abondantes concrétions de dioxyde de manganèse hydraté dans le fond des 3 principaux océans. A la fin du 19^e siècle

Alexander Agassiz rencontra des nodules de manganèse sur la plupart des stations de dragage qu'il réalisa. On sait depuis que ces nodules sont surtout abondants dans le Pacifique. Leur formation est très rapide et bien qu'ils ne représentent qu'une faible proportion des sédiments pélogiques ils sont très importants du point de vue économique.

Malgré tous les efforts entrepris, les sédiments pélogiques restent encore relativement mal connus, bien que par endroits (mer Tyrrhénienne) leur épaisseur atteigne 2 à 3 000 m.

IV. Rides médioocéaniques

On connaît depuis longtemps l'existence de la ride médio-atlantique qui sépare en deux l'Océan Atlantique et qui est marquée par les îles volcaniques Jan Mayen, Islande, Açores, Saint Paul, Ascension, etc...

Depuis quelques années, de nombreuses recherches ont été entreprises et des rides médioocéaniques ont été découvertes dans la plupart des océans (Pacifique Sud - Arctique - Indien) et sont beaucoup mieux connues.

Par exemple la dorsale médio-atlantique a une double ligne de crête qui culmine à environ 1 800 m de la surface de la mer, et qui domine une étroite vallée centrale large de 8 km à sa base, de 20 à 40 km au sommet, et profonde de 1 800 m. Les versants extérieurs s'abaissent abruptement de 1 000 m sur un haut plateau fracturé qui descend par paliers de chaque côté jusqu'aux fonds abyssaux.

Le système médio-océanique représente en fait la plus longue chaîne de montagnes du monde, qui couvre une superficie comparable à celle de tous les continents sur environ 60 000 km.

Ce gigantesque système réclame une explication tenant aux structures les plus fondamentales de la terre. Il faut croire que la crête des dorsales médio-océaniques est un lieu où du matériel basaltique venant du manteau est injecté dans la croûte océanique. Ainsi renouvelé en permanence celui-ci se répand latéralement à partir de l'axe des dorsales, charriant les sédiments qui le recouvrent petit à petit et poussant devant lui les continents adjacents. Les bassins océaniques croîtraient donc le long des dorsales et se rétréciraient le long des grandes fosses. Les rides médio-océaniques seraient finalement la cicatrice qu'auraient laissée en s'écartant les deux continents qui la bordent.

LE TRAVAIL EN MER

Pour réaliser la mise en valeur des richesses marines, l'homme doit faire un effort d'acclimatation constant et proposer des solutions de plus en plus hardies aux problèmes et sujétions particulières du travail en mer, face à des éléments naturels peu favorables.

LES SOURCES DE DIFFICULTES

Les difficultés du travail en mer sont dues aux conditions météorologiques de surface qui se traduisent par quatre éléments essentiels: le vent, la houle, la marée et les courants, et à la présence de la couche liquide d'eau salée entre l'atmosphère où l'homme peut vivre et le fond de la mer dans lequel il recherche des substances minérales.

I. Les conditions météorologiques

A Le vent

La poussée du vent sur une structure est donnée par la formule:

$$F = K.S.V^2$$

K : coefficient de forme de la structure
S : section de la structure au maître couple
V : vitesse du vent

C'est en mer que l'on rencontre les vents les plus violents. En 1964, au cours de l'ouragan Hilda, on a pu enregistrer des pointes de vitesse de 320 km/h.

B La houle

La houle est une oscillation périodique de la surface de la mer provoquée semble-t-il par des tempêtes lointaines. La longueur d'onde de la houle est environ proportionnelle au parcours accompli.

La réflexion peut engendrer des ondes stationnaires dangereuses pour les navires à l'amarre, même dans les ports.

La houle crée des forces qui proviennent principalement du mouvement orbital des particules d'eau. De nombreuses théories ont été données pour décrire les champs des vitesses et des accélérations.

Le champ des vitesses permet de calculer la force de traînée appliquée à un obstacle cylindrique de révolution:

$$F_D = C_D \frac{W}{2 \cdot g} D H^2 K_D$$

avec $K_D = \frac{1}{H^2} \int_0^H u^2 dz$

Le champ des accélérations permet de calculer la force d'inertie de ce même obstacle:

$$F_i = C_M \frac{W}{g} \frac{D^2}{4} H K_i$$

avec $K_i = \frac{1}{H} \int_0^H \frac{\partial u}{\partial z} dz$

C_D : coefficient de traînée qui varie en fait avec le nombre de Reynolds entre 0,33 et 2, mais que l'on prend égal à une constante.

C_M : coefficient de masse compris entre 1,3 et 1,7

H : hauteur de l'obstacle

D : diamètre de l'obstacle

u : vitesse de l'eau par rapport à l'obstacle

W : densité de l'eau

Lorsque le fond se trouve à une profondeur inférieure à la demi-longueur de la houle, les mouvements de la mer sont accentués car la houle déferle. En dessous de cette distance, le mouvement orbital des particules d'eau s'annule

C Les courants

L'action des courants est plus faible que l'action de la houle en général, sauf dans les zones de courant permanent tel que le GULF STREAM qui atteint une vitesse de 8 km/h. pour un débit moyen de 40 millions de m³ par seconde.

La force d'un courant sur un obstacle cylindrique s'exprime par la formule:

$$F_C = \frac{W}{2 \cdot g} D C_D u^2 H$$

D Les Marées

Les marées sont dues principalement aux attractions des astres et en particulier de la lune et du soleil. L'amplitude de la marée dépend essentiellement de l'orientation des côtes. En mer fermée (Méditerranée) l'amplitude peut être nulle alors qu'elle atteint 14 m. dans certaines régions (Baie du Mont-St-Michel).

Lorsque la lune et le soleil sont en conjonction, il y a marée de vive eau, dont l'amplitude loin des côtes est mal connue. Il peut s'ajouter aux marées des surélévations dues au vent et à la baisse de pression atmosphérique (13 mm par mm de mercure). C'est ainsi que les inondations catastrophiques de Hollande de 1953 furent dues à la conjonction d'une marée astronomique, de vents de 120 km/h et d'une forte dépression barométrique.

Il est évident que ces divers facteurs ont une répercussion sur le travail de l'homme en mer qui comporte et comportera encore longtemps de nombreuses activités de surface.

Il se pose donc des problèmes :

- de sécurité en général.
- de résistance pour les constructions fixes qui doivent supporter l'action concomitante des quatre éléments.
- de positionnement et de stabilité pour les engins flottants.

Si les problèmes de résistance ont été résolus par des solutions classiques, par contre nous verrons plus loin que la nécessité d'un excellent positionnement a conduit à des technologies très particulières, telles que l'ancrage dynamique, et que la recherche de la meilleure stabilité des engins flottants s'est traduite par le lancement de nombreuses structures semi-submersibles, dont les volumes de carène se trouvent suffisamment en profondeur, pour ne pas être soumis à l'action de la houle.

Cependant, malgré la prolifération des techniques nouvelles, l'homme reste pour le moment impuissant à affronter en toute circonstance les éléments marins. De nombreux travaux, tels que la pose des conduites immergées, le forage à grande profondeur, la prospection gravimétrique, etc... ne peuvent se faire en effet que par des conditions météorologiques relativement clémentes.

II. L'élément liquide

L'élément liquide lui-même pose à l'homme trois problèmes fondamentaux d'ordre général:

- contrairement à un solide, il n'est pas possible d'installer à la surface d'un liquide des repères fixes. Il va de ce fait se poser des problèmes de localisation que nous étudierons lors du chapitre traitant de l'établissement de la carte bathymétrique.

- l'eau salée est un milieu extrêmement plus agressif que l'atmosphère, notamment pour les métaux, d'où des problèmes de corrosion.

- l'eau n'est pas respirable par l'homme et celui-ci doit donc pour effectuer des travaux sous-marins utiliser des plongeurs, des robots, des engins à coque résistante munis de télémanipulateurs et des techniques en général adaptées aux exigences marines.

LA RESOLUTION DES PROBLEMES

Nous allons aborder maintenant l'essentiel de ces grands problèmes.

I. L'ancrage dynamique

Aussi bien pour l'exploitation que pour la prospection marine, il faut pouvoir maintenir en place très précisément les constructions flottantes.

Nous savons que la résultante des forces qui s'appliquent sur une structure est équivalente à un couple unique C_e et à une force unique F_e appliqués au centre de gravité de la structure.

Pour maintenir en position les engins flottants, l'ancrage dynamique expérimenté par l'I.F.P permet de remplacer l'ancrage funiculaire classique, lorsque câbles et chaînes ne sont plus utilisables.

Il est réalisé au moyen de propulseurs orientables dont la poussée est asservie en direction et en intensité à l'écart de l'engin flottant avec la verticale du point de station, qui appliquent une force $P = -F_e$ et un couple $C = -C_e$.

Les propulseurs sont asservis à un détecteur de position qui peut être par exemple un appareil de mesure de l'inclinaison d'un fil tendu entre la surface et le fond et un compas gyroscopique pour maintenir le cap face à la houle.

Il faut mettre en oeuvre au moins deux propulseurs placés de part et d'autre du centre de gravité de l'engin et le plus loin possible de ce point pour contrecarrer l'action des éléments extérieurs. Ces propulseurs reçoivent les ordres de manoeuvre directement d'un ordinateur, pour annuler rapidement les variations d'écart sans engendrer un mouvement d'oscillation autour du point de localisation.

Etant donné la souplesse que l'on demande aux propulseurs ils doivent être de grande puissance.

L'ancrage dynamique est utilisé sur la plupart des réalisations récentes, telles que le TEREHEL (bateau d'expérimentation de l'I.F.P) et les plateformes de forage semi-submersibles pour grande profondeur.

II. La corrosion

Puisque l'acier est le matériau de base le plus employé dans le milieu marin, on doit connaître son comportement à la corrosion pour savoir où et quand on doit améliorer la qualité en passant à des matériaux plus durables.

C'est parce que c'est un milieu vivant et parce qu'elle a une composition minérale complexe, que l'eau de mer, tout comme l'atmosphère marine, est corrosive.

A. Facteurs physiques, chimiques et biologiques de la corrosion.

1. Action de l'oxygène dissous

Le taux de corrosion, quantité de fer attaqué par dm^2 et par heure, est déterminé dans une large mesure par l'oxygène dissous dans l'eau de mer.

Pour l'eau douce, ce taux est maximum pour une teneur de 15 à 18 mg d'oxygène par litre. Il est nul pour une teneur nulle et une teneur supérieure à 30 mg/l. Par contre, la présence de chlorures dans l'eau de mer détruit l'action inhibitrice d'un excès d'oxygène et pratiquement le taux de corrosion est proportionnel à la teneur en oxygène dissous.

C'est ce phénomène qui explique que le taux de corrosion est maximum pour la partie des constructions situées dans la zone des éclaboussures qui comprend les quelques mètres au dessus du niveau de la pleine mer.

Il est également important dans les zones calmes peu profondes de l'océan où les algues et les mollusques sont plus abondants. Sous l'action de la lumière, ces êtres vivants fixent le carbone du gaz carbonique présent dans l'eau en libérant de l'oxygène: c'est la photosynthèse.

2. Salinité de l'eau de mer

La salinité ne fait varier l'importance de la corrosion que pour des teneurs de chlorure de sodium de 1 centigramme à 10 grammes par litre, valeur pour laquelle elle est maximum.

Les faibles variations de salinité de l'eau de mer sont donc sans effet sensible sur l'agressivité de celle-ci vis à vis de l'acier.

3. Température

Le taux de corrosion croît avec la température. La différence du taux de corrosion d'un acier plongé dans une solution saturée d'air et une solution désaérée diminue avec la température.

4. Courants

Les déplacements de l'eau de mer paraissent avoir une action importante sur la forme et le développement de la corrosion des aciers.

5. Salissures marines

Les divers animaux mous qui peuvent rester accrochés plusieurs années aux surfaces métalliques ont une action localisée très importante car ils provoquent des phénomènes d'aération différentielle dont nous reparlerons plus loin.

B. Comportement des aciers à l'eau de mer

Un acier ordinaire plongé dans l'eau de mer, donne une perte de poids d'environ 10 grammes par dm^2 et par an.

Les différences entre l'acier Thomas et l'acier Martin ne sont pas significatives.

Par contre, le comportement des divers aciers inoxydables est meilleur. De petites adjonctions de Nickel ou de Cuivre semblent augmenter encore leur résistance. C'est pourquoi les cupro-nickel sont particulièrement recommandés.

Malgré tout, les aciers martensitiques au chrome, riches en carbone, sont sensibles à la corrosion par piqûres ou aération différentielle.

C. Mécanisme de la corrosion

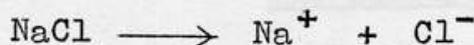
Nous savons que la corrosion a lieu quand deux parties d'un élément métallique forment entre elles une pile.

Cette pile peut avoir plusieurs origines:

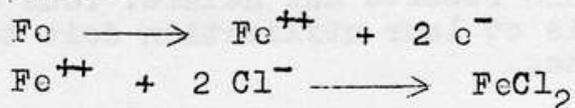
- Les hétérogénéités du métal lui même, telles que les impuretés, les différences de qualités mécaniques etc...
- L'action différentielle de l'oxygène.
- Le contact de l'élément métallique avec deux électrolytes ou métaux différents.

Le mécanisme schématique de la corrosion en eau de mer est alors le suivant:

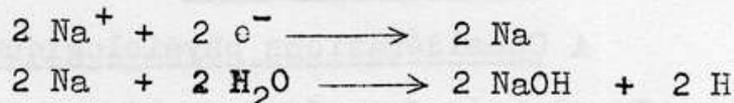
- Ionisation du chlorure de sodium:



- A l'anode:



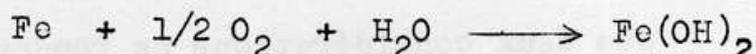
- A la cathode:



- Réaction entre les produits anodiques:



L'ensemble de ces réactions peut se traduire par:



D. Moyens de protection des aciers contre la corrosion marine.

Pour toutes les méthodes de protection, il faut d'abord réaliser une excellente préparation de surface par décapage, sablage, etc...

- La protection cathodique réactive consiste à mettre en contact l'acier à protéger avec des anodes réactives constitués par des métaux plus électronégatifs comme le zinc et le magnésium qui sont alors les seuls à subir la corrosion.

- La protection cathodique électrique consiste à faire passer un courant continu dans la structure pour éviter la formation de piles dans celle-ci.

Ces deux méthodes doivent être en tous cas complétées par un revêtement superficiel, qui peut en certain cas se suffire à lui même. Ce revêtement est soit de la peinture, procédé qui reste le plus employé, soit du zinc déposé par galvanisation à chaud pour les petites pièces, ou par métallisation au pistolet pour les autres cas, ou encore des matières plastiques d'épaisseur suffisante convenablement accrochés à la surface métallique à protéger...

D'autre part, il faut éviter d'utiliser plusieurs métaux pour construire un équipement destiné à assurer un service dans l'eau de mer. Là où il n'est ni possible, ni souhaitable, de construire en un seul alliage, il faut s'assurer que les éléments essentiels sont en alliages nobles, donc protégés, et qu'ils sont plus cathodiques dans l'échelle des potentiels galvaniques que les autres éléments constitutifs de la construction.

Disons pour conclure que la corrosion n'est hélas pas un phénomène réservé aux aciers. Tous les autres métaux y sont soumis et leur utilisation doit toujours se faire avec précautions.

III. La plongée humaine

A Considérations physiologiques

La plongée fait évoluer l'homme dans l'eau, milieu différent de son milieu naturel aérien. Or l'eau n'est pas respirable par l'homme. Elle ne contient à 20 °C. que 0,536 % d'oxygène. Par ailleurs elle est beaucoup plus dense que l'air: 1 litre d'eau pèse environ 1 kilogramme, tandis qu'un litre d'air pèse 0,0013 kilos.

Ces deux considérations ne rendent la plongée humaine possible que si l'on dispose d'un mélange respiratoire délivré au plongeur à la pression ambiante, sinon la cage thoracique, soumise de part et d'autre à des pressions différentes, s'écraserait.

Actuellement l'air est fourni presque exclusivement par des bouteilles d'air comprimé accrochées sur le dos des plongeurs, délivrant à la demande par un détendeur de l'air à la pression ambiante. Ce "scaphandre autonome" a remplacé le scaphandre lourd (1819) des pêcheurs d'éponge qui s'était lui-même substitué à la cloche immergée datant de l'antiquité.

Malheureusement les composants de l'air atmosphérique (oxygène 21% - Azote 79%) deviennent dangereux lorsque leur pression partielle croît. Or l'augmentation de pression subie est de 10 kg/cm² tous les cents mètres de profondeur.

L'oxygène provoque des crises convulsives du type épileptique à partir de 2kg/cm², ce qui correspond à de l'air respiré sous 90 mètres d'eau. Il est prouvé qu'il est souhaitable de fournir aux plongeurs de l'oxygène à une pression partielle voisine de la surface. Il y a donc un mélange idéal pour chaque profondeur.

Pour sa part l'azote sous pression provoque des troubles nerveux et psychologiques que l'on a baptisés "Ivresse des Profondeurs" dont l'origine reste mal déterminée. Suivant les individus, ces troubles apparaissent entre 50 et 90 mètres.

Dés 1922 on a substitué à l'azote l'hélium qui présente une plus faible densité et une plus faible viscosité que l'azote et a permis d'atteindre des profondeurs de plus de 300 m. (KELLER 1961 - VEYDRUNES et JULIEN 1968). A ces profondeurs on peut craindre des phénomènes de narcose et il devrait être possible d'utiliser alors l'hydrogène.

Un autre problème important est la dissolution des gaz dans les tissus et le sang. Elle est surtout fonction de la pression puisqu'elle augmente avec elle suivant la loi de Henry, mais aussi du coefficient de solubilité, du temps (courbe exponentielle jusqu'à la saturation) et du nombre de gaz du mélange (loi de Dalton). Le mélange respiratoire se dissout donc dans le sang et passe par l'intermédiaire de celui-ci dans les cellules. Cette dissolution n'est pas gênante en soi et ne limite pas la vitesse de descente des plongeurs, mais le problème de la remontée est beaucoup plus délicat, car le phénomène inverse se produisant, il est nécessaire que les gaz dégagés par les tissus soient convenablement drainés par le sang et évacués au niveau des poumons.

Si la remontée est trop rapide, l'état instable de saturation atteint sa valeur critique et les gaz se dégagent des tissus sous forme de bulles qui sur place, ou entraînées par la circulation, provoquent des embolies gazeuses dont la gravité est fonction de leur localisation.

Les accidents peuvent se traduire :

- par des accidents cutanés tels que des sensations de brûlure, des démangeaisons, des gonflements localisés douloureux ou des pétéchies (taches rouges hémorragiques localisées)
- par des troubles respiratoires évocateurs d'embolie gazeuse.
- par des douleurs ostéo-articulaires.
- par des troubles nerveux allant jusqu'à la paralysie temporaire ou définitive.
- la mort par embolie.

Il est donc indispensable de calculer à la remontée les temps de séjour des plongeurs à différentes profondeurs, dites " palier de décompression " pour éviter tout accident. Par exemple, après une heure de travail par 100 mètres de fond la remontée doit durer environ 5 heures.

Malgré tout l'accident de décompression peut survenir et le seul traitement de l'embolie gazeuse est la recompression. Celle-ci se fait dans des sas spécialement aménagés à bord des navires de plongée.

B. Les recherches et réalisations

Les recherches actuelles visent à déterminer les mélanges gazeux idéaux propres aux profondeurs que l'on veut atteindre et à établir par le calcul puis à étalonner expérimentalement les programmes de décompression en fonction des profondeurs atteintes et des durées de séjour.

La France a acquis sur ces techniques de plongée profonde une réputation mondiale et tout porte à croire qu'elle pourra maintenir en ce domaine une situation privilégiée reconnue par les Américains eux-mêmes.

Elle a porté son effort principalement sur l'étude de la vie pendant de longues durées sous pression, dans le but d'essayer les longues et dangereuses décompressions.

Les expériences de maisons sous la mer du Commandant COUSTEAU ont été entourées d'une large publicité. Au cours de "PRECONTINENT III" par exemple, six hommes ont séjourné durant un mois à -110 mètres. Un important matériel de scurvitude était nécessaire pour l'approvisionnement en gaz respirables, en énergie etc...

Dans le même but, des expériences de "maisons sur la mer" ont été entreprises par la S.P.A.F et ont conduit à une technique utilisée maintenant couramment par les pétroliers. Le procédé consiste à avoir en surface un caisson de décompression multiplace à plusieurs compartiments avec sas et une ou plusieurs tourelles submersibles pouvant se coupler d'une manière étanche sur le sas.

Cette tourelle peut être à double chambre et fonctionner par exemple de la manière suivante: les chambres sont portées à la pression de la mer et un sas reste ouvert pour permettre aux plongeurs de sortir et de travailler, puis de rentrer de nouveau dans la chambre supérieure se reposer et se réchauffer un peu. A la remontée la tourelle est adaptée par clampage en moins d'une minute sur le caisson de surface et les scaphandriers transférés en quelques seconde en équipression dans le caisson où ils peuvent séjourner avant une nouvelle plongée ou être décompressés.

Par ailleurs la chambre supérieure peut être isolée et maintenue à la pression atmosphérique pour loger par exemple un observateur familiarisé avec l'équipement sous-marin qui pourra communiquer avec le plongeur et le guider, tout en n'étant pas asservi à vivre pendant un très long temps en pression.

Parmi les meilleures réalisations, citons la tourelle "CACHALOT" qui récemment a permis de faire travailler six plongeurs par des fonds de 180 mètres 5 heures par jour et par plongeur.

A coté de ces expériences in situ la France dispose de trois stations expérimentales terrestres permettant d'assurer en caisson des expériences de plongée profonde en saturation, à Toulon (G.E.R.S), à Marseille (O.F.R.S et COMEX).

La COMEX (Compagnie maritime d'Expertises) détient le record mondial de plongée profonde avec -365 mètres. L'implantation à Brest du C.N.F.X.O (Centre National pour l'Exploitation des Océans) aboutira vraisemblablement à la mise en oeuvre de nouvelles installations d'expérimentation de matériel de plongée sur ce site.

C'est dans ces centres qu'a été par exemple élaboré le triple vêtement de plongée français, constitué d'un sous-vêtement chauffant à réseau de résistances, d'un deuxième sous-vêtement à alvéoles et d'un survêtement de caoutchouc qui permet d'assurer la protection thermique des plongeurs autonomes en grande profondeur. Le casque à régulateur d'air complète l'ensemble de plongée et fonctionne soit en circuit ouvert sur alimentation autonome, soit sur "narghilé" connecté à une tourelle. Il peut par ailleurs être doté d'un système téléphonique émetteur-récepteur.

IV. Les véhicules sous-marins

A Principe du sous-marin

Jusqu'à la fin de la guerre de 1939-1945 les sous-marins ont presque exclusivement été conçus pour des besoins militaires. Leur profondeur d'immersion était encore faible: de l'ordre de 150 mètres.

Ce n'est que depuis la guerre que les océanographes ont envisagé leur utilisation à des fins civiles scientifiques et plus récemment les industriels pétroliers, confrontés à des travaux sous-marins délicats.

Un sous-marin est constitué d'une coque résistante qui est calculée pour la pression extérieure maximale avec un coefficient de sécurité de 1,8 à 2,2. La forme du sous-marin est généralement cylindrique, puisque c'est elle qui allie de bonnes caractéristiques hydrodynamiques à une résistance permettant une économie sérieuse de poids. La paroi de la coque est en acier soudé, et est raidie par des membrures circulaires qui permettent une résistance au flambement sans poids prohibitif de l'ensemble.

La coque d'un sous-marin reste malgré tout déformable et si l'on tend entre deux parois un fil d'acier en surface, on constate une flexion notable de celui-ci par quelques dizaines de mètres de fond.

Pour naviguer en immersion, le poids du sous-marin doit être rigoureusement égal à la poussée d'Archimède. Ceci est réalisé en laissant pénétrer de l'eau dans les ballasts, compartiments prévus à cet effet. Pour alléger le sous-marin et obtenir la remontée, l'eau est chassée au moyen d'air comprimé.

Les évolutions du sous-marin dans le sens vertical sont obtenues par des gouvernails horizontaux. Le gouvernail de plongée, pour sa part, modifie l'assiette du sous-marin, c'est à dire l'angle de son axe avec l'horizontale. Les barres de plongée avant ou milieu font monter ou descendre l'engin.

B. La propulsion

Pour le moment, la seule énergie utilisable commercialement pour les véhicules sous-marins est l'énergie électrique fournie par des batteries d'accumulateurs au plomb-acide ou au zinc-argent.

En effet, les moteurs à combustion interne consomment de l'oxygène et émettent des gaz d'échappement toxiques. Le combustible consommé ferait en outre varier le poids du sous-marin et la chaleur dégagée serait difficile à évacuer.

L'énergie nucléaire est bien utilisée pour les véhicules sous-marins militaires lourds, mais ne peut faire encore l'objet d'applications industrielles qui réclament généralement des puissances moyennes et un prix raisonnable.

Il est donc normal que pour palier au lourd handicap d'une autonomie modeste, d'une énergie de propulsion chère et de la nécessité de disposer de moteurs classiques pour recharger en surface les batteries électriques, de gros efforts aient été faits pour se tourner vers de nouvelles sources d'énergie de propulsion.

Les recherches actuelles portent surtout sur les piles à combustibles et les systèmes chimico-dynamiques:

- Dans une pile à combustible, le combustible et le comburant sont amenés au contact d'électrodes respectives baignées par un électrolyte (par exemple une solution assez concentrée de potasse). Les électrodes sont poreuses, et c'est par ces pores que s'établit le contact entre les produits réactifs, l'électrolyte et le métal de l'électrode.

Un tel générateur est donc susceptible de convertir à froid en énergie électrique, avec un bon rendement l'énergie disponible dans le système constitué par le combustible et le comburant.

Le combustible et le comburant peuvent être utilisés sous des formes variées. On peut par exemple employer aussi bien des substances gazeuses ou liquides, ou éventuellement des substances solides.

Les principales substances réactives utilisées sont l'oxygène comme combustible et l'hydrogène comme comburant.

Ces principes étant énoncés, il reste que de nombreux problèmes doivent encore être résolus pour envisager une application industrielle des piles à combustibles aux véhicules sous-marins.

- Les systèmes chimico-dynamiques sont caractérisés, du point de vue thermodynamique, par un cycle thermique qui transforme directement l'énergie chimique en énergie mécanique capable d'actionner un arbre moteur. Le moteur d'automobile et la turbine à gaz sont des exemples familiers de ces sources d'énergie chimico-dynamiques.

Les caractéristiques de ces dernières qui les désignent tout particulièrement pour les applications sous-marines sont:

- un encombrement et un poids réduits même dans la zone des puissances élevées.
- la possibilité de récupération de la chaleur dégagée, pour le chauffage du milieu ambiant.
- une mise en service relativement brève et peu coûteuse du fait de l'état d'avancement de cette technique.
- une grande variété de combustibles utilisables dont les hydrocarbures classiques tels que le diesel-oil et le fuel JP-4 pour turbines à gaz.
- la possibilité d'attaque directe d'alternateurs ou de pompes hydrauliques sans l'intermédiaire de commutatrices ou de moteurs asynchrones d'entraînement.
- l'absence de tout danger de radiations.

De telles sources d'énergie ont aussi leurs inconvénients:

- nécessité d'une alimentation continue en réactifs chimiques.
- rendement inférieur à celui des piles à combustible du point de vue de la puissance électrique utilisable (ce qui peut être compensé par la nécessité de réchauffer le milieu ambiant)
- variation de la flottabilité résultant de la consommation des réactifs.
- difficulté d'évacuation des produits de la combustion de certains fuels dans le cas de cycles thermodynamiques ouverts.

Sur le plan de la conversion de l'énergie, les systèmes chimico-dynamiques peuvent être classés en deux groupes:

- Les systèmes à cycle ouvert, où le fluide moteur est un produit de combustion que l'on rejette hors du véhicule sous-marin, sous la pression des eaux ambiantes.

Dans un système énergétique classique à cycle ouvert (cycle de Rankine) un combustible tel que le diesel-oil ou le JP-4 et un oxydant tel que l'oxygène liquide ou l'eau oxygénée sont brûlés dans une chambre de combustion en présence d'eau pour contrôler la température de combustion. Les produits de la combustion passent dans une turbine ou une machine à détente pour fournir de l'énergie mécanique. Les gaz condensables sont évacués dans un condenseur et les gaz non condensables sont comprimés et rejetés au dehors.

- les systèmes à cycle fermé où le fluide est recyclé en un circuit entièrement bouclé.

Dans un cycle énergétique fermé, la combustion a lieu dans un foyer extérieur à une pression légèrement supérieure à la pression sous-marine ambiante. Les produits de la combustion passent d'abord dans un échangeur de chaleur où les calories sont transmises au fluide moteur à l'intérieur d'un circuit fermé, puis ils sont rejetés à l'extérieur.

C'est parce qu'ils sont une solution séduisante, que nous avons parlé relativement longuement des systèmes chimico-dynamiques. Mais tout comme les piles à combustible, ils nécessitent encore un grand effort de recherche avant d'être utilisés industriellement.

Disons pour conclure, que dans le choix d'une source d'énergie sous-marine, il y a lieu de considérer plusieurs facteurs. Parmi ceux-ci il faut noter: la sécurité, la fiabilité, le poids, l'encombrement, les aides nécessaires, le temps de mise en service, le prix et la souplesse de fonctionnement. L'importance respective de ces différents critères dépend des conditions d'emploi du matériel et de la nature même du matériel. Il est donc certain, que tous les différents modes de propulsion précités, déjà mis en oeuvre ou encore au stade de l'expérimentation, loin d'être concurrents, sont complémentaires et sont tous promus à de grands développements.

C. Les matériels existants

Le sous-marin présente l'avantage de laisser l'homme dans son milieu naturel, à la pression atmosphérique, tout en le soustrayant à l'agitation de la surface qui rend difficile l'opération la plus simple. Il permet aussi d'approcher et d'avoir la vue directe de l'opération à effectuer. Il est donc normal que de nombreuses réalisations industrielles se développent actuellement.

Tout le monde connaît la Soucoupe plongeante P. 350 du Commandant COUSTEAU, capable de transporter deux hommes jusqu'à une profondeur maximale de 350 mètres, dotée d'un rayon

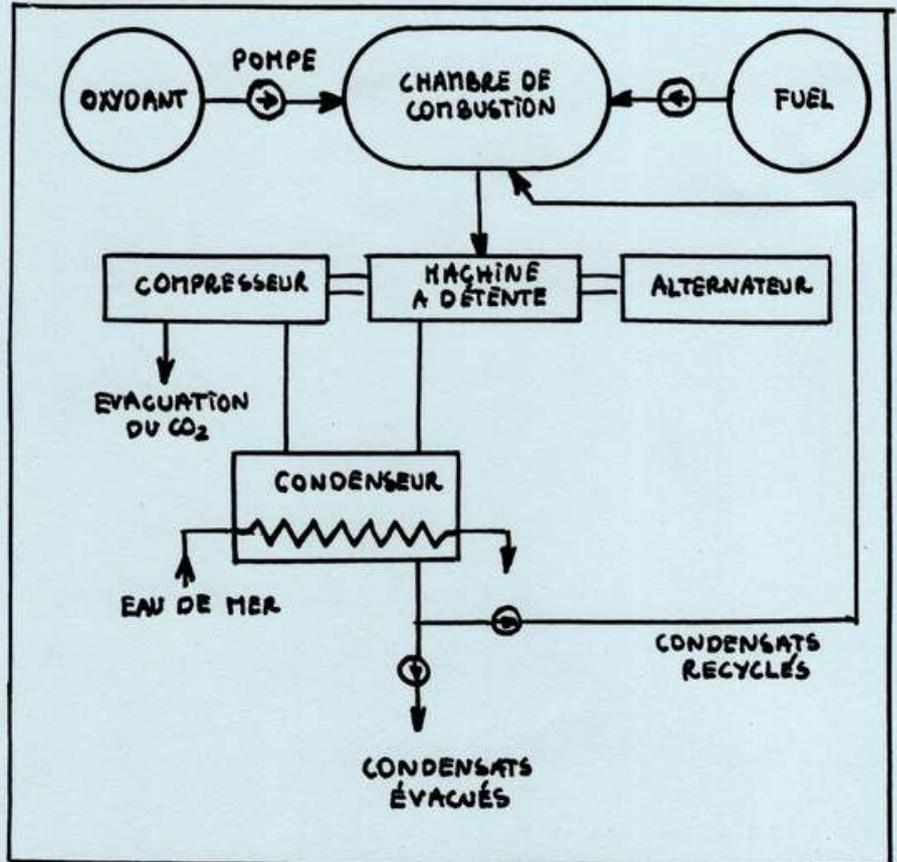


Fig: 4
Système
Chimico-dynamique
à cycle ouvert.

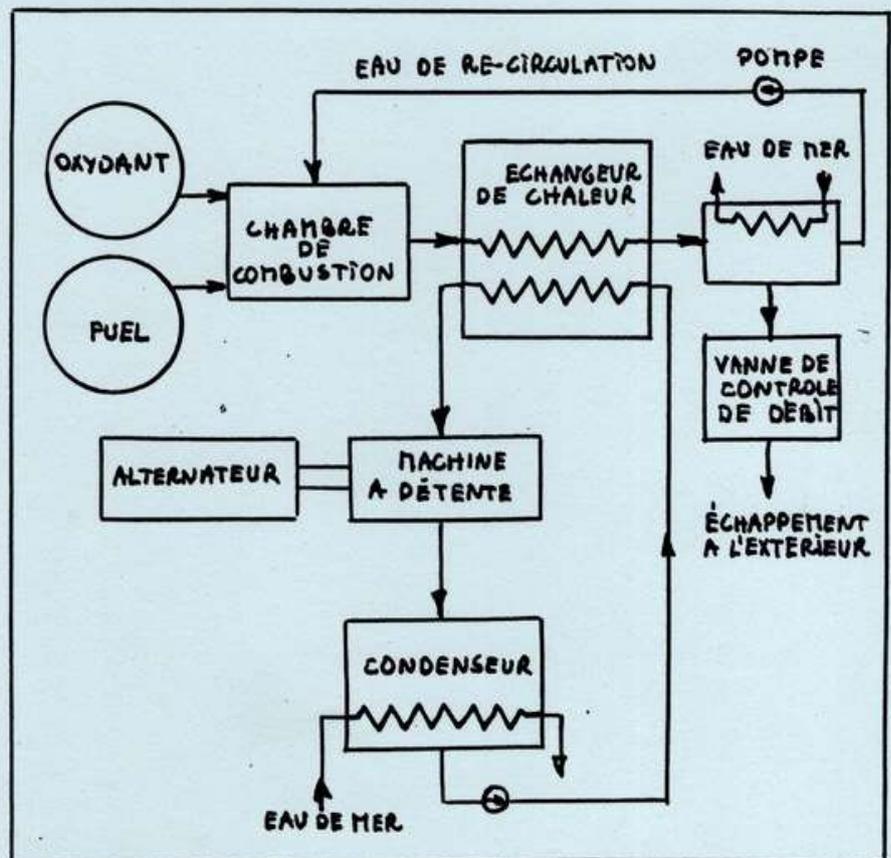


Fig: 5
Système
Chimico-dynamique
à cycle fermé.

d'action moyen de 3 à 4 miles avec une durée moyenne de plongée de 4 à 5 heures et une autonomie respiratoire de 24 heures. Elle est mise en oeuvre depuis un bâtiment accompagnateur.

Mais il existe beaucoup d'autres engins allant des bathyscaphes pour grande profondeur (Triestre - Archimède) à la "Puce de Mer", soucoupe plongeante monoplace SP 500 de l'O.F.R.S.

Parmi les grandes familles de submersibles citons:

- l'Aluminaut et l'Alvin dont nous reparlerons plus loin lors de l'étude des procédés d'échantillonnage superficiel.

- le Deep Quest de Loockeed, le plus important des sous marins récents qui est opérationnel dans la zone des 2 000 mètres et qui dispose d'une capsule pressurisée du type Cachalot.

- le D.S.R.V submersible pour recherche et sauvetage d'équipages en fin de construction par Loockeed.

- Les "Diving Saucers" de Westinghouse et les "Stars" de Général Dynamics.

- Le Beaver de North American Aviation à but d'intervention sur les installations pétrolières immergées.

Il faut également rappeler la grande contribution apportée à l'Océanographie par le Professeur Auguste PICARD et maintenant le Docteur Jacques PICARD, fils du célèbre savant, qui vient d'entreprendre avec le PX 15 une expérience sans précédent.

Le PX 15 est le descendant direct du "Mésoscoppe" qui transportait 40 passagers et qui a offert à des milliers de touristes une première vision des profondeurs du Lac de Genève. Il a pour but, au cours d'une expérience prochaine, de dériver dans le GULF STREAM pendant un mois, à 300 mètres de profondeur, entraîné par ce courant à la manière d'un ballon ou d'un radeau subaquatique.

Le PX 15 mesure 14,40 mètres de long et pèse 130 tonnes, caractéristiques qui le place en tête des submersibles de recherches privés qui aient jamais été construits. Il diffère du sous-marin classique en ce qu'il peut se stabiliser et naviguer à une profondeur donnée. Normalement une coque de sous-marin est plus compressible que l'eau. Il s'ensuit qu'au cours de la plongée son volume diminue, ce qui le rend plus dense que l'eau. Il ne peut se maintenir à une certaine profondeur qu'à condition d'actionner ses hélices ou d'agir sur les water-ballasts.

Etant donné que le PX 15 est moins compressible que l'eau, il n'aura pas tendance à s'enfoncer davantage une fois que ses ballasts auront été réglés pour une certaine profondeur, pas plus qu'il ne remontera, car sa coque d'acier rigide de 35 mm d'épaisseur se "décompressera" moins vite que l'eau ambiante.

Le submersible possède 4 moteurs électriques de 25 CV qui ne lui serviront pendant l'expérience, qu'à revenir périodiquement dans l'axe du courant. L'équipement électrique du bord est fourni par des batteries d'un poids total de 25 tonnes.

Le programme scientifique de la croisière est basé sur l'extrême discrétion du vaisseau. PICCARD pourra ainsi enregistrer les moindres bruits de fond émanant de l'océan, sujet majeur pour les géologues qui étudient l'acoustique sous-marine.

Le PX 15 pourra par la suite être adapté à bien d'autres travaux sous-marins, tels que les interventions sur le matériel pétrolier immergé, les sauvetages, la récupération de cabines spaciales...

Comme nous le voyons donc, nous sommes en pleine période d'expansion dans le domaine de la construction des véhicules sous-marins et il ne fait pas de doutes que de nombreux progrès vont être faits ces prochaines années.

On peut en effet constater que la construction de véhicules sous-marins civils a commencé par les bathyscaphes de grandes profondeurs (plus de 10 000 mètres) et concerne encore actuellement surtout les profondeurs moyennes (2 000 mètres). Ces profondeurs sont pour l'instant bien plus fortes que celles qui intéressent le plus l'industrie pétrolière et minière sous-marine, et il est donc urgent de mettre en oeuvre des véhicules économiquement valables aux profondeurs plus modestes où l'on travaille actuellement.

Dans un autre ordre d'idée, il sera peut être nécessaire pour certains travaux de mettre en oeuvre des véhicules de fond sur chenilles ou sur roues, et il n'est pas impensable que ce matériel puisse être extrapolé des engins lunaires de surface, qui eux existent déjà...

La Carte Bathymétrique

Un élément essentiel de la conquête du fond des océans est la précision avec laquelle il est maintenant possible de connaître leur relief exact.

Pour établir la carte bathymétrique il est nécessaire d'accomplir deux opérations indispensables.

- Localiser très exactement la position de mesure.
- Mesurer la profondeur de l'océan à l'endroit localisé.

LA LOCALISATION

Les recherches et travaux en mer n'auraient pas grande signification si leur position n'était connue d'une façon absolue dans un ensemble homogène généralement relié à la côte avec la précision maximale.

I Procédés optiques classiques

Les procédés optiques classiques sont utilisés pour les études d'étendue restreinte, de durée limitée et à proximité des côtes.

- Les cercles hydrographiques permettent d'effectuer le relevé par visées sur des points connus à terre.
- Des théodolites visent le navire laboratoire depuis des points connus de la côte.

Ce deuxième procédé est plus précis mais présente l'inconvénient d'exiger une liaison radio entre les opérateurs à terre et le navire.

II Les systèmes de radio-navigation

Pour la localisation à plus grande distance des côtes, on en est venu aux méthodes de radio-navigation, qui se sont substituées aux relevés astronomiques.

Chaque système de radionavigation a ses propres caractéristiques dont les plus importantes pour l'utilisateur sont :

- La sensibilité qui se traduit par le plus petit déplacement mesurable,
- La fidélité, c'est à dire la précision avec laquelle il est possible de revenir en un point donné,
- La précision absolue avec laquelle est donnée une position.

Les différents systèmes se classent en deux grandes catégories :

- Les systèmes à impulsions : radars classiques et radars à balises répondeuses (Shoran),

- Les systèmes à ondes entretenues : avec mesures de phases en haute fréquence (Decca), avec mesures de phases en basse fréquence (Rana, Lorac, Raydist, Toran).

A. Système à impulsions

Parmi les systèmes à impulsions, signalons que la Société américaine Marquardt a mis au point un sonar à effet Doppler, excellent moyen indépendant de navigation pour tout véhicule marin en surface ou en plongée. Il permet de déterminer la vitesse vraie, la distance parcourue et la position du navire par tous les temps et remplace avantageusement tout système de localisation sur le plateau continental.

Ce sonar comprend un ensemble émetteur d'ultra sons dirigés vers le fond de la mer et un ensemble récepteur des signaux réfléchis. Ces ensembles utilisent quatre directions d'émission et de réception des signaux ultrasoniques : vers la proue, la poupe, babord et tribord. L'analyse et la combinaison des fréquences émises et reçues permettent le calcul et l'enregistrement de la vitesse longitudinale et la vitesse de dérive à la poupe et à la proue, des distances parcourues ainsi que de la position.

Ce sonar peut également être utilisé avec le système de navigation par satellite qui lui fournit à intervalles réguliers un point précis sans qu'il soit nécessaire de revenir se caler à terre.

B. Les systèmes à ondes entretenues

Les systèmes à ondes entretenues sont les plus utilisés. Ils définissent des réseaux hyperboliques, dont les foyers sont des émetteurs radioélectriques, placés en général sur la côte et écartés de plusieurs dizaines de kilomètres. Deux émetteurs fournissent un premier réseau de coordonnées, sur lequel la lecture d'un phasemètre donne un premier lieu géométrique de la position du navire, deux autres émetteurs donnent un second réseau, d'où, par intersections, la position cherchée. En échange d'une mise en oeuvre relativement lourde, on assure jour et nuit la navigation d'un nombre illimité de bateaux. Nous décrivons succinctement le Decca et le Toran.

1. Le Decca

Le Decca comprend trois réseaux constitués par une station centrale et trois stations asservies disposées en étoile autour de la centrale. Il utilise une gamme de fréquence assez complexe, toutes multiples d'une fréquence de base. La largeur

d'un chenal (distance entre deux hyperboles successives) est de l'ordre de 500 mètres sur la ligne de base. Des chaînes fixes, représentant des installations considérables couvrent presque toute l'Europe et les mers qui l'entourent (Méditerranée exclue), le golfe Persique, les côtes orientales du Canada. Des cartes ont été établies sur lesquelles figurent les trois réseaux d'hyperboles.

Le Decca Hi-Fix est une version légère du Decca dont la mise en oeuvre facile peut satisfaire le géophysicien. D'une portée de 100 à 150 km, sa précision est nettement supérieure à celle du Decca normal, puisque la largeur d'un chenal est de l'ordre de 100 mètres sur la ligne des foyers.

2. Le Toran

A l'inverse du Decca d'abord conçu pour les navigateurs, le Toran a été pendant une dizaine d'années, l'apanage exclusif des géophysiciens français. Système hyperbolique à couples indépendants il permet d'utiliser des chaînes de 2, 3, et 4 couples..., faculté parfois mise à profit pour contrôler la précision.

Dans ce système, on mesure la phase en basse fréquence entre les ondes issues de deux foyers. Cette mesure est exempte des instabilités de fréquence et de phase des émetteurs grâce à l'introduction dans le circuit d'une phase de référence émise par un émetteur supplémentaire installé à terre, généralement à proximité de l'un des foyers. Il en découle que la phase mesurée est rigoureusement proportionnelle à la différence des distances du mobile aux deux foyers, ce qui dispense de tout dispositif de synchronisation entre ceux-ci. On obtient ainsi la stabilité maximale et par conséquent la fidélité maximale.

La longueur d'onde est très voisine de 150 m, la largeur d'un chenal sur la ligne des foyers et entre ceux-ci étant alors de 75 m. Les phasemètres permettent de lire le centième de phase; la sensibilité est, dans ce cas, de 75 cm et, dans les zones favorables d'une chaîne, l'erreur absolue sur la position d'un point peut rester inférieure à 2 ou 3 m si les constantes de cette chaîne ont été parfaitement définies lors de sa mise en service. Des études systématiques faites dans l'océan Atlantique ont montré qu'à 400 km des côtes l'erreur probable restait de l'ordre de 10 mètres.

La portée varie en fonction d'une gamme de puissances et d'antennes assez variée. On dispose, soit d'un matériel léger alimenté par batteries mais de portée inférieure à 100 km, soit d'un matériel plus puissant, avec antennes de 30 m et sources d'énergie autonomes, garantissant des portées de l'ordre de 300-400 km, des solutions intermédiaires étant possibles.

Comme les émetteurs sont entièrement transistorisés, l'encombrement et le poids du matériel sont très réduits : l'équipement se transporte dans le coffre d'une voiture ou par hélicoptère. L'installation d'une station ne demande guère plus d'une heure à deux techniciens. Son fonctionnement est automatique.

LE LEVER DE LA CARTE BATHYMETRIQUE

Pour réaliser la carte bathymétrique, il faut faire un sondage à l'endroit repéré, pour déterminer la distance du fond à la surface.

Les navigateurs circumterrestres ont très rapidement tenté d'utiliser le sondage au plomb pour mesurer les profondeurs des océans, ces abîmes supposés sans fond par Aristote. Le premier essai semble avoir été fait en 1521 par Magellan. Il fila une très grande ligne sans atteindre le fond. Bien plus tard, Ross, au cours du célèbre voyage de l'Erebus et de la Terror, filait encore 8 600 brasses (16 583 m) sans toucher le fond.

La raison de ces insuccès est simple. Sous l'effet des courants marins, les lignes se lovent en courbes dont l'importance est inconnue ; elles peuvent même se pelotonner. En outre, le moment où le poids a touché le fond ne peut être facilement saisi et l'on a dû souvent filer beaucoup plus de ligne qu'il n'était nécessaire.

De nombreux autres dispositifs plus ou moins astucieux ont été essayés au cours des âges tel que "l'explorateur des abysses" (1425), le sondeur "à poids perdu" de Brooke (1895) avant que l'on arrive à des résultats plus précis avec Pierre Marti en 1919 qui réalisa un sondeur constitué d'un fusil et d'un microphone lié à un oscillographe, ce qui permettait de mesurer le temps entre le départ de la balle et la réception de son écho sur le microphone.

Actuellement seuls les sondages ultra-sonores sont utilisés.

Le fonctionnement d'un écho-sondeur à ultra-sons peut être résumé de la façon suivante : un dispositif de contact commandé par un moteur tournant à une vitesse constante, donne à des intervalles déterminés qui varient avec le champ de sondage, des impulsions de départ. Ces impulsions sont synchronisées avec la rotation du dispositif inscripteur et se transforment dans un générateur, en impulsions émettrices de fréquence 30 kilocycles. Le dispositif qui doit effectuer la transformation de l'énergie électrique de l'impulsion en énergie acoustique ultra-sonore fonctionne suivant le principe de la magnétostriktion. La lecture est du type solo :

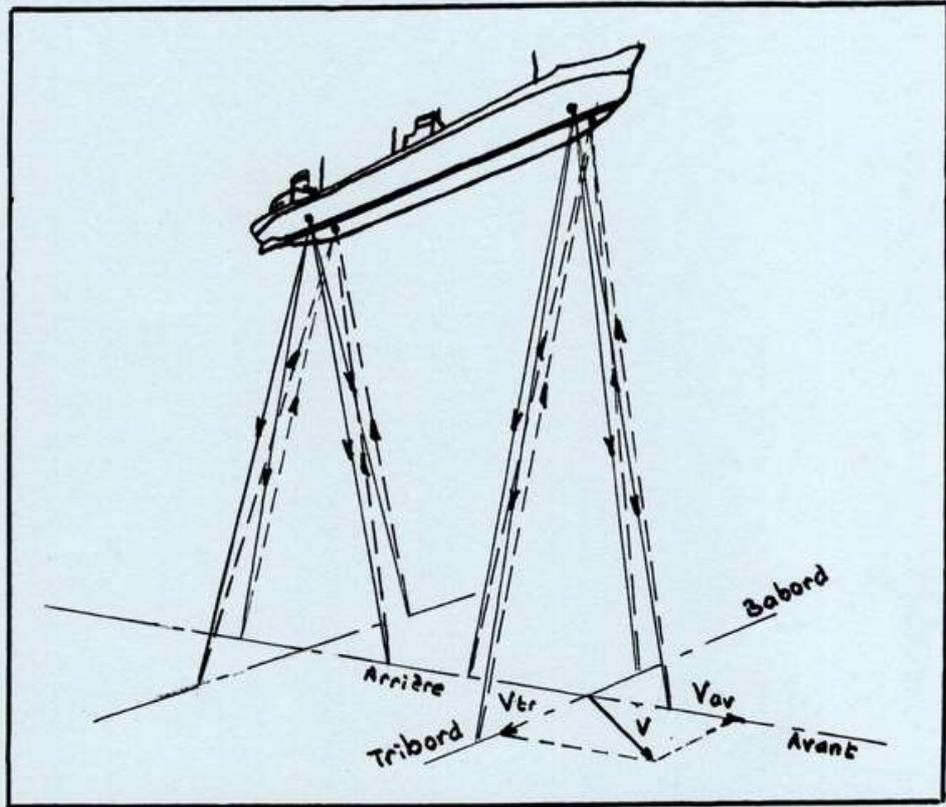


Fig 6: Schéma de fonctionnement du Sonnar à effet Doppler.

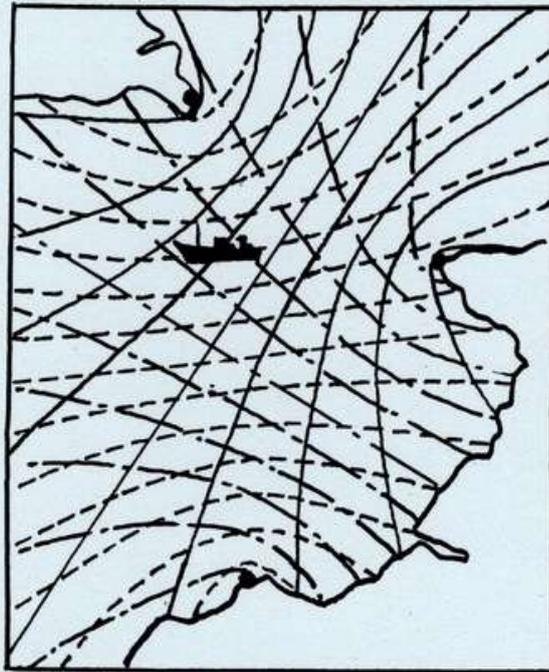


Fig 7 Réseau Toran à trois couples.

un seul bloc de lamelles de nickel fait à la fois fonction d'émetteur et de récepteur. L'impulsion sonore dirigée vers le fond est renvoyée sous forme d'écho par le sol, et après avoir été captée par l'antenne est transformée en énergie électrique, amplifiée et enregistrée sur papier.

L'enregistrement de l'écho du fond est caractérisé par une ligne continue bien marquée. Cette ligne est formée de l'enregistrement des échos avec leur profondeur exacte et reproduit fidèlement le profil du fond sous-marin se trouvant sous le navire.

La ligne zéro correspond à l'enregistrement de l'émission de l'impulsion d'ultra-sons et indique l'emplacement de l'antenne fixée sous la coque.

Actuellement les océanographes complètent les données bathymétriques par des relevés effectués avec des sondeurs latéraux, qui dessinent d'une façon précise les anomalies topographiques du fond marin.

La méthode consiste à traîner en profondeur un "poisson" renfermant un émetteur et un récepteur. Le sonar de l'I.F.P par exemple a les caractéristiques suivantes:

- longueur 4,30 m.
- envergure 1,80 m.
- poids 650 kg.
- fréquence d'émission 35 KHz
- puissance électrique 3,5 KW

Une onde à fréquence élevée est émise d'une façon continue; celle-ci se réfléchit sur tout objet reposant sur le fond. Captée par le récepteur elle est amplifiée et enregistrée graphiquement.

On différencie facilement les zones à affleurement rocheux des zones de vases ou de sable, ce qui permet de tracer avec plus ou moins de précision les contours de la roche affleurante et de compléter avantageusement toute carte bathymétrique.

Disons pour conclure, qu'il est maintenant possible d'utiliser sondeur, sonar latéral et appareil de mesure de vitesse simultanément et de traiter les informations directement dans un ordinateur, qui recevant également les paramètres de position du navire, pourra tracer directement la carte morphologique du fond de la mer.

Cette connaissance fondamentale du fond des océans a été ces 10 dernières années un des éléments prédominants des géologues modernes pour élaborer des théories de plus en plus détaillées sur la formation de la terre, et en particulier pour faire admettre généralement la théorie de la dérive des continents.

La Prospection en Mer

LES PROCÉDÉS GÉOPHYSIQUES

L'exploitation du fond des océans est tributaire de la prospection géophysique. D'une part la nappe d'eau interdit les observations géologiques directes, et d'autre part le coût des forages, même peu profonds, est très élevé.

Trois procédés géophysiques sont actuellement utilisés en prospection marine:

- La méthode gravimétrique qui est peu utilisée.
- L'aèromagnétisme qui permet des reconnaissances très rapides et peu coûteuses et qui a fait, il y a quelques années, des progrès importants grâce à l'appareil à " pompage optique ".
- La méthode sismique qui est la plus largement utilisée, étant donné que son prix de revient est environ cinq fois plus faible qu'à terre.

C'est grâce à l'Industrie Pétrolière qui a su les adapter, que les techniques de la géophysique sont maintenant applicables en mer.

Mais il y a encore quelques facteurs limitatifs: les techniques, elles-mêmes, ne sont pas encore appropriées à toutes les profondeurs, et les coûts élevés de l'exploitation ne sont justifiés que lorsqu'il s'agit de la recherche de produits de valeur pouvant soutenir la concurrence du marché international, ou encore de minéraux stratégiques.

Ainsi s'est-on employé surtout à la recherche de gisements en eau peu profonde, sur le plateau ou le talus continental.

Les prospections géophysiques apportent des précisions et des données complémentaires aux hypothèses géologiques qui sont fondées sur l'analyse des affleurements rocheux. Elles remplacent ces dernières dans les zones sans affleurements.

Notons également qu'à côté de leur intérêt pour la prospection minière et pétrolière, les méthodes géophysiques peuvent être appliquées à différents domaines tels que le Génie Civil (constructions de ports et tunnels, recherche structurale pour l'implantation d'usines marémotrices), et l'Hydrogéologie (études des résurgences d'eau douce situées au large, par l'enregistrement continu et simultané de la résistivité et de la température de l'eau de mer à des profondeurs convenables).

I La méthode gravimétrique.

La gravimétrie terrestre a pris son plein essor avec la mise au point des gravimètres, sorte de pesons à ressorts très sensibles, qui ont avantageusement remplacé la balance d'Eötvös.

Son principe est basé sur le fait qu'une répartition irrégulière des roches dans le sous-sol se répercute sur l'allure du champ de pesanteur. Les anomalies gravimétriques varient comme l'inverse du carré des distances, aussi sont-elles assez étalées et peu intenses en général. L'unité est le milligal (10^{-3} c.g.s) et le gravimètre WORDEN qui est le plus utilisé a une précision de 0,02 milligal.

Une telle prospection cherche à établir une carte des anomalies de la pesanteur, donc des écarts du champ réel par rapport à un champ théorique. Il faut donc ramener les mesures à une surface de référence et introduire des corrections dues aux formes topographiques de la zone étudiée; 1 mètre introduit une correction de 0,2 milligal environ.

On comprendra donc la précision que requiert une campagne gravimétrique et pourquoi elle est à exclure pour les reliefs très tourmentés.

Il est donc normal que l'on ait pensé adapter la gravimétrie aux masses du plateau continental qui présente généralement une surface remarquablement plate.

Les premières campagnes de gravimétrie en mer furent exécutées de 1923 à 1938 par VENING-MEINESZ. Celui-ci utilisait un submersible qui reposait sur le fond des mers pour les mesures et obtenait une précision de 2 milligals alors que le champ de la pesanteur a une intensité moyenne de 980 gals. Cette précision médiocre a conduit à repenser le problème.

Pour les faibles profondeurs (3 à 5 mètres), on utilise un gravimètre mis en station sur un trépied.

Au dessus de 5 mètres, il devient nécessaire d'employer un gravimètre immergé posé sur le sol marin, et qui est télécommandé à partir d'un bateau. L'appareil doit être enfermé dans une cloche étanche en bronze, solidaire d'une large embase pour assurer sa stabilité.

Par bonne mer il est possible de faire quatre stations à l'heure, avec une erreur quadratique moyenne sur g de l'ordre de 0,05 milligal, ce qui est comparable aux résultats terrestres.

Malheureusement la gravimétrie marine est beaucoup trop sensible au mauvais temps et reste considérée comme un complément marginal de la gravimétrie terrestre.

Son coût est plusieurs fois celui de la gravimétrie terrestre.

Notons que depuis 1957 GRAF-ASKANIA en Europe et LA COSTE-ROMBERG aux USA réalisent des campagnes gravimétriques à bord d'un appareil installé sur le pont d'un bateau. Ils espèrent ainsi compenser par un prix de revient assez bas la faible précision des mesures.

La gravimétrie reste néanmoins très peu utilisée.

II La prospection magnétique.

La prospection magnétique a pour but d'étudier les variations de la composante verticale du champ magnétique terrestre. Les anomalies du champ magnétique ont en effet l'avantage de coiffer très sensiblement la tête des gîtes recherchés.

Au sol les mesures sont effectuées à l'aide d'une balance de SCHMIDT. Ces balances modernes à aimant mobile peuvent être rendues pratiquement insensibles aux variations de la température et ont une précision de 2 à 3 gammas ($3 \cdot 10^{-5}$ oerstedt), ce qui est grandement suffisant. Les anomalies magnétiques varient comme l'inverse du cube des distances et il en résulte que ces anomalies sont assez intenses mais plutôt étroites et que le magnétomètre sera très sensible aux influences superficielles.

Ces mesures sont d'une exécution lente et il ne peut être question d'effectuer au sol une reconnaissance générale de quelque importance. Les mesures au sol sont exécutées pour les études de détail des anomalies mises en évidence par les reconnaissances magnétiques aériennes, qui sont évidemment directement applicables pour la prospection marine.

Elles permettent en particulier de déterminer rapidement l'épaisseur approximative des couches sédimentaires qui recouvrent le substratum cristallin du fond marin et de délimiter les bassins sédimentaires et leurs structures générales.

Depuis 1945 le magnétomètre GULF dit "à saturation" ou "à noyau saturé" permet d'effectuer des mesures avec une précision de 1 gamma, alors que le champ magnétique terrestre a une valeur de l'ordre de 50 000 gammas.

L'appareil est tiré derrière l'avion au bout d'un câble. On peut ainsi lever 100 à 150 km de profils continus à l'heure soit 500 à 1 000 km par jour.

Un nouvel appareil dit "à pompage optique" d'invention française a été mis au point en 1962 par le département physique appliquée de la Compagnie Générale de TSF en collaboration avec les spécialistes de la Compagnie Générale de Géophysique. Son principe repose sur la mesure de la fréquence de résonance magnétique de la vapeur de césium, qui est proportionnelle au champ dans lequel est placée cette vapeur. La précision obtenue est de 0,03 gamma. Cet appareil conduit à des améliorations considérables de l'interprétation des mesures magnétiques.

On peut en effet tracer des cartes en courbes isogammes avec un intervalle de 0,5 gamma, soit 5 à 10 fois mieux que ce que l'on peut réaliser avec d'autres instruments. Après traitement IBM de ces cartes, on détermine avec grande précision les isobathes du toit du socle, des niveaux magnétiques sédimentaires et des principales lignes structurales du socle.

L'aéromagnétisme a un prix de revient en mer identique à celui obtenu sur terre. Il est de l'ordre de 30 à 40 F par km.

Depuis peu, le magnétomètre est adaptable à un "poisson" tiré par un bateau à 200 ou 300 m de celui-ci. L'enregistrement se fait graphiquement et sur équipement digitalisé.

III La prospection sismique

Les méthodes sismiques classiques étudient la propagation des ondes élastiques produites par une explosion ou des chocs mécaniques. A chaque surface de discontinuité, entre deux rochers ayant une impédance acoustique différente, il y a création de phénomènes complexes : réflexion, réfraction, production d'ondes transversales, d'ondes lentes de Love et de Rayleigh. Les ondes les plus rapides sont les ondes longitudinales et sont d'ailleurs celles qui intéressent essentiellement les méthodes sismiques.

Sur terre on emploie soit la sismique réflexion qui étudie les phénomènes à l'aide de sismographes placés à proximité du point d'explosion, soit la sismique réfraction qui les étudie à grande distance. Ces deux moyens représentent à terre plus de 90 % des dépenses engagées pour la prospection géophysique.

L'extension au domaine marin de la prospection sismique n'est pas récente. Depuis 1944 on décompte aux USA

un total de 3800 mois-équipe sismique marine, représentant 15 à 30 % de la longueur des profils exécutés à terre.

En zone franc, c'est en 1953 qu'ont eu lieu au Gabon les débuts de la sismique fluviale. Ils ont été suivis par des études en eaux peu profondes sur les côtes africaines, et se sont étendus par la suite à la Nouvelle-Calédonie, au Congo, à la Mauritanie, au golfe de Gascogne et au golfe du Lion.

Pourtant, la sismique marine est restée longtemps coûteuse et difficile à mettre en oeuvre. Ce n'est que lorsqu'elle a été particulièrement bien adaptée qu'elle est devenue ce qu'elle est maintenant: le seul moyen d'études détaillées des fonds marins.

Suivent les modes d'émissions des ondes employés (écho-sondeur vertical, pulseur électrodynamique, pulseur à étincelle, canon à gaz ou charge de dynamite), on peut en effet obtenir différentes coupes sur lesquelles se lisent:

- la profondeur de l'eau
- l'épaisseur des boues, la position des fonds rocheux et des accidents de surface, la répartition des affleurements.
- le détail très fin des premières couches sédimentaires
- les formes des séries les plus profondes.

Pour cela, la fréquence des diverses émissions varie de 12 000 à 10 hertzs.

Nous développerons plus particulièrement ici deux procédés mettant en oeuvre les explosifs, et une technique d'écho-sondage.

A. Sismique Classique

La sismique classique est celle qui met en oeuvre les explosifs. Elle permet les investigations des plus grandes profondeurs (7 000 m.). C'est elle qui a ouvert la voie de la sismique en mer.

1. Le matériel

a) Les sismographes

Depuis que l'on a renoncé au traînage de la ligne sismographique sur le fond de la mer, les détecteurs fonctionnent en suspension dans le milieu liquide et sont donc des organes sensibles aux variations de pression.

Trois principes différents peuvent être utilisés:

- Le détecteur est constitué de quartz ou de céramique au titanate de baryum, corps piézoélectriques qui développent des charges électriques proportionnelles aux pressions auxquelles ils sont soumis.

- La magnétostriction, qui est un procédé permettant d'obtenir des variations d'induction électromagnétique dans un barreau en alliage de nickel ou en nickel, proportionnelles aux contraintes qu'il supporte.

- La déformation d'un diaphragme qui est lié à une bobine mobile dans un champ électrique ou incorporé à un circuit magnétique dont il fait varier la distance en agissant sur les entrefers.

b) La ligne sismographique

Ces différents détecteurs, réunis en une vingtaine de groupes en général, sont fixés à un cable tracteur, dit ligne sismographique. Selon le mode de flottabilité de cet ensemble, on distingue plusieurs modèles:

- la ligne suspendue à des bouées, qui doivent être en nombre suffisant pour éviter la formation d'arceaux.

- la ligne semi-flottante où les flotteurs sont attachés directement à la ligne.

- la ligne immergée ou neutre où les détecteurs et la ligne sont contenus dans un tuyau en plastique rempli d'un produit hydrocarburé de manière à obtenir une densité globale à peine supérieure à celle de l'eau de mer. Un système stabilisateur assure son maintien à une profondeur de 3 à 5 mètres.

Ce dernier modèle est incontestablement préférable: en effet, la ligne neutre glisse bien, peut être maintenue parfaitement immobile au moment de l'explosion et ne subit ni les effets parasites de la traction, ni l'agitation superficielle due aux petites vagues. D'autre part le tir peut avoir lieu sans stopper le bateau.

Elle n'est malheureusement pas encore très répandue étant donné les difficultés de sa mise au point.

La longueur des lignes varie de 400 à 2 000 m. La tendance est à l'allongement, ce qui permet d'accroître le rendement et de mieux distinguer les réflexions réelles des réflexions multiples.

c) Le laboratoire

L'appareillage embarqué sur le bateau laboratoire diffère peu de celui qui est utilisé à terre. Seulement, la vitesse d'avancement et la cadence des tirs (un tir toutes les

3 à 5 minutes) imposent une grande mécanisation pour dépouiller et corriger les documents en vue d'une interprétation provisoire.

d) Le bateau boutefeu

La soute à explosifs du bateau boutefeu est évidemment conforme à la sécurité minière relative au transport des explosifs. La plage arrière, où sont manipulés les explosifs, est entourée d'une cage de Faraday isolant cet espace des émissions radio.

La charge est suspendue à un sachet de polyéthylène jouant le rôle de flotteur.

La nature de cette charge est essentiellement variable. Elle dépend du but recherché et de l'épaisseur de la masse d'eau. Des charges de quelques dizaines de kilogrammes de tolite sont courantes.

Les bateaux procèdent par sorties de 10 à 15 jours. Les tempêtes ou les fortes houles interdisent toute activité. Ils jaugent de 200 à 1 000 tonneaux, filent de 10 à 15 noeuds et transportent un équipage de 9 à 15 techniciens, pour une puissance de 150 à 500 CV.

2. Le mode opératoire

Pour les équipes à deux bateaux, le mode opératoire est le suivant:

Le bateau laboratoire remorque la ligne sismographique, et le bateau boutefeu suit au milieu du dispositif dans le cas de la sismique réflexion qui est la plus usitée. Ce convoi progresse à la vitesse moyenne de 5 km/h. avec un tir tous les 400 mètres. Quand la ligne n'est pas une ligne neutre, le topographe commande l'arrêt du laboratoire avant le tir, les sismographes prennent leur position normale à 3 ou 5 mètres de profondeur. Le boutefeu largue sa charge, s'écarte, tire, et le convoi repart.

Certaines équipes ont tendance actuellement à n'utiliser qu'un seul bateau. Ce mode opératoire interdit la sismique réfraction. Dans ce cas, la charge est munie d'un anneau qui glisse sur un câble parallèle à la ligne sismographique, et la mise à feu se produit lorsque la charge atteint le milieu de cette ligne. Les opérations sont plus centralisées, plus rapides et d'un coût sensiblement plus bas. Par contre la sécurité peut être considérée comme moins bonne.

Pour augmenter le rapport signal/bruit, on a d'abord augmenté le nombre de sismographes. Mais il devenait alors difficile de réaliser l'alignement parfait des détecteurs qui est nécessaire en sismographie marine. On préfère actuellement effectuer une couverture multiple, procédé qui consiste à faire un grand nombre de tirs sur le même profil. On obtient ainsi plusieurs coupes sismiques qui correspondent chacune à une certaine combinaison point de tirs-sismographes. La comparaison entre ces coupes et leur composition conduit à de bons résultats.

3. Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats est plus facile qu'à terre. Il n'y a pas d'ondes parasites à prendre en considération, ni de corrections superficielles à apporter, donc les documents sont plus purs.

Par contre, l'énergie sismique engendrée par l'explosion se réfléchit alternativement sur les deux interfaces à fort coefficient de réflexion, eau-air et eau-substratum. Ce phénomène introduit des perturbations que l'on peut filtrer lorsque l'on connaît l'épaisseur de la couche d'eau.

De la même manière, il faut tenir compte de l'obliquité que les forts courants font subir à la ligne sismographique.

Après une première analyse à bord du navire, les enregistrements sont remis à un central sismique où ils sont filtrés, corrigés, présentés sous forme de coupes à aire ou densité variable. En dehors des paramètres de filtrage dus à la couche d'eau, le traitement de l'information en sismique marine ne présente aucune particularité.

B. Le Flexotir

Malgré ces incontestables avantages dont le moindre n'est pas son prix de revient (400 à 800 F du kilomètre, soit 5 à 10 fois moins qu'à terre du fait qu'il n'y a pas d'opérations de forage), la sismique classique présente deux inconvénients:

- les explosions peuvent engendrer des dégâts à la faune marine quand les charges sont importantes. L'eau propageant très bien les vibrations, un kilogramme de tolite est en effet dangereux pour un plongeur à 300 m.

Il suffit néanmoins d'éviter les tirs pendant les périodes de frai et d'équiper les bateaux de sondeurs ASTIC d'un rayon de 700 à 1 500 m. permettant de détecter les bancs

de poissons, pour neutraliser ce danger, d'autant plus que les explosions se font à un niveau supérieur à celui auquel se tiennent la plupart des espèces.

Malgré tout, la colonne d'eau soulevée à chaque explosion peut avoir sur les pêcheurs un effet psychologique non négligeable.

- la pulsation de la bulle de gaz créée par l'explosion peut perturber sérieusement l'enregistrement. En effet, cette bulle se dilate et communique à l'eau environnante une énergie cinétique centrifuge. Etant donné l'inertie de cette masse liquide, le volume de la bulle dépasse la valeur correspondant à la pression hydrostatique, d'où une série de contractions et dilatations engendrant des émissions d'énergie brouillant les enregistrements.

C'est pourquoi l'I.F.P et la C.G.G ont mis au point le FLEXOTIR qui est de plus en plus utilisé par les compagnies françaises en métropole et à l'étranger.

Le procédé Flexotir consiste à faire détoner la charge au centre d'un écran anti-bulles constitué par une sphère d'acier d'environ 60 cm. de diamètre, perforée de trous. Cette sphère est connectée au navire de géophysique par l'intermédiaire d'un tube flexible par lequel descendent les charges. La mise à feu est électrique. Les débris de la cartouche sont évacués par les perforations.

On arrive ainsi à des cadences de tir de plus de 200 coups à l'heure. L'efficacité est telle que des charges d'une centaine de grammes, tout en sauvegardant la faune marine, permettent l'exploration des couches profondes qui nécessiteraient des charges de 20 kg. en sismique classique.

C. La Sismique réflexion continue

La sismique réflexion continue est un procédé qui ne met pas en oeuvre les explosifs. C'est un moyen rapide et économique pour obtenir un grand nombre d'informations sur les sédiments marins qui a l'avantage de simplifier la présentation des résultats.

L'enregistrement est essentiellement une coupe montrant le fond marin et les faciès sédimentaires sous-jacents, en faisant apparaître clairement les dépôts alluviaux.

La méthode a été élaborée à partir des techniques de l'échosondage. Elle consiste à traîner derrière le bateau, en dehors du sillage de ce dernier, l'émetteur et un récepteur électro-acoustique classique.

L'émetteur, appareil simple et efficace, utilise comme source de bruit une explosion simulée ayant la forme d'une étincelle à haut voltage se produisant entre plusieurs électrodes et le châssis formant masse. L'équipement émetteur comprend des capacités en parallèle que l'on charge en utilisant un courant alternatif préalablement redressé. La décharge commandée par un dispositif déclencheur de l'enregistreur se fait toutes les secondes environ.

La tension de décharge est de 10.000 Volts.

Comme toujours, les ondes sont captées par l'hydrophone récepteur, filtrées et amplifiées correctement, pour être enregistrées sur bande magnétique.

Voilà donc ce qui peut être dit au sujet de la prospection géophysique. Il est évident que celle-ci est amenée à faire des progrès encore considérables, ne serait-ce que par l'emploi qui tend à se généraliser des calculateurs électroniques pour le traitement des informations et le développement de techniques particulières. Par exemple, la prospection radiométrique permet déjà la détection directe de certains minéraux superficiels par mesure du rayonnement gamma au fond de la mer au moyen d'un détecteur à scintillation.

LES PROCÉDES MECANIQUES

Après les reconnaissances géophysiques, il faut se faire une idée la plus exacte possible de la nature des fonds marins et de leur teneur en éventuelles concentrations minérales. Des centaines de procédés de prélèvements existent, mais il y a en fait deux options fondamentales:

- reconnaître la surface des fonds par un échantillonnage superficiel.
- reconnaître la nature du socle par carottages et forages.

I Échantillonnage superficiel

Pour la reconnaissance du fond des mers, on peut utiliser des dragues sédimentologiques à filins que l'on traîne sur le fond ou des bennes preneuses qui ont l'avantage de donner un prélèvement ponctuel.

Ces bennes peuvent être équipées d'une caméra de télévision ou d'un appareil photographique qui prendront automatiquement une photo à environ 4 mètres du lieu de prélèvement de l'échantillon.

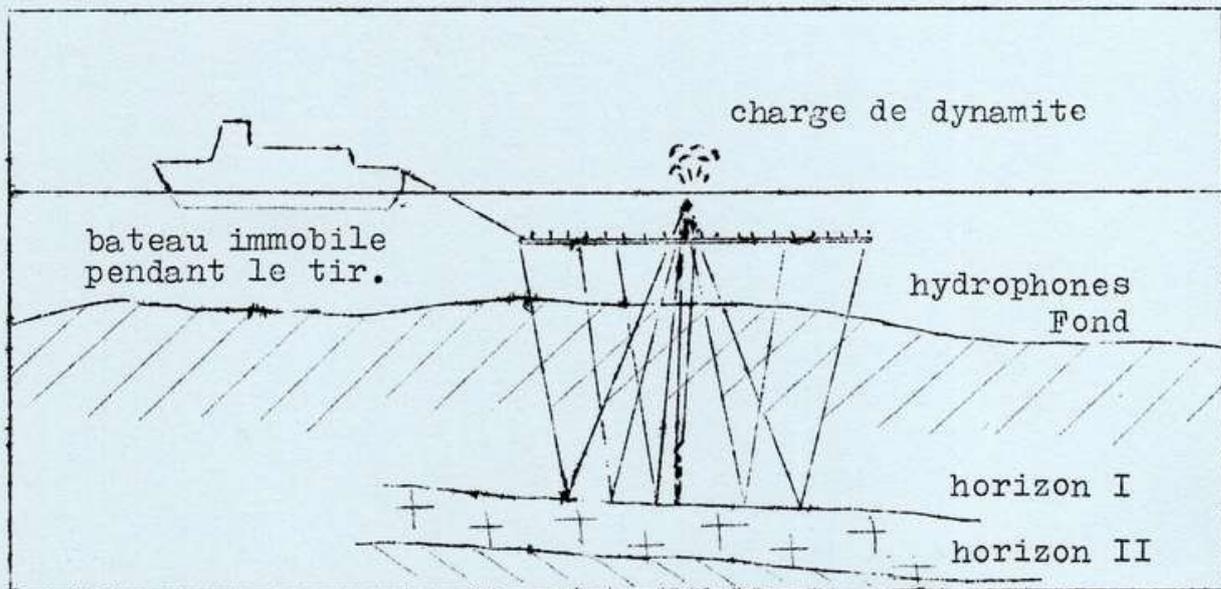


fig: 8. Schéma de principe de la sismique réflexion.

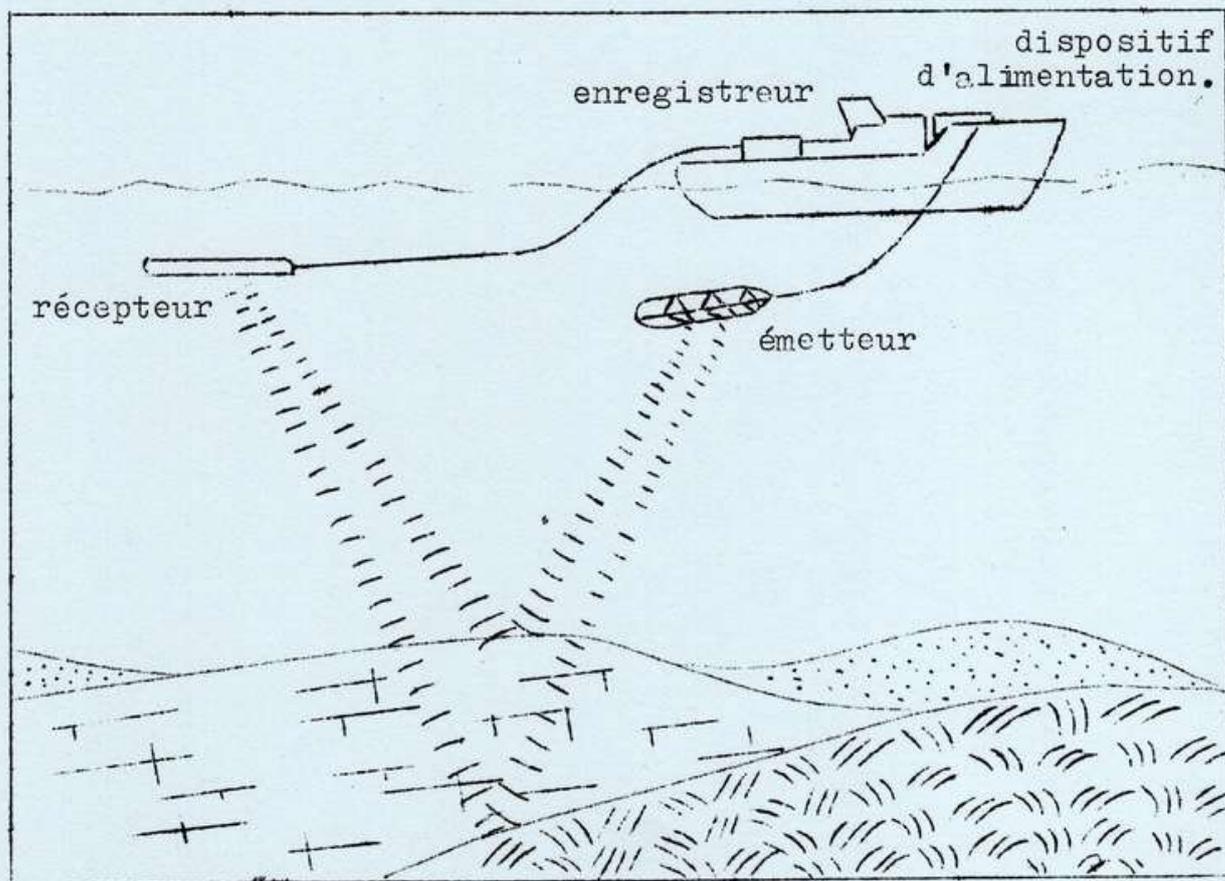


fig: 9. Schéma de principe de la sismique réflexion continue.

Elles sont suspendues par un câble qui peut être éventuellement le conducteur de l'énergie qui leur est nécessaire, au bateau laboratoire.

Dans les champs de nodules, on peut se contenter de reconnaissances par procédés optiques tels que la photographie ou la télévision.

A coté de ces bennes il existe quelques préleveurs automatiques d'échantillons, et l'on assiste au début de l'utilisation des sous-marins ou d'engins océanographiques autonomes: à la fin de 1968 en effet, on recensait environ 35 véhicules en opération ou en construction. La perte de la bombe H au sud de l'Espagne a prouvé la valeur du submersible de grande profondeur " l'ALVIN ", construit par la GENERAL MILLS, dans la localisation et la découverte d'objets sur le fond de la mer.

Ces engins équipés de télémanipulateurs pourront permettre d'obtenir une sélectivité de plus en plus grande dans les échantillonnages.

L'I.F.P à ce sujet a mis au point le " TELENAUTE " qui a pour principaux objectifs d'observer à l'aide d'une caméra de télévision, de cinématographier et d'effectuer des opérations simples de télémanipulation. La propulsion est assurée par 3 moteurs hydrauliques (2 pour les déplacements horizontaux, 1 pour les déplacements verticaux). Il est relié par un câble multiconducteur au navire de surface. A son sommet il comporte une centaine de boules en matière plastique " Nokalon " servant de flotteurs et qui lui donnent dans l'eau un poids apparent nul. Son poids est de 950 kg. pour des dimensions de 3,5 x 1,50 x 1,45 m. Chaque moteur a une puissance de 3,5 CV. La profondeur maximum d'immersion est de 1 000 m.

Mais c'est encore les américains qui ont fait les plus gros investissements en ce domaine. Citons par exemple un engin nommé "l'ALUMINAUT" qui est capable d'atteindre une profondeur de 5 000 m. et d'emporter plus de 2 tonnes d'appareils scientifiques. Il est muni de deux puissants bras de télémanipulation.

Ces appareils sont néanmoins plus destinés à l'Océanographie en général et au contrôle des opérations pétrolières qu'à la prospection marine.

II Carottages et sondages

Pour prélever des échantillons profonds, de très nombreux systèmes de carottiers océanographiques sont disponibles selon la nature des sédiments à traverser.

On utilise en effet:

- des carottiers à gravité.
- des carottiers à piston. (Kullenberg)
- des vibrocarottiers électriques ou hydrauliques.

Ces différents dispositifs sont en liaison souple avec le bateau.

L'électro-carottier ECSM mis au point par l'I.F.P et le groupe ELF-ERAP est un appareil de 6 tonnes entièrement télécommandé depuis la surface. Il permet le prélèvement à partir du fond de la mer d'un échantillon de 1 mètre de longueur et de 90 mm. de diamètre, à la cote désirée, jusqu'à une profondeur de 40 m. dans le sol. Il peut opérer sous une hauteur d'eau maximum de 300 mètres et ne nécessite pas un navire spécialisé. Le carottage s'effectue à l'aide d'une électro-foreuse reliée par une conduite flexible au bâti support reposant sur le fond de la mer.

Un autre type de carottier, employé en particulier par le B.R.C.M utilise uniquement l'énergie cinétique due à la gravité. Il permet de remonter une carotte d'environ 40 cm. de socle ou de sédiments. Cet appareil simple et robuste rend possible la détermination, ou plus généralement la vérification de leur nature.

Ces différents procédés de carottage ne permettent néanmoins que des profondeurs d'investigation relativement faibles puisque l'on ne peut dépasser quelques dizaines de mètres dans les sédiments. Pour les sondages plus profonds il faut utiliser des bateaux ou des plateformes de sondage où la colonne de tubage est pratiquement solidaire de son support. Ce sont les pétroliers qui ont mis au point les techniques de sondage en mer, et on assiste actuellement à une multiplication des moyens en ce domaine, souvent considérables.

Un chapitre spécial sera consacré au forage dans l'exploitation des hydrocarbures en mer.

Il faut tout de même savoir qu'il est plus facile d'exécuter un forage pétrolier dans le dur et de traverser quelques centaines ou milliers de mètres de roches que d'effectuer un sondage minier dans quelques dizaines de mètres de sédiments non consolidés et de nature variée (vases, sables, graviers) en évitant les sur ou sous récupérations.

Le problème de la représentativité des sondages dans le calcul des teneurs, c'est à dire le respect des concentrations " in situ " est en effet le problème majeur de la recherche minière en mer.

L'exploitation sous-marine des hydrocarbures

C'est l'exploitation pétrolière qui la première s'est développée dans le domaine marin.

Le pétrole joue un grand rôle comme source d'énergie dans notre monde moderne. La consommation mondiale d'énergie représente en effet 5 milliards de tonnes d'équivalent-charbon, alors qu'elle n'était que d'un milliard de tonnes au début du siècle. Elle augmente actuellement de 5% par an. La part des hydrocarbures est elle sans cesse accrue. En 1925 le pétrole ne contribuait que pour 25% au ravitaillement énergétique. Ce chiffre est passé à 50% en 1965 et atteindra 65% en 1980. La consommation de 100 millions de tonnes en 1925 a atteint 1 760 millions de tonnes en 1967. Elle double tous les dix ans. La quantité de pétrole qui doit être produite dans les dix années à venir est sensiblement égale à la production cumulée depuis un siècle.

Nous avons vu précédemment quel était l'état des réserves mondiales, et les difficultés qu'avaient les Sociétés Pétrolières à maintenir le rapport réserves sur consommation annuelle à un niveau acceptable. Partout dans le monde, chaque fois qu'il y a une chance de découvrir du pétrole ou du gaz, les pétroliers la saisissent quelles que soient à priori les difficultés d'exploitation. On comprendra donc l'engouement qu'ils manifestent depuis longtemps pour les possibilités offertes par les ressources sous-marines off shore.

En dehors de ces considérations statistiques, il peut y avoir d'autres mobiles qui justifient le développement de la recherche des hydrocarbures en mer, tel que, en particulier le raccourcissement des voies d'approvisionnement.

Dés 1894, en Californie, les premiers puits sous marins sont apparus. Il s'agissait en fait de puits forés sur la terre ferme qui ont été déviés vers la mer. Puis on construisit des îles ou des presqu'îles artificielles servant de plateformes de forage. Les expériences de forages marins tentées dans la même région en 1896 à partir d'appontements en bois furent par contre un échec, comme celles entreprises en 1923 dans les rivières cotières et les bras du Mississipi.

En mer ouverte, la première découverte a été faite au large de la Louisiane en 1938, dans le golfe du Mexique, sous une épaisseur d'eau très faible. Cependant, au Vénézuéla, les puits forés sous les eaux du lac Maracaïbo étaient déjà producteurs.

Mais ce n'est qu'après la deuxième guerre mondiale, à partir de 1945, que l'exploitation en mer a véritablement commencée puisque le premier puits producteur OFF SHORE est mis à jour en 1947 par SOCONY-MOBIL au large de la Louisiane.

L'exploration couvre actuellement la plus grande partie des plateaux continentaux, bien qu'en 1963, seuls le Golfe du Mexique, le Golfe Persique et la mer du Japon étaient largement prospectés et continuent d'être les zones des plus intenses activités.

On a en effet commencé les investigations dans les régions d'extension probable des gisements connus, ce qui demandait des hypothèses faciles et un peu d'audace technologique. La prospection des zones situées au large de bassins non encore reconnus comme productifs à terre, voire même au large de massifs cristallins, est plus récente. Il a fallu attendre pour cela les progrès de la géophysique qui ont montré le bien fondé de l'hypothèse de base qui consiste à prolonger, jusqu'à une grande distance des côtes, la géologie classique des continents.

LE DOMAINE EXPLOITABLE

Nous avons déjà dit que la dimension globale des plateaux continentaux était de l'ordre de 27,5 millions de km², soit 17,5% des terres émergées.

En fait, cette surface n'est pas totalement intéressante. Il y a comme à terre des régions présentant plus ou moins d'intérêt: certaines zones sont stériles. Sur ces 27,5 millions de km², il faut compter que seulement une fraction de 30% retiendra l'attention des explorateurs. Cela laisse malgré tout un domaine d'activité dont l'étendue explique bien l'effort d'investissement auquel nous assistons actuellement.

L'inventaire des zones d'exploitation ou de recherche pétrolière en mer est d'ailleurs très éloquent. Les pays actuellement les plus directement concernés, sont en effet les suivants:

Europe

Italie
Grande-Bretagne
Pays-Bas
Allemagne Fédérale
France
U-R-S-S

Moyen Orient

Iran
Arabie Séoudite
Koweït
Qatar
Bahrein
Abou Dhabi
Dubai
Libye

Amérique

Etats-Unis
Canada
Trinidad
Vénézuëla
Pérou
Chili
Guyanne

Afrique

Nigéria
Gabon
Congo-Brazzaville
Egypte

Extrême Orient

Japon
Brunéi
Malaysia
Australie
Pakistan

Il faut compter qu'une vingtaine de ces pays produisent maintenant des hydrocarbures venant de la mer, pour un total qui atteint 250 millions de tonnes par an. Près de la moitié de cette production provient du Lac Maracaïbo (120 millions de tonnes). 100 autres millions de tonnes proviennent du Golfe du Mexique et du Golfe Persique. Le reste est extrait en Afrique, Amérique du Sud, Japon et Californie.

Cette production représente en tout, environ 15% de la production totale du monde. Elle pourrait atteindre 25% en 1990.

La Mer du Nord, pour sa part suscite de grands espoirs. Elle offre à elle seule une surface de 575 000 km², par des profondeurs d'eau inférieures à 60 mètres, soit approximativement l'équivalent de la France. Après les découvertes de gisements de gaz naturel en Hollande, la prospection devient intensive dans cette partie du monde, et s'est matérialisée en 1968 par une vague de succès.

A coté du plateau continental, les grands fonds marins peuvent être aussi intéressants pour les pétroliers. Mais les expériences, donc les connaissances, en ce domaine sont encore peu nombreuses. S'il est possible en effet de forer sous des grandes hauteurs d'eau, il est pour le moment impossible d'installer des têtes de puits à de grandes profondeurs.

LES RESERVES

Un examen approfondi des augmentations des réserves des terres émergées montre qu'elles proviennent en majeure partie de la réévaluation des réserves déjà connues et non pas de nouvelles découvertes. L'exploration de nouvelles zones devient donc indispensable.

C'est pour celà que l'on a assisté ces dernières années à une explosion de la recherche en mer, d'autant plus que sur le continent l'obtention de nouveaux titres miniers est souvent difficile. D'autre part les législations relativement favorables en général et comme nous l'avons déjà dit, la proximité des marchés dans le cas de la Mer du Nord par exemple, augmentent encore l'intérêt de certaines zones marines.

Le total des réserves découvertes est de 70 Gt d'huile pour l'ensemble du monde. En tenant compte des réévaluations quasi automatiques, dues par exemple à l'augmentation de la récupération, aux prolongements des gisements connus et à la grands espoirs soulevés par les expériences américaines de mise en jeu de l'énergie nucléaire, on peut estimer que l'exploration pétrolière à jusqu'à présent mis en évidence 120 Gt d'huile.

En admettant une simple proportionnalité aux superficies, les perspectives de la recherche en mer représenteraient donc 20 Gt d'huile. Ce chiffre est vérifié par les résultats actuels: environ 17% des réserves mondiales reconnues appartiennent d'ores et déjà aux fonds marins.

Malgré tout, il est possible que le coût élevé des opérations marines rendra inexploitable certaines découvertes qui seraient commerciables à terre. En fait, cet élément aurait une importance assez réduite: des spéculations sur la taille des gisements font penser que ceux qui pourraient être inexploitable représentent moins de 20% du tonnage total.

En contre-partie, certaines caractéristiques géologiques comme l'augmentation générale des épaisseurs sédimentaires vers la mer sont plus favorables à la présence d'hydrocarbures que sur terre.

Nous nous sommes tenus pour le moment au domaine de l'exploitation des hydrocarbures du plateau continental. Mais l'immensité des fonds des océans laisse présager à l'avenir des possibilités importantes, que les progrès techniques constants et les besoins des générations futures matérialiseront rapidement.

Les résultats déjà obtenus sont en effet très prometteurs. Un sondage d'exploration effectué début 1968 par la JOIDES (Joint Océanography Institution's Deep Farth Sampling Program) dans le golfe du Mexique, sous plus de 3 500 mètres d'eau, a dû être arrêté après la traversée de 145 m. de sédiments, à la suite d'une très forte éruption de pétrole et de gaz, alors que d'après la prospection effectuée par sismique réfraction, la puissance du bassin sédimentaire de cette fosse a été évaluée à plus de 5 000 mètres.

Un potentiel pétrolier similaire semble exister dans les bassins crétacés sous-marins de la mer des Caraïbes, du bassin tertiaire au large des côtes du Vénézuéla Oriental, dans le Golge d'Oman et la mer Arabique, ou encore dans la mer de Chine Orientale où les fosses marines renferment des bassins crétacés ou tertiaires dont les sédiments atteignent plusieurs milliers de mètres de puissance.

Il faut bien en conclusion avouer, que personne ne peut dire actuellement ce que recèle réellement le sous sol marin. Certains parlent de 100 billions de mètres-cube. L'U-R-S-S a même annoncé un chiffre supérieur à 170 billions de m³.

LE FORAGE EN MER

Bien que précieuse, la géophysique ne fait qu'indiquer l'existence d'une formation sédimentaire donnée que les géologues ont alors à interpréter. Seul le forage permet d'obtenir une réponse précise à la question de savoir si du pétrole ou du gaz existent dans la roche mère.

Fondamentalement le forage en mer n'est pas différent du forage terrestre. Les outils utilisés (tiges, derrick, treuils, pompes à boue, trépan etc..) sont les mêmes. Mais il est nécessaire de résoudre le problème du support des installations qui devient de plus en plus difficile à mesure que l'on opère sur des eaux plus profondes et plus agitées.

Les investissements qu'implique le support ont néanmoins eu des conséquences sur les outils. Pour être réalisables dans des conditions acceptables, leurs amortissements ont en effet conduit à des améliorations de procédés réputés traditionnels et l'on a assisté à un accroissement de rendement, grâce à une meilleure efficacité de l'outil.

Nous nous bornerons ici aux problèmes du forage engendrés par le milieu marin, c'est à dire au choix du support. Il faut en effet maintenir à flot le matériel de forage: or le trépan a la plupart du temps sa rotation entraînée par un train de tiges rigides. Il est nécessaire que l'ensemble du dispositif soit insensible aux mouvements de la mer, si l'on veut éviter la rupture du tubage.

Les supports utilisés sont extrêmement variables et dépendent de plusieurs facteurs:

- profondeur du fond marin.
- probabilité d'existence d'un gisement
- importance prévue du gisement
- utilisation ou non du support après le forage.
- météorologie de la région prospectée
- éloignement de la côte et des chantiers navals.
- évolution technique.
- moyens financiers de l'utilisateur.

C'est pourquoi nous trouvons un grand nombre de types de supports, que nous pouvons classer en trois grandes catégories:

- Les structures fixes, qui comme leur nom l'indique sont pratiquement construites à demeure à l'emplacement du forage.

- Les plateformes semi-mobiles, qui peuvent être déplacées plus ou moins facilement mais qui reposent sur le fond par l'intermédiaire d'un lest.

- Les plateformes mobiles qui sont entièrement indépendantes hormis leurs moyens de remorquage.

I. Structures fixes

A. Iles artificielles

Des îles ou presque îles artificielles, en terre rapportée, ont été réalisées au début de la recherche off shore des hydrocarbures.

Dans certains cas bien particuliers, et de toutes manières par faible fond, ce procédé peut être encore avantageux, et l'on assiste actuellement à la construction de deux supports de ce type dans le port de Long Beach.

Les travaux de terrassement sont protégés par des enrochements ou des techniques plus élaborées telles que les tétrapodes NEYRPIC par exemple.

Rincon Island, en face de Santa-Barbara en Californie est le meilleur exemple de ce type de support.

B Plateformes fixes autonomes

Les structures fixes de ce type sont en forme de prisme ou de pyramide et sont construites, pour des raisons de légèreté et d'hydrodynamisme, en éléments tubulaires. Elles supportent une plateforme de dimensions variables (1 000 m² par exemple) et sont rendues solidaires par soudures de pieux foncés à une profondeur de quelques dizaines de mètres, jusqu'au refus, dans le sol marin.

La mise en place de la structure elle même et de la plateforme nécessite des moyens de transport et de levage extrêmement puissants. De plus, la technique est délicate, puisqu'il s'agit de lancer en pleine mer un ouvrage lourd et volumineux. L'opération ne peut se faire qu'avec des conditions météorologiques relativement clémentes.

La structure ou " jacket " peut être partiellement flottée. Cela permet d'utiliser des engins de levage d'une capacité inférieure à son poids qui est de l'ordre de 500 tonnes pour des profondeurs de 100 mètres.

Par contre, le pont de travail ne peut bénéficier du même avantage. Les engins de levage doivent donc malgré tout atteindre une assez forte capacité, pour pousser la préfabrication de cet élément à un stade **relativement** élaboré.

La construction de ces structures fixes exige donc des pontons-grues spéciaux, tels le Mc DERMOTT. Ce ponton mesure une centaine de mètres de long et une trentaine de large. Il fait 6 mètres de creux et porte une grue rotative d'une capacité de 250 tonnes, avec une flèche d'environ 80 m.

La société ERAP a pour son compte, fait construire une plateforme auto-élevatrice le long de piles reposant sur le fond de la mer, dont le seul but est de supporter une grue ayant une capacité de levage de 180 tonnes à environ 20 mètres de son axe. Les piles ont 61 mètres de haut. L'engin pèse environ 3 800 tonnes.

Des engins analogues de capacité double sont en cours d'assemblage.

A coté de ces engins de manutention, la construction de la plateforme de forage nécessite une centaine de personnes, des bateaux de liaison, des ravitailleurs, des remorqueurs pour le ponton et éventuellement des hélicoptères.

Une fois construite, la plateforme permet d'installer hors d'atteinte de la houle, un appareil de forage complet, des habitations, un hélicoptère et toutes les commodités pour un séjour prolongé d'un équipage de 40 à 50 personnes.

De telles plateformes s'appliquent donc à la résolution de problèmes pétroliers où la probabilité de découverte d'un gisement est forte: au moins une chance sur trois ou quatre. Elle est particulièrement intéressante quand le nombre de puits à forer devient important (20 à 30). Elles permettent après le forage et le démantèlement des installations, de porter les organes de production et de traitement et de servir d'apportement pour le chargement des pétroliers.

Leur prix total, y compris la pose, varie de 7 millions de Francs pour 20 m. d'eau à 20 millions de Francs pour 100 mètres d'eau.

Lorsque les opérations sont terminées, ces plateformes sont récupérées, car on ne peut les laisser en mer sans danger pour la navigation.

C Plateformes assistées

Pour limiter l'importance, voire le gigantisme des plateformes fixes autonomes, puisque certaines ont déjà la taille d'un immeuble de 35 étages, et si le nombre de puits à forer est peu important, il y aura lieu d'utiliser une plateforme fixe assistée d'un tender.

La plateforme ne supportera plus que les organes de l'appareil de forage qui doivent être immobiles par rapport au sol, tandis qu'un engin flottant dit " tender ", mouillé à proximité, reçoit le reste de l'appareillage et assumera donc les fonctions suivantes:

- stockage des produits tubulaires, des produits consommables, des boues.
- pompage.
- habitation.

Ce tender est soit une barge, soit un bateau qui a été spécialement aménagé.

Ceci dit, la plateforme est de même conception que les précédentes, mais sa construction est beaucoup plus facile, et s'est à peu près normalisée. Elle servira généralement de support de puits après le forage.

Ce procédé est économique dans les régions habituellement calmes jusqu'à des profondeurs de 80 mètres.

II. Plateformes semi-mobiles.

A. Chalands submersibles

La Louisiane est une région marécageuse où il est pratiquement plus facile de percer des voies d'eau que de construire des routes.

Dans ces conditions l'idée est tout naturellement venue de placer les installations de forage sur des chalands qui sont amenés sur les lieux de travail et coulés sur place.

Ces unités sont toujours employés avec profit en eaux très calmes et peu profondes (3 à 5 mètres). Les chalands ont un tirant d'eau de 1 à 2 mètres, et mesurent 60 x 15 m. Leurs ballasts constituent des réserves d'eau et de fuel. Les équipages sont logés à bord.

Un impératif important est de pouvoir dégager la plateforme à la fin de l'exécution du forage, plus particulièrement lorsque celui-ci est productif et complété avec une tête de puits émergée. C'est pourquoi le chaland doit présenter une encoche longitudinale au fond de laquelle se trouve l'axe du forage.

Le déplacement d'une telle installation est rapide et moins coûteux qu'un appareil terrestre.

B. Barges submersibles

Pour augmenter la profondeur d'eau sous laquelle le forage est possible, c'est à dire aller déjà en haute mer, on a cherché à extrapoler ce procédé.

On a construit des barges comportant un flotteur rectangulaire d'environ 30 x 60 m. supportant une charpente de quelques mètres de hauteur sur laquelle est disposé un plancher de travail portant l'appareil de forage, les quartiers et les grues de transbordement.

Ce flotteur qui sert à porter l'unité pendant le déplacement est plein d'eau de mer, de réserves d'eau douce ou de fuel, pendant le forage.

Ces barges simples ne peuvent dépasser une dizaine de mètres d'eau, car les opérations de coulage et de remise à flot sont extrêmement délicates. En effet, pour les déplacer, on commence par déjauger une des extrémités de la plateforme, jusqu'à ce que l'extrémité du caisson émerge. Ensuite on déjauge prudemment l'autre extrémité.

Pour pouvoir atteindre des profondeurs d'eau plus grandes on est amené à adjoindre à la charpente verticale en treillis métalliques des caissons en forme de bouteilles, disposés aux quatre angles, ou suivant deux cotés.

On compte de nombreuses réalisations de ce type, dont la plus importante est la KERR Mc GEE n° 54, qui est constituée par trois énormes bouteilles verticales de 10 mètres de diamètre ayant un entraxe de 100 m. Elle est utilisable par 50 mètres d'eau.

Ces plateformes ne peuvent se poser que sur les fonds plats et sont particulièrement indiquées pour les zones de travail à fond meuble telles que les embouchures des grands fleuves.

Leur prise aux vagues n'est pas excessive, mais leur prise au vent pendant le remorquage est très importante. Leur histoire ne comporte néanmoins que peu d'accidents.

C. Plateformes oscillantes

Les essais de plateforme oscillante ont été réalisés en juillet 1968 dans le golfe de Gascogne et constituent une belle réussite française.

Le principe consiste à transporter une embase de béton entourée de flotteurs jusqu'à l'emplacement prévu. Cette embase est coulée au fond.

La plateforme prototype est constituée d'une colonne d'acier de 110 mètres de long et 7 mètres de diamètre munie d'un groupe de 6 flotteurs à sa partie supérieure. Remorquée horizontalement, cette colonne est basculée au dessus de l'embase et reliée à celle-ci par des articulations à cardan. Elle est donc maintenue verticale par les flotteurs, qui sont à une dizaine de mètres en dessous de la surface de l'eau. Elle est coiffée d'une plateforme sur laquelle peuvent être placés les appareils de forage et où est réservé un emplacement d'attribution pour hélicoptères.

En cas de forte houle elle peut osciller de quelques degrés autour de l'embase.

Ce type de plateformes est certainement assuré d'un brillant avenir car leur coût peut être rendu largement inférieur à celui des gigantesques plateformes mobiles que nous allons maintenant étudier. Leur installation nécessite néanmoins le travail de plusieurs équipes au fond de la mer et on se trouve donc limité par les possibilités de la plongée autonome. Quand les problèmes que pose celle-ci seront résolus, on pourra envisager le lancement de structures oscillantes en plusieurs parties, jusque sur des fonds de 300 mètres.

III Plateformes mobiles.

Les plateformes mobiles sont actuellement les plus largement répandues.

A. Plateformes autoélévatrices.

Les plateformes autoélévatrices sont une transposition

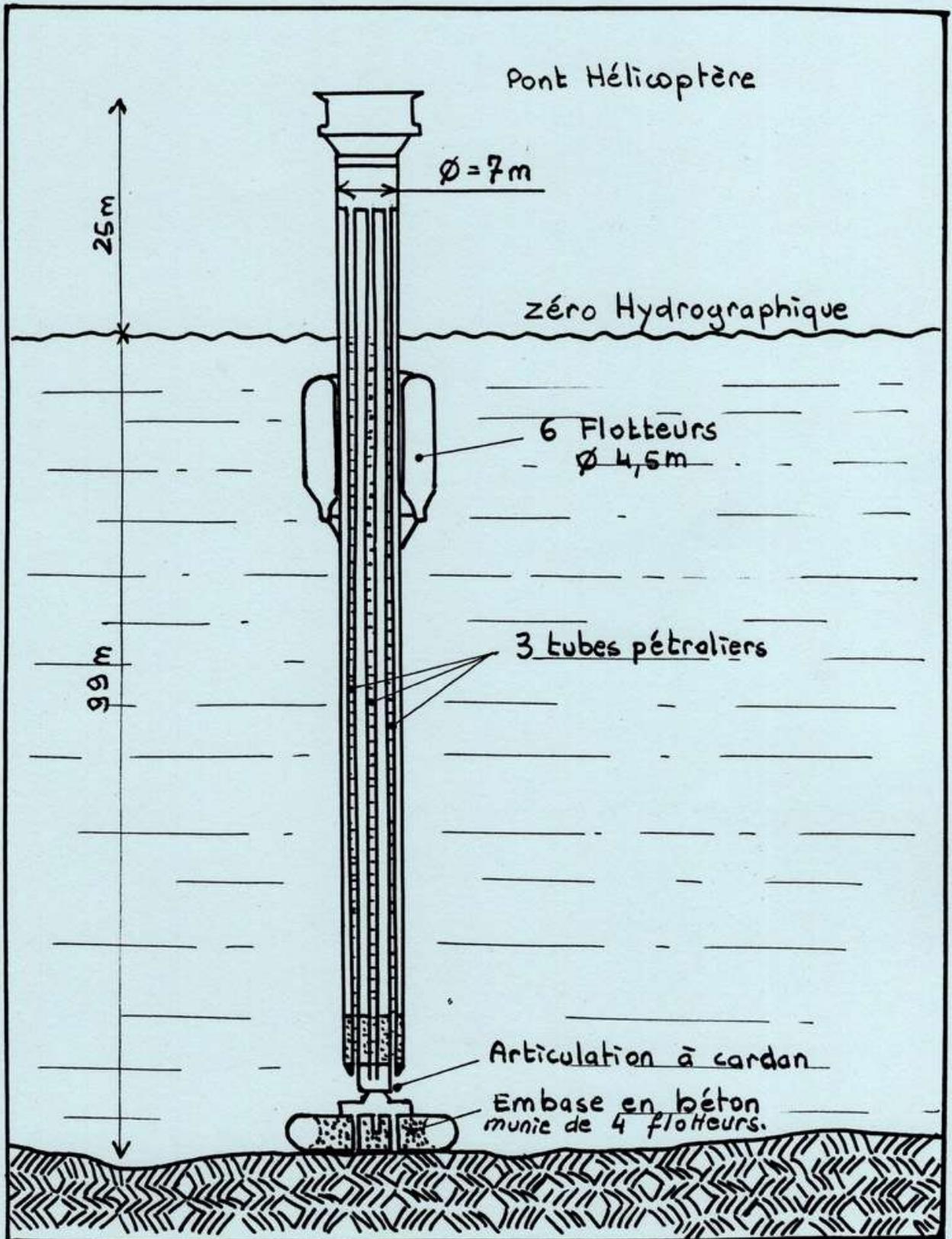


Fig 10 : Plateforme Oscillante

des engins utilisés en Génie Civil pour les travaux portuaires. Elles sont constituées d'une coque flottante portant toutes les installations et plusieurs piles mobiles. Une fois remorquées sur les lieux du forage, les piles sont descendues jusqu'au contact du fond de la mer où elles s'enfoncent de quelques mètres et la plateforme s'élève ensuite le long des piles à une quinzaine de mètres de la surface afin d'être à l'abri des plus hautes vagues. Elle est alors prête à forer.

Il existe actuellement une centaine de ces plateformes rendues célèbres par de nombreux reportages télévisés dont ceux de la fin de l'année 1968. Elles diffèrent par le nombre et la structure (cylindrique ou en treillis) des piles et le système d'élévation (vérins ou moteurs électriques). Elles pèsent plusieurs milliers de tonnes.

Le calcul de telles plateformes, en position de travail soumises à la houle maximum est analogue à celui d'un pont soumis à des efforts latéraux et à des charges verticales variables. On admet généralement un couple maximum de renversement égal à la moitié de celui qui la ferait basculer. En outre les piles doivent résister au flambement.

En position flottante, la stabilité est généralement suffisante même avec toute la longueur des piles en l'air, sauf en cas de vents violents. Mais l'encastrement des piles ne peut supporter un roulis important et il faut donc les baisser d'une vingtaine de mètres en haute mer.

Il est intéressant d'analyser quelques unes des réalisations les plus importantes.

1. Plateforme "Roger Butin"

- Coque : rectangulaire. 58x32x4,50m.
- Piles : 4 piles cylindriques verticales . Longueur : 78m. Diamètre : 3,60m.
- Enfoncement des piles : 4 mètres environ.
- Poids : 5 200 tonnes.
- élévation : vérins hydrauliques.
- Profondeur d'utilisation possible : 50 m.

Cette plateforme a sombré accidentellement au large des côtes du Cameroun.

2. Neptune "1"

- Coque : triangulaire. 61x51x7,20 m.
- Piles : 3 piles en treillis triangulaires verticales. Longueur : 76 m.

Ces piles comportent à leur base un caisson cylindrique de 10m de diamètre terminé vers le haut et vers le bas

par un cône convexe. La hauteur de ces caissons est de 15m.

- Enfoncement des piles: 3 à 6 mètres.
- Poids: 4 000 tonnes.
- Élévation: Ensemble pignons-crémaillère mu par des moteurs électriques.
 - vitesse d'élévation: 0,45 m./mn.
 - descente des piles: 1,35 m./mn.
- Profondeur d'utilisation possible: 50 m.
- Equipage: environ 50 personnes.

3. Neptune " Gascogne "

La plateforme Neptune " Gascogne " a en gros les mêmes caractéristiques que la précédente. Par contre, les piles sont inclinables. Elles mesurent 108 mètres de long pour un diamètre de base de 11,60 m. Elle a été conçue pour accéder à des profondeurs de 60 mètres dans les conditions difficiles du Golfe de Gascogne, où la houle peut atteindre 16 mètres. Son poids est de 7 200 tonnes.

Ces plateformes NEPTUNE du type LETOURNEAU, sont construites sous licence américaine à Rouen par DUBIGON NORMANDIE et la C.F.E.

Le derrick se place au dessus d'une encoche pratiquée dans la coque et se déplace longitudinalement et transversalement sur la plateforme, ce qui permet d'effectuer plusieurs puits sans déplacement de l'ensemble. Elles ont une importante charge utile, et fabriquent elles mêmes l'eau douce.

Leur grande particularité est leur mode de lancement; Les plateformes sont en effet construites sur un terrain plat le long d'un plan d'eau. Elles sont levées d'une dizaine de mètres, et l'on aménage en dessous un tas de sable d'environ 10 000 m³. En rabaissant la plateforme, il se produit une légère rotation et un glissement. L'opération est répétée une centaine de fois, le sable étant poussé par des bulldozers, pour mettre la plateforme à l'eau.

A coté des plateformes Neptune, citons la plateforme GUSTO de la Société FORAMER, qui est de forme pentagonale. Sa particularité est une grue de 100 tonnes qui se déplace sur un chemin de roulement et dessert les 5 piles et l'encoche. La plateforme construit donc ses piles par ses propres moyens.

Il est intéressant de savoir que les plateformes autoélévatrices coûtent de 6 à 8 millions de dollars et que le fonctionnement de l'appareil de forage coûte en moyenne 8 à 10 millions d'anciens francs par jour, soit 10 à

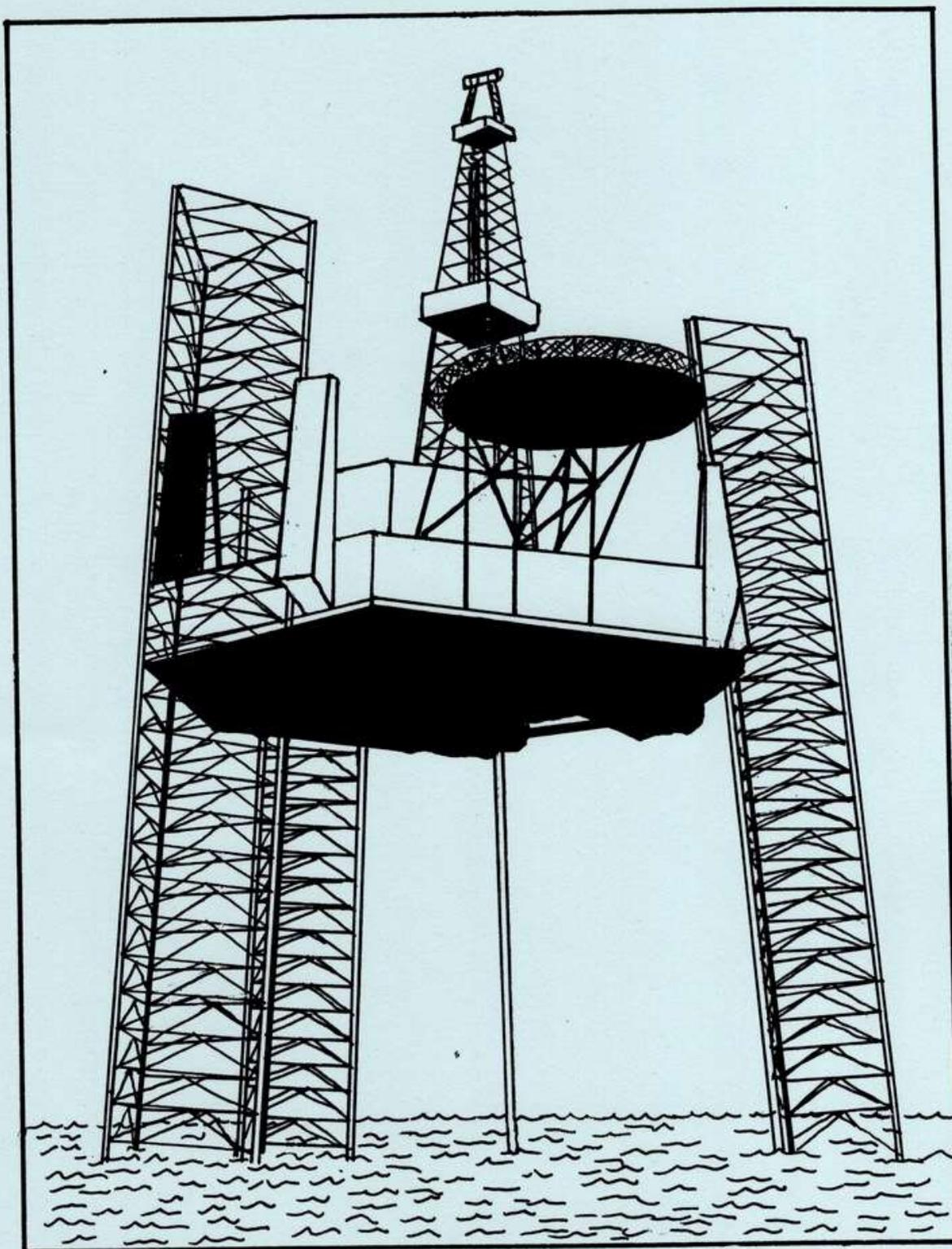


Fig 11 : Plateforme Auto-élévatrice.

15 dollars la minute. Environ 15% de ce coût sont absorbés par les moyens de liaison.

B. Bateaux de forage

L'intérêt des bateaux de forage est leur mobilité et l'insensibilité qu'ils présentent à la profondeur d'eau. Leur handicap est de ne pas présenter une liaison rigide avec le puits à travers la tranche d'eau. Ils possèdent une sécurité moins grande que les plateformes et les conditions météorologiques défavorables peuvent entraîner des temps morts assez importants, puisqu'au dessus de 2° de roulis de part et d'autre la descente du tubage est impossible, et qu'il faut arrêter le forage au dessus de 5°.

Le problème de l'ancrage dont nous avons déjà parlé est également un facteur de difficulté puisqu'il faut que le débattement soit inférieur à 5% de la profondeur d'eau. D'autre part, le bateau impliquera souvent l'utilisation d'une tête de puits sous marine.

Sur les premiers navires, les installations étaient situées sur le coté (NOLA 3) ou à l'avant du bateau. Sur les plus récents il y a une simple ouverture au centre, ce qui augmente la stabilité (GLOMAR II à V). Ces bateaux peuvent être, soit spécialement conçus pour le forage comme ceux du type catamaran (C.P BAKER), soit des bateaux de seconde main transformés (baleiniers-usines par exemple).

La taille de ces navires augmente toujours. Des unités de 100 mètres de long pour 25 de large déplaçant jusqu'à 10 000 tonnes sont courantes. Les plus importants peuvent atteindre 20 000 tonnes.

Une réalisation particulièrement intéressante est le TEREHEL de l'Institut Français du Pétrole. Ce navire qui est à ancrage dynamique a été spécialement étudié pour l'expérimentation de techniques d'exploration, de forage et de production.

Il mesure 55 x 12 m. pour un tirant d'eau de 1,50 m. et utilise une technique qui le libère de toute obligation trop draconienne de positionnement et de stabilité: le flexo-forage.

Le flexo-forage utilise une garniture flexible qui remplace le train de tiges classique du forage Rotary, et un moteur souterrain attaquant directement l'outil (moteur électrique ou turbine). Bien entendu, il n'est pas alors nécessaire de monter chaque tige sur l'autre à mesure que le forage

progressive, puisque la garniture flexible se déroule en continu sur un tambour à l'arrière du bateau.

Ce procédé original est appelé à un bel avenir. Il n'a pas été mis au point spécialement pour les forages en mer, puisqu'il date de 1853, mais leur convient particulièrement.

C. Plateformes semi-submersibles

Les plateformes semi-submersibles visent à accéder aux grandes profondeurs par mer quelconque.

Il faut donc leur assurer une très grande stabilité. Ceci est obtenu par la dispersion dans le plan horizontal de la surface de flottaison, par une plus grande inertie massique et également par une ou plusieurs carènes immergées, volumineuses, situées en profondeur entre 10 et 25 mètres dans une zone où les mouvements orbitaux de la houle sont beaucoup moins importants qu'en surface.

Les barges semi-submersibles sont donc des installations flottantes dont les ballasts horizontaux et les piles verticales peuvent être partiellement remplis d'eau de mer, de façon à immerger la plateforme à la profondeur voulue. Certaines sont des barges submersibles transformées (BLUE WATER 1).

Elles atteignent en moyenne 10 000 tonnes et coûtent de 5 à 10 millions de dollars .

Leur ancrage représente une fraction notable du coût total. Il peut comporter une dizaine de lignes en câbles d'acier sur lesquelles de violents efforts peuvent s'exercer par grand vent. L'ancrage dynamique peut aussi leur être adapté ou encore des systèmes encore plus modernes tels que le repérage par ultra-sons.

Comme pour les bateaux de forage, ces plateformes doivent être équipées de systèmes de télécommande permettant d'opérer sur les équipements reposant sur le fond de la mer.

Les plus belles réalisations étrangères sont les plateformes OCEAN DRILLER, OCEAN PRINCE et la SEDCO. L' "Océan Prince" par exemple comporte deux ballasts horizontaux cylindriques de 100 mètres de long écartés parallèlement de 70 m., surmontés chacun de 5 piles de 50 mètres de hauteur supportant la plateforme de forage.

En France, " PENTAGONE 81 " a été rendu opérationnel le début 1969. Elle a été étudiée par l'I.F.P. et SOGREAH et

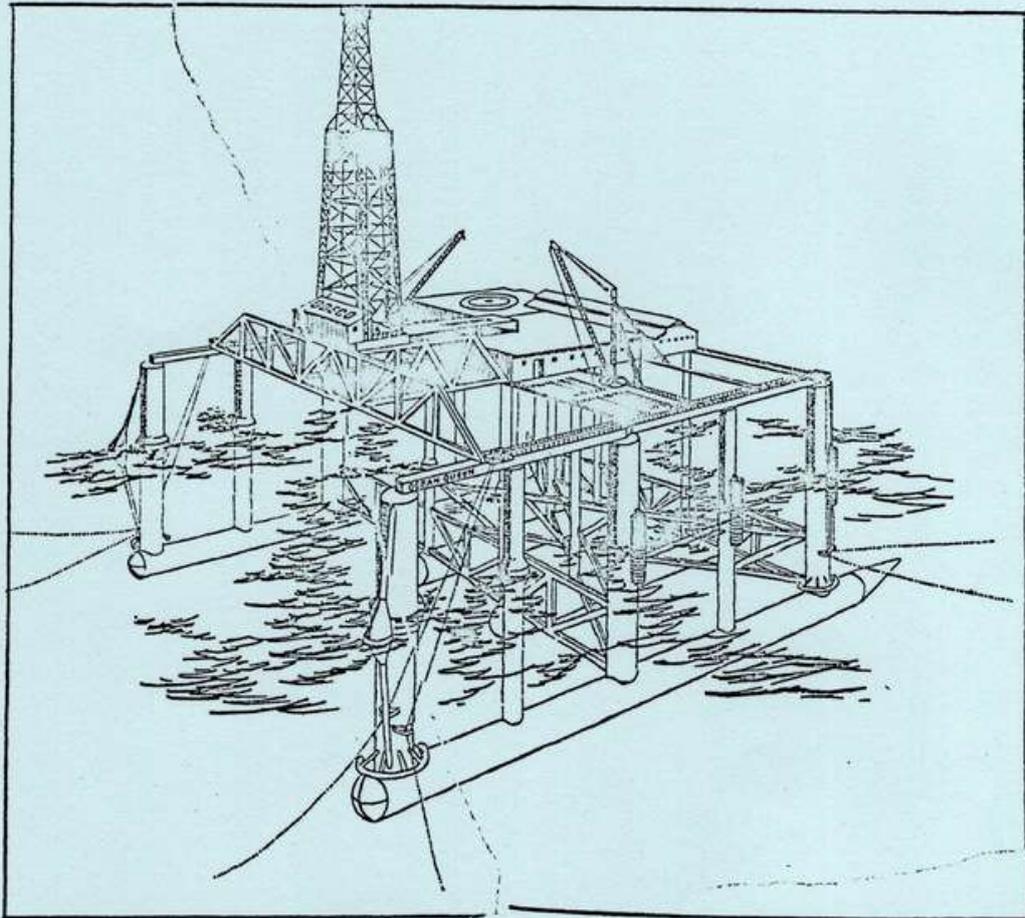


Fig 12 : Plateforme
semi-submersible
" OCEAN PRINCE "

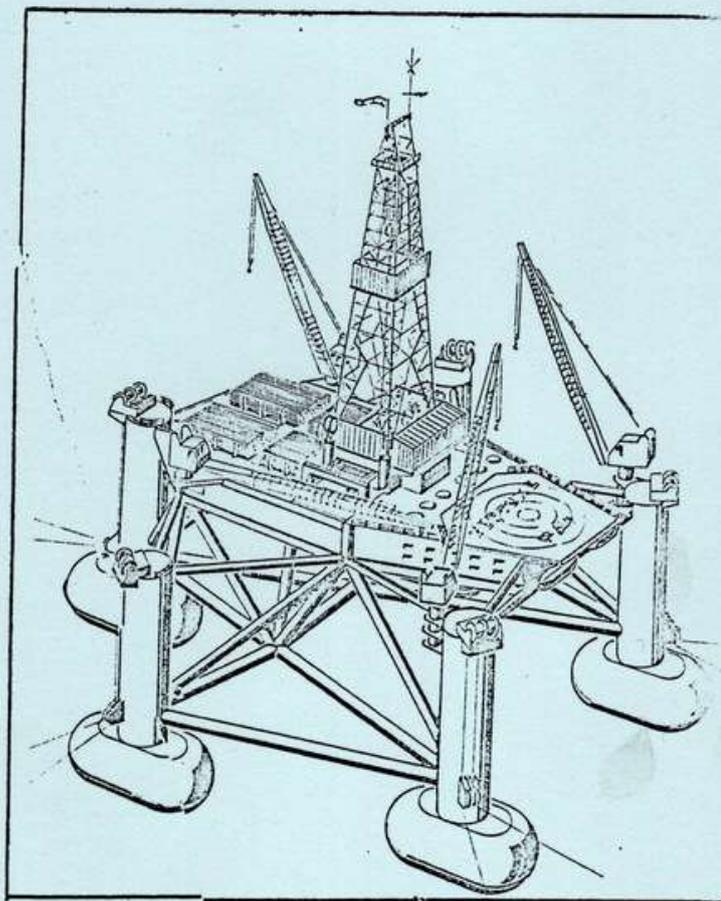


Fig 13 : Plateforme
semi-submersible
" PENTAGONE 81 "

construite sous la responsabilité de la C.F.E.M pour le compte de la Société NEPTUNE. Elle pèse 8 500 tonnes et a coûté 500 millions de Francs, installations comprises. Elle peut être utilisée dans le Golfe de Gascogne jusqu'à des profondeurs de 200 mètres sans qu'il soit besoin d'arrêter le forage par des vents de plus de 100 km/h. et des vagues de 12 mètres.

Les volumes de carène sont disposés aux sommets d'un pentagone, ce qui favorise la régularité des réponses à la houle en pilonnement, débattement, roulis et tangage, lorsque la plateforme est immergée à sa position de forage.

Elle a les dimensions suivantes: 101,50 x 97 x 40,80 m. Chaque flotteur pèse 600 tonnes et mesure 24,50 x 16 m.

Comme on le voit, ce n'est pas les plateformes semi-submersibles qui ouvrent la voie de la miniaturisation en matière de forage en mer.

Pour conclure cette étude sur les moyens de forage en mer, il faut citer une enquête qui a été faite en juillet 1968.

A cette époque, on dénombreait environ 260 engins de forage en mer, se répartissant ainsi:

- 50 plateformes fixes autonomes
- 50 plateformes fixes assistées
- 30 plateformes semi-mobiles
- 70 plateformes autoélévatrices
- 40 navires de forage
- 20 plateformes semi-submersibles

Le forage en mer est donc une activité très importante mais qui reste une opération d'avant garde. On a compté ces dix dernières années 23 accidents graves sur les installations flottantes.

La perte du SEA GEM en décembre 1965, en Mer du Nord entraîna la mort de 17 personnes.

Il est donc normal que de gros efforts aient été faits pour améliorer les techniques. C'est pourquoi nous assistons actuellement à de nombreuses expériences plus ou moins révolutionnaires.

Si les plateformes de forage ont encore de beaux jours devant elles, divers essais sont en cours aux Etats-Unis pour mettre en place une tour de forage avec tous ses accessoires directement sur le fond de la mer. Les quartiers d'habitation ou d'accueil du personnel seraient également immergés, et auraient une atmosphère artificielle dont la pression serait égale à celle de la colonne d'eau.

Des essais similaires de tour de forage sous marine non habitée, entièrement automatique et commandée à distance à partir d'un bateau en surface, sont également poursuivis.

LA PRODUCTION EN MER

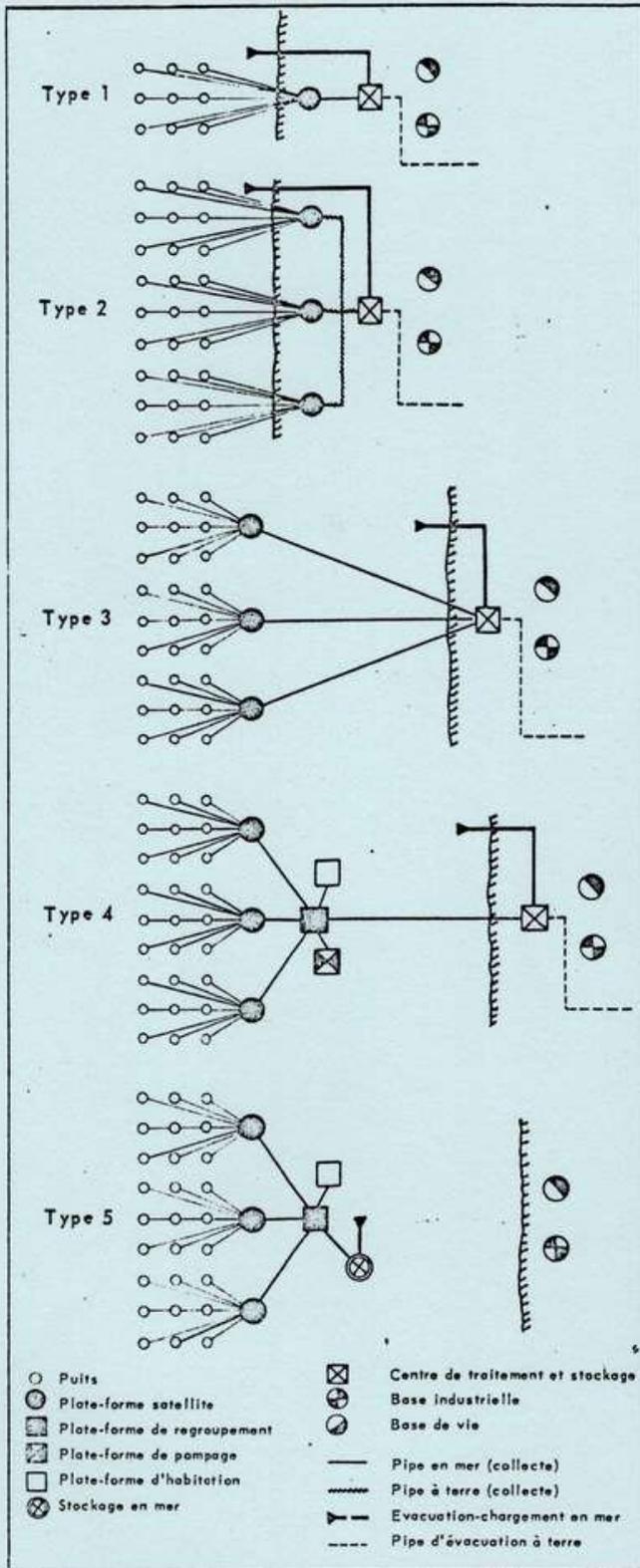
Les techniques de production des hydrocarbures utilisées sont encore simplement extrapolées des techniques terrestres. Mais des méthodes spécialement adaptées au milieu sous-marin, dites techniques de complétion sous-marine, rendues inévitables, commencent à apparaître, et n'en sont d'ailleurs qu'au stade de la mise au point.

Le forage d'exploration qui a livré une découverte d'huile ou de gaz n'est qu'un modeste trou d'épingle dans un gisement qui peut couvrir quelques centaines de kilomètres-carré. Le problème du développement de ce gisement a un grand nombre de paramètres dont on découvre la valeur au fur et à mesure de l'exploitation, qui dure généralement plusieurs années. Il faut malgré tout, le plus vite possible, évaluer les réserves récupérables, les rythmes de production, le nombre, l'emplacement, la productivité des puits, la nature des fluides produits, les pressions disponibles et l'évolution probable dans le temps de certains de ces facteurs pour installer des équipements appropriés techniquement et économiquement.

Si à terre le développement d'un gisement peut se faire de façon progressive pour éviter de faire des paris économiques trop risqués, en mer il en va autrement. En raison de l'adaptation bien précise des installations à certains cas déterminés, il faut s'engager dès l'origine dans une voie relativement stricte, dont il sera parfois impossible par la suite de s'éloigner.

I Le groupement des puits

Suivant les paramètres que nous avons définis précédemment, nous pouvons avoir divers schémas de développement des champs en mer, que Monsieur J. LAMA ZOU, ingénieur à la S. N. P. A., a présentés sous la forme du graphique ci-joint. On dénombre 5 types classiques d'installations qui correspondent à des :



Divers schémas de développements des champs en mer (d'après J.LAMAZOU)

fig. 15

Type 1: Champ de faible étendue situé près de la côte.

La production de chaque puits est évacuée directement en régime diphasique, c'est à dire sans séparation de la phase gazeuse et de la phase liquide, par des conduites indépendantes sur un centre à terre où le brut est traité et stocké, puis évacué sur les pétroliers par l'intermédiaire d'un ponton de chargement ou par une conduite vers une raffinerie proche.

Type 2: Champ de grande étendue situé près de la côte.

La production de chaque puits est directement évacuée à terre sur plusieurs centres de séparation par étage. Une conduite achemine ensuite le brut jusqu'à une unité centrale de traitement et de stockage d'où il est évacué.

Type 3: Champ de grande étendue situé assez loin de la côte.

Les centres de séparation par étage se trouvent sur des plateformes satellites, à partir desquelles le brut est évacué, soit en monophasique, soit en diphasique vers l'unité centrale se trouvant sur la côte, avec ou sans pompage. Il est traité, stocké, évacué.

Type 4: Champ de grande étendue situé loin de la côte.

Le brut collecté à chaque plateforme satellite subit la préparation par étage puis est envoyé vers une plateforme de regroupement où peut avoir lieu la séparation 2^{ème} étage. Il est ensuite évacué à terre. Des plateformes de pompage et d'habitation peuvent être nécessaires.

Type 5: Champ de grande étendue situé très loin de la côte.

Quand la distance à la côte devient très importante on réalise un schéma de production où toutes les opérations y compris le stockage et le chargement sont réalisées en mer. Il ne subsiste à terre qu'une base réduite.

- Champs de faible étendue près de la côte
- Champs de grande étendue près de la côte
- Champs de grande étendue assez loin de la côte
- Champs de grande étendue loin de la côte
- Champs de grande étendue très loin de la côte

II Les puits

Nous voyons, d'après les schémas de groupement des puits qu'il est nécessaire pour l'exploitation en mer des hydrocarbures de mettre en oeuvre des plateformes de service, soit à puits simple, soit à puits multiples, portant donc une ou plusieurs têtes de puits. Pour éviter la contrainte de la construction de ces plateformes, on voit se développer actuellement des expériences ayant pour but d'installer la tête de puits directement au fond de la mer.

A. Plateforme à puits simple

Les plateformes d'exploitation simples sont les anciennes plateformes de forage dans le cas où celui-ci a été accompli au moyen d'une structure fixe assistée d'un tender. Nous avons décrit ces plateformes au chapitre précédent. Elles sont relativement lourdes puisqu'elles ont été conçues pour supporter les installations de forage et le procédé est donc particulièrement applicable par des fonds assez importants, c'est à dire de 40 à 80 m, nécessitant une grande stabilité des structures.

Pour les plus faibles profondeurs ou lorsque le forage n'a pas été accompli au moyen d'une plateforme fixe, on met en oeuvre des plateformes plus légères spécialement adaptées. Le forage est donc accompli au moyen d'une plateforme mobile et l'on met en place, avant, pendant ou après le forage la plateforme d'exploitation très simple, qui peut se réduire, dans certains cas, à un simple caisson de production équipé d'une petite passerelle, à partir de laquelle peuvent s'effectuer les travaux dans le puits.

Ces plateformes légères sont du même type que les plateformes de forage et sont donc constituées de trois parties :

- Les pieux qui sont battus dans le fond de la mer
- La structure qui est fixée sur les pieux
- Le pont qui repose sur l'ensemble.

Elles sont, comme les plateformes de forage, pratiquement construites en série aux Etats Unis. Leur coût est réduit.

B. Plateformes à puits multiples.

Quand les conditions le permettent on regroupe un maximum de têtes de puits sur une même plateforme, qui est alors du type plateforme fixe autonome. Cette plateforme doit donc avoir des dimensions telles qu'il soit possible d'effectuer à partir d'elle de nombreux forages.

Ces plateformes que nous avons décrites se multiplient actuellement et atteignent des dimensions gigantesques, puisque certaines ayant permis le percement d'une trentaine de puits supportent leurs têtes et des installations annexes, telles que les séparateurs.

Dans ce cas, il est nécessaire de mettre en oeuvre des techniques de forage de puits déviés, et il faut donc que le gisement soit assez profond et pas trop étendu.

C. Têtes de puits sous marines

Malgré que la technique de pose des plateformes fixes soit maintenant bien au point, et que l'on a aussi fait des essais d'installation de tête de puits sur des plateformes mobiles, la recherche des hydrocarbures s'étend à des eaux toujours plus profondes et conduit les pétroliers à essayer d'éliminer ces installations en plaçant les têtes de puits et si possible l'équipement de production, au ras du fond de l'océan.

Deux solutions sont possibles :

- On utilise des têtes de production conventionnelles simplement aménagées pour permettre une mise en oeuvre à l'aide de plongeurs ou de robots. On considère actuellement que l'intervention de plongeurs peut être efficace jusqu'à une profondeur de 150 mètres.

Dans ce cas l'entretien des puits nécessite toujours une installation flottante légère. Ce mode de complétion a été utilisé au large des côtes californiennes en eaux peu profondes, où la présence de plateformes a été jugée indésirable pour des raisons de sécurité et d'esthétique.

- On collecte dans un endroit central situé sous la mer le brut provenant de plusieurs puits dont la mise en production a été faite au ras du sol marin. On peut alors, à partir de cette installation de concentration, envoyer par pompage des outils et instruments spéciaux télécommandés à partir de la surface, dans le réseau de collecte jusqu'aux puits de production, afin de s'assurer de leur bonne marche.

Ces appareils peuvent atteindre des puits distants d'un mile ou plus du point central, par l'intermédiaire d'un

double tubing dont les courbes ont un rayon assez grand pour permettre leur circulation. Sur les lieux ils répondent aux ordres transmis hydrauliquement depuis la surface, enlevant par exemple la paraffine des parois des tubes, indiquant les températures et donnant toutes les précisions utiles sur l'état du fond des puits.

Il s'agit là d'un matériel tout à fait expérimental faisant l'objet, en France comme aux Etats Unis, d'essais particuliers. Ces têtes de puits T.F.L. (through flow line) sont réalisées en particulier par CAMERON ou la division "National Supply" d' ARMCO STEEL.

Elles nécessitent en tout état de cause une installation de soutien ou de relais en surface.

III Les installations de production en mer

Suivant les schémas de développement de gisements, nous pouvons donc trouver en mer des plateformes de traitement, des stations de stockage, et des points de chargement pour pétroliers. Ces diverses structures et les installations côtières sont reliées par des conduites qui ont évidemment une technologie différente de celles que nous trouvons à terre.

A. Les conduites

Les conduites sont constituées d'un tube d'acier dont le diamètre et l'épaisseur sont déterminés en fonction des caractéristiques d'exploitation (pression et débit des fluides transportés)

Pour les diamètres importants (plus de 15 cm) les conduites doivent être revêtues de béton pour être protégées mécaniquement et être lestées suffisamment même lorsqu'elles sont pleines de gaz.

Le problème de la pose des conduites n'est pas simple à résoudre. La méthode la plus utilisée consiste à se servir d'une barge de pose. Elle convient particulièrement par faible fond (30 m) et lorsque l'on peut bénéficier d'assez grandes périodes de temps calme.

La barge est un engin souvent important qui peut mesurer jusqu'à une centaine de mètres de long. Elle comporte une coque à laquelle on a adjoint une rampe de lancement constituée de diabolos ou de chariots équipés de roues sur lesquelles repose la conduite. Tout le long se trouvent des postes de travail où l'on effectue les soudures, leur contrôle radiographique, le complément d'enrobage anti-corrosion ou le revêtement de béton.

Les éléments de conduite assemblés sur la barge glissent donc directement jusqu'à leur emplacement définitif sur le fond de la mer. Il faut surveiller continuellement la flexion de la conduite en porte-à-faux entre la barge et le fond, et on peut à ce sujet être amené à utiliser un "Stinger" : Il s'agit d'un châssis métallique à inclinaison variable qui a pour rôle de supporter la conduite entre la barge et le fond.

Les conduites peuvent également être mises en place par diverses méthodes de traction :

- La méthode de traction en surface, qui consiste à assembler la conduite sur une plage, et la remorquer en surface jusqu'à son emplacement définitif où elle est immergée par des lests. Cette méthode convient en mer calme pour faibles fonds et des conduites de fort diamètre.

- La méthode de traction sur le fond, où l'assemblage s'effectue également sur une plage, mais où la traction est réalisée la conduite reposant déjà au fond de la mer. Cette méthode s'applique à des conduites de faible diamètre, par mauvaise mer et par grande profondeur, lorsque le fond de la mer présente une surface suffisamment plate.

Lorsque les fonds marins sont accidentés et que les courants sont forts, on ancre dans les fonds marins le pipeline qui est maintenu entre deux eaux par des bouées.

Les conduites sont reliées aux plateformes ou aux puits par des colonnes montantes ou "Riser". Le raccordement est souvent difficile et est effectué soit en surface (immersion simultanée du pipe et de la colonne) ou au fond (raccordement par brides)

B. Les plateformes de traitement

Les deux premiers traitements classiques du pétrole brut, qui sont effectués avant le stockage, à savoir le dégazage et la déshydratation et le désalement, peuvent dans certains cas être effectués en mer.

Le dégazage : Le dégazage est l'opération qui est faite immédiatement après l'extraction du pétrole. L'huile brute contient du gaz naturel et des produits volatils dissous. La séparation grossière du gaz et du liquide se fait dans des séparateurs de gaz. Ce sont des chicanes qui retiennent le pétrole qui ruisselle le long d'une colonne, après avoir été injecté à son sommet. Le gaz récupéré contient encore de l'huile et réciproquement.

Déshydratation et dessalement : L'huile dégazée contient de l'eau sous différentes formes et il faut ramener la teneur à moins de 0,2 % d'eau pour que le pétrole soit commercialisable.

- Les gouttelettes de diamètre assez important sont séparées par décanatation.

- L'eau émulsionnée par de l'argile très fine agissant comme colloïde protecteur, et l'oxygène, le soufre, et l'azote agissant comme émulsifiants, est plus difficile à séparer.

On utilise des désémulseurs tels que les savons d'acides gras et d'acides naphthéniques qui agissent avant centrifugation. Il faut 150 à 200 g. de ces corps par tonne de pétrole.

Le dessalement se fait habituellement en même temps que la déshydratation. On élimine cependant les composés sulfurés par lavage alcalin.

Les plateformes supportant ces installations sont les mêmes que les précédentes, ou bien sont du même type. Les organes de traitement sont conçus pour occuper un minimum de place et permettre l'automatisation. Dans certains cas, les installations sont télécommandées de la côte.

Par contre, lorsque les plateformes supportent également une station de pompage, il s'avère souvent nécessaire d'effectuer le contrôle sur place. Par souci de sécurité, on prévoit dans ce cas là trois plateformes distantes d'une dizaine de mètres, reliées par des passerelles:

- une plateforme de séparation
- une plateforme de pompage
- une plateforme d'habitation.

C. Stockage

Quand le chargement des pétroliers s'effectue directement au large, le problème du stockage se pose.

La réalisation de la SCHELL-QATAR sur son champ de IDD-EL-SHARGI situé à une centaine de kilomètres en mer à l'est de DOHA est un bon exemple de ce qui se fait déjà.

La production est refoulée à travers un pipe-line, de la plateforme centrale jusqu'au terminal situé hors du périmètre du champ, mais en pleine mer. Ce terminal est constitué par une bouée métallique de forme cylindrique solidement ancrée à la verticale de l'extrémité du pipe, sur laquelle est amaré en permanence un tanker de 40 000 tonnes, qui constitue à la fois, le poste de chargement des pétroliers de passage, le stockage et le P.C opérationnel du champ.

Le système d'amarrage sur bouée appelé S.B.M (Single Buoy Mooring) est conçu de manière à permettre au navire de pivoter autour de la bouée à la manière d'une girouette. Le bateau peut donc se maintenir face au vent, à la houle et au courants. Les liaisons conduite-bouée et bouée-tanker sont réalisées au moyen de flexibles conçus spécialement pour cet usage.

Récemment un nouveau procédé a été mis au point dans le golfe du Mexique. Il s'agit d'un réservoir immergé où l'on utilise la pression de l'eau de mer qui ne peut se mélanger au pétrole, pour le propulser dans les barges de stockage.

Ce procédé va être appliqué dans le Golfe Persique pour le développement de la structure de FATEH. Le pétrole sera directement chargé dans les pétroliers à partir d'un réservoir de 87 000 tonnes.

On envisage également d'utiliser des dômes de sel sous-marins pour stocker les hydrocarbures off shore. Le GAS COUNCIL britannique a décidé pour sa part de geler des cavernes cotières pour stocker le gaz naturel sous forme liquéfiée.

IV Les installations cotières

Les installations de traitement, quand elles sont situées sur la côte, sont d'un type courant. Un centre de vie permettant de loger les familles est souvent nécessaire dans les zones quasi-désertiques où les pétroliers sont souvent amenés à opérer.

Il faut en outre prévoir à quelques encablures de la côte des installations de chargement d'un type particulier comprenant:

- un appontement pour pétrolier
- des lignes de chargement
- des lignes de déballastage

Cet appontement devra être situé par 15 mètres de fond pour permettre l'accostage de pétroliers de 100 000 tonnes. Il devra résister à la poussée d'un pétrolier qui y est amarré et qui est soumis à l'action d'un vent et d'une houle limite pour une exploitation normale. Il est constitué de plusieurs plateformes reliées entre elles par une passerelle, réalisant un ensemble de 250 à 350 mètres de longueur, perpendiculaire à la côte.

Les lignes de chargement sont en nombre égal à celui des pétroliers pouvant être chargés simultanément. Un pétrolier de 100 000 Tonnes peut être chargé en 72 heures environ.

ELEMENTS ECONOMIQUES

L'économie pétrolière qu'elle soit marine ou terrestre est dominée par les problèmes liés à l'incertitude des résultats obtenus ou en d'autres termes, au caractère aléatoire du lien qui existe entre les décisions d'investissement et les productions qui en résultent. A tous les stades le pétrolier doit faire face à l'énorme difficulté que constitue la prise de décision optimale en univers incertain, difficulté que la théorie économique actuelle n'arrive guère à surmonter de façon tout à fait satisfaisante.

Habitué à l'incertain il est presque normal que le chercheur pétrolier ait été, en dehors de toute autre considération, le premier parmi les explorateurs miniers à être attiré par le travail en mer car ce qu'on appelle le "risque de mer" n'est pas de nature foncièrement différente de ce qui constitue le risque journalier du prospecteur.

Il faut malheureusement avoir à l'esprit que, par addition, les risques indépendants ne s'annulent pas mais bien au contraire s'ajoutent ce qui se traduit par une augmentation de la dispersion des résultats. Si l'on pouvait se contenter, comme c'est généralement le cas dans les autres industries, de prendre les décisions sur la base de la valeur probable des résultats, le problème du risque marin n'aurait pas d'influence catastrophique. Mais en fait devant l'ampleur des dispersions des résultats il est impossible de baser une théorie de la décision sur les seules valeurs probables : on est amené, comme dans tous les cas où les risques sont trop importants, soit en probabilité, soit par leurs conséquences, à tenir compte de la dispersion ou plus précisément de la courbe de probabilité des résultats.

En fait il semble bien qu'à l'heure actuelle beaucoup de pétroliers ne tiennent pas compte de ce phénomène, c'est-à-dire acceptent finalement de travailler en mer avec un niveau de risques plus élevé qu'à terre : cela se traduit souvent par un manque d'attention portée par les maîtres d'oeuvre aux études préalables d'océanographie qui devraient dans chaque cas, préciser l'ampleur des risques encourus dans ce domaine.

D'autre part, à la notion d'infrastructure classique se substitue en mer la notion de disponibilité dans les délais voulus, qui peuvent être quelquefois fort brefs pour des raisons de sécurité, de moyens, spécifiques ou non, assurant l'arrivée sur les lieux de travail de personnels ou de matériels. L'ampleur de ces moyens dépend en partie des tâches à accomplir mais également de facteurs comme la distance à la côte et surtout l'état de la mer : si l'on veut en effet pouvoir accéder aux plateformes marines à peu près en toute circonstance, on est amené à disposer de matériels de transport très lourds pouvant affronter toutes les conditions météorologiques et océanographiques.

Pour ce point particulier il y a donc un lien étroit entre les investissements à réaliser et le niveau de risques marins contre lesquels on veut être garanti.

Pour tenir compte de cette infrastructure, une notion primordiale doit être prise en considération : c'est la situation de la zone de travail par rapport aux zones portuaires équipées. En effet si la zone de travail se trouve dans une région comportant déjà de nombreuses opérations d'exploration ou d'exploitation, l'infrastructure nécessaire sera préexistante et ne nécessitera pour le nouveau venu qu'une faible charge correspondant à sa part de l'utilisation de l'ensemble des moyens spécifiques. Si au contraire la zone de travail est isolée loin de toute autre zone pétrolière et de toute région à potentiel marin (ports importants) on se trouve en présence d'un véritable "désert off shore" dans lequel le pétrolier aura à supporter soit les risques de l'absence d'infrastructure, soit les frais de son établissement.

Aux moyens de transport cités plus haut s'ajoute bien entendu toute une série d'organisations pour assurer les télécommunications, la vie et le repos du personnel, le stockage et l'approvisionnement du matériel, etc.

Ceci dit, il faut savoir que l'expérience acquise permet de dire en première approximation que le coût des investissements et de l'exploitation d'un champ en mer est, toutes choses égales par ailleurs, 2 à 3 fois supérieure à celui d'un champ à terre.

I Eléments du coût des investissements

Les opérations de forage et de complétion des puits, à partir d'engins mobiles, plateformes ou bateaux, engins qui valent de 30 à 40 millions de francs, coûtent de 70 000 à 100 000 F par jour. La seule part versée au contracteur de forage représente 50 à 60 % environ de cette somme, le tarif contractuel étant essentiellement fonction de la capacité de l'engin (capacité évaluée en hauteur d'eau).

Le développement des champs, à partir de plateformes fixes, utilise des appareils de forages traditionnels dont le coût journalier est très inférieur à celui des plateformes mobiles (20 000 à 25 000 F par jour). A cela vient s'ajouter naturellement, l'investissement correspondant à la plateforme support.

Le prix des plateformes support est essentiellement conditionné par la hauteur d'eau, les états maxima de mer et les dimensions horizontales du pont. On peut toutefois retenir, pour une plateforme assistée de 200 m², les coûts moyens de :

1 700 000 F à 30 mètres et pour 300 tonnes de charge.

2 200 000 F à 45 mètres et pour 400 tonnes de charge.

3 000 000 F à 60 mètres et pour 450 tonnes de charge.

Par contre, une plateforme autonome de 1 000 m² conduit à des investissements 4 fois plus élevés environ, et nous avons par exemple pour 50 mètres d'eau, un prix voisin de 10 millions de Francs.

Ajoutons également que l'amenée et le repli du matériel, qu'il s'agisse d'une plateforme de forage ou d'une barge de pose vient considérablement grossir le prix de revient de telles opérations. A titre d'exemple, indiquons que pour un tel matériel, le trajet Etats-Unis - Europe coûte environ 4 millions de francs.

Les plateformes d'exploitation (200 à 400 m²) sur lesquelles sont placées les installations de production sont, toutes choses égales par ailleurs, d'un prix légèrement inférieur au prix des plateformes de forage destinées à supporter des charges plus importantes.

La pose de conduites en mer est peut être le problème le plus délicat du développement . L'opération de pose elle même représente un pourcentage très important du coût global (60 à 80 %) en raison du prix élevé des barges de pose et du temps nécessaire à l'exécution de l'opération: une conduite de 100 km de longueur revient environ, pour un diamètre de 250 mm, & 50 millions de francs contre 15 millions à terre.

A ces dépenses s'ajoutent celles liées à la pose des éléments de conduites remontant le long des plateformes jusqu'à la tête de puits (risers) qui sont longues et délicates.

Les installations de stockage, traitement et pompage à terre sont analogues à celles utilisées sur les champs conventionnels. Un mètre cube de stockage coûte environ 100 F et 1 CV installé de 1 000 à 1 500 F. Pour une production annuelle de 10 millions de tonnes, ce poste représente une dépense de 50 à 70 millions de francs.

La station de chargement en mer nécessite, en général, une conduite de plusieurs kilomètres et un appontement, en plus des installations de chargement. Nous retrouvons ici des éléments de coût déjà signalés. Une installation de ce type peut coûter de 30 à 40 millions de francs.

L'ensemble constitué par la base industrielle et la base de vie peut être évalué à 60 millions de francs pour une exploitation de 10 millions de tonnes par an en zone désertique.

Le télé-contrôle des puits, considéré comme essentiel pour l'exploitation de gisements en mer revient très approximativement à 200 000 F par puits.

Enfin, les stocks de premier établissement nécessaires à l'exploitation peuvent être estimés à 1,5 à 2 % des investissements globaux.

En fonction des différents paramètres de calcul, le coût du développement d'un champ de 10 millions de tonnes se situe donc entre 300 et 700 millions de Francs.

II. Eléments du coût de l'exploitation

A. Les frais de personnel

Les frais de personnel sont essentiellement fonction du volume de production, du mode d'exploitation et de la position géographique du champ.

A titre indicatif, précisons qu'il faut environ 1 000 personnes pour exploiter un champ de 20 millions de tonnes par an et 650 personnes pour un champ de 10 millions de tonnes par an.

Dans cette seconde hypothèse, les frais annuels du personnel peuvent atteindre 40 millions de francs.

B. L'entretien du matériel

Les frais annuels d'entretien du matériel sont généralement évalués en pourcentage des investissements, ce pourcentage étant variable d'un matériel à l'autre. On peut très grossièrement les estimer à 2 ou 3 % de l'investissement global, soit 15 millions de francs pour une production annuelle de 10 millions de tonnes.

C. Le transport

Des hélicoptères aux bateaux, le volume des frais de transport entraînés par l'exploitation, est du même ordre de grandeur que celui des frais d'entretien.

L'exploitation des substances minérales
autres que le pétrole.

En dehors du pétrole dont nous venons de parler longuement, le domaine marin fait déjà l'objet, ou pourra faire l'objet d'exploitations de substances diverses provenant de trois zones bien distinctes de gisements qui sont :

- l'élément liquide lui-même
- les dépôts meubles ou non consolidés du fond des océans.
- le substratum rocheux immergé.

L'ELEMENT LIQUIDE

L'élément liquide offre deux gammes de production possible:

- l'eau douce elle-même.
- les minéraux dissous.

I. L'exploitation de l'eau douce.

Depuis plus d'un siècle on extrait l'eau douce de l'eau de mer par évaporation dans des bouilleurs à bord des navires.

Or actuellement les besoins en eau douce du monde moderne s'accroissent dans de telles proportions que l'on commence déjà à faire appel à cette gigantesque réserve que constitue la mer, et il est probable que l'eau douce d'origine marine représentera, dans les prochaines années, un pourcentage important de la consommation d'eau mondiale.

Les procédés de dessalement de l'eau de mer sont très nombreux, et on peut les classer en deux groupes:

- les procédés par extraction du sel.
- les procédés par extraction d'eau douce hors de la solution saline.

A Echange d'ions

Le procédé par échange d'ions consiste à faire passer les eaux sur des résines synthétiques qui ont la propriété de retenir, les uns tous les cations des sels en les remplaçant par des ions H^+ , les autres tous les anions des sels en les remplaçant par des ions OH^- .

Ce procédé apparaît très coûteux pour l'eau de mer et n'est utilisé que pour les cas où son prix n'est pas à prendre en considération (dispositifs de survie des naufragés par exemple).

B Osmose inverse

Le principe de l'osmose est simple. Lorsque deux solutions de salinité différente (de l'eau douce et de l'eau de mer par exemple) sont séparées par une paroi semi-perméable, il y a diffusion de la fraction la moins concentrée vers la fraction la plus concentrée. Pour obtenir le dessalement, il faut réaliser une osmose inverse, ce qui est possible en exerçant une pression importante sur la solution concentrée, pression supérieure à la pression osmotique.

Ce procédé commence à entrer dans la phase des réalisations pilotes et semble promis à un grand avenir quand les problèmes délicats posés par les membranes seront résolus.

C Electrodialyse

L'électrodialyse utilise la propriété de certaines membranes macro-moléculaires de laisser passer sélectivement les anions ou les cations. Un empilement de telles membranes anioniques et cationiques légèrement espacées permet donc de dessaler l'eau de mer soumise à une électrolyse.

Ce procédé semble être compétitif, bien que des problèmes se posent également au sujet des membranes.

D Distillation

Il existe une gamme importante de procédés de distillation dont les principaux sont:

1. Distillation solaire

La distillation solaire est intéressante étant donné la gratuité de l'énergie, mais nécessite des installations complexes et encombrantes.

2. Distillation-Compression

Dans le procédé de distillation-compression, la vapeur d'eau surmontant la saumure est comprimée puis condensée. L'énergie libérée par cette condensation chauffe la saumure, ce qui accélère l'évaporation.

3 Distillation L.T.V (Longs Tubes Verticaux)

Ce procédé Français datant du début du siècle consiste à réaliser l'évaporation de l'eau salée au cours de la descente

de l'eau en pellicule mince le long de tubes à l'intérieur desquels circule et se condense la vapeur provenant d'un étage précédent.

4. Evaporation "flash"

Ce procédé est basé sur le fait que l'eau bout à une température d'autant plus basse que la pression est elle-même plus basse. L'eau salée est chauffée et introduite dans une chambre où la pression est légèrement inférieure à celle qui correspondrait à l'ébullition normale à la température de l'eau salée introduite. Une partie de celle-ci se vaporise brutalement ("flash") et va se condenser sur la paroi froide que constitue la canalisation d'eau salée qui se réchauffe de ce fait. Cependant l'eau salée de la chambre a été refroidie par l'évaporation flash et elle passe dans un deuxième compartiment où les mêmes phénomènes se répètent.

Ces différents procédés de fabrication ont déjà de nombreuses applications industrielles, puisqu'en 1967, on recensait 71 unités thermiques et 37 d'électrodialyse, dont la majorité dépassait 1 000 m³ par jour.

Il semble que ce soit la capacité des unités et le désir de récupérer les sels dissous, qui dicte le choix du procédé à utiliser. Actuellement une unité de 600 000 m³/jour est en construction en Californie: elle sera couplée avec une centrale thermoélectrique nucléaire et un complexe chimique. La France pour sa part est bien placée dans la compétition internationale et a une avance certaine dans les procédés utilisant les membranes.

II. L'exploitation des minéraux dissous

Nous avons vu que tous les minéraux existaient à l'état dissous dans l'eau de mer. Il est donc normal que l'on ait cherché à produire à partir des océans :

- les minéraux qui s'y trouvent en grande quantité.
- les minéraux facilement récupérables.
- les minéraux de grande valeur.
- les minéraux concentrés naturellement par endroit.

A. Le Chlorure de Sodium et ses sous-produits

C'est le sel commun (NaCl) qui a fait le premier l'objet d'une exploitation industrielle, puisque des marais salants existent depuis la plus haute antiquité (on connaît en effet des exemples d'exploitation systématique du sel de l'eau de mer par les Chinois, au troisième millénaire avant J-C).

Pour obtenir des rendements satisfaisants dans les marais salants, il faut avoir un sol imperméable, de grandes étendues de sol plat soumises à des vents secs en bordure de la côte, un climat chaud et sec et des possibilités de transport bon marché.

Le mécanisme de la récupération du sel dans les marais salants est le suivant: l'eau de mer est enfermée à marée haute dans des parcs, et il y a évaporation sous l'action de l'énergie solaire. Le sulfate de calcium cristallise le premier et la saumure restante est alors transvasée dans un autre parc où l'on poursuit l'évaporation jusqu'à la cristallisation du chlorure de sodium qui est alors récupéré. Si l'on s'attache à l'exploitation d'autres substances, l'évaporation est continuée dans un autre parc et l'on traite les résidus (récupération du brome et du magnésium par exemple).

Le sel est employé brut par l'industrie; il n'est raffiné que pour la consommation alimentaire.

Le sulfate de calcium récupéré peut être utilisé après addition de chlorure de calcium dans l'industrie du plâtre.

La production de chlorure de sodium marin peut être évaluée à 10 millions de tonnes par an, ce qui représente un chiffre d'affaires de 60 millions de dollars.

B. Extraction du brome

Le brome est un élément presque exclusivement marin. Il fut découvert en 1825 par BALARD, chimiste Français, et a trouvé de gros débouchés dans l'industrie de la photographie. 75 000 tonnes de brome sont extraites annuellement de l'eau de mer, pour un montant de 23 millions de dollars.

Pour sa production, on utilise généralement les saumures des salins où le brome a été concentré environ 20 fois. Ces saumures sont saturées de chlore, acidifiées à l'acide sulfurique et envoyées dans une série de colonnes où elles sont mises en contact systématique avec l'air.

L'excès de chlore contenu dans l'air bromé sortant des colonnes est éliminé par une solution de soude diluée qui est recyclée avec les saumures.

Les solutions obtenues sont ensuite acidifiées à l'acide sulfurique et soumises à la distillation pour en séparer le brome, tandis que les solutions épuisées contenant encore du brome sont recyclées.

Les eaux débromées peuvent éventuellement être utilisées pour l'extraction des sels de magnésium.

C. Extraction du magnésium

L'extraction du magnésium de l'eau de mer a une grande importance, surtout aux États-Unis, puisque 300 000 tonnes de ce métal sont produites annuellement à partir de la mer, ce qui représente 65 millions de dollars.

Elle se fait classiquement à partir des saumures des marais salants qui renferment alors 6% de chlorure de magnésium. Après une nouvelle évaporation on sépare le chlorure de sodium restant, puis les sulfates se déposent et la solution finale de chlorure de magnésium est séchée et déshydratée. Ce procédé est naturellement saisonnier et exige des possibilités de stockage de saumure considérables pour réaliser une exploitation continue.

Une solution beaucoup plus élégante a été adoptée à l'usine de FREEPORT. Elle repose sur la réaction de précipitation du magnésium de l'eau de mer sous forme d'hydroxyde $Mg(OH)_2$ par la chaux éteinte, tandis que le chlorure de calcium reste en solution.

Dans cette usine, l'eau de mer est pompée à travers des filtres et refoulée dans un bassin de floculation sans évaporation ni concentration: d'autre part, les coquilles d'huitres que l'on trouve en abondance sur les plages voisines sont lavées, broyées et calcinées pour produire de la chaux qui est hydratée et ajoutée dans le flocculateur. L'hydrate insoluble $Mg(OH)_2$ est épaissi et filtré. La magnésie obtenue subit alors directement des procédés de réduction thermique ou est transformée en chlorure de magnésium qui est électrolysé après déshydratation.

Cette gigantesque usine, très caractéristique des solutions industrielles hardies d'outre-atlantique, grâce à des conditions géographiques exceptionnelles est parvenue à un prix de revient défiant toute concurrence.

D. Extraction de l'or.

A coté des minéraux les plus abondants de l'eau de mer, l'or en suspension colloïdale a fait bien entendu l'objet de nombreuses tentatives de récupération.

- Après la première guerre mondiale, les Allemands organisèrent, avec le METEOR, une campagne de recherche de l'or dissous dans les eaux de l'Atlantique, afin, pensaient-ils, de payer leur dette de guerre. Mais les teneurs trouvées étaient bien trop faibles, puisqu'elles excédaient rarement 0,001 mg/tonne d'eau avec une valeur maximale de 0,044 mg/t.

- En 1935 un Australien aurait produit quelques centaines de grammes d'or, mais à perte.

- Enfin, il y a quelques années, la Compagnie DOW aurait extrait 0,09 mg d'or à partir de 15 tonnes d'eau de mer.

Lorsque les procédés chimiques d'extraction seront au point ou rentables, il sera possible de récupérer un bien plus grand nombre d'éléments dissous, notamment le bore, le molybdène, le deutérium, le thorium, l'uranium. Les Britanniques par exemple ont mis au point une méthode d'extraction de ce dernier métal qui reste pour l'instant purement expérimentale.

E. Poches sursalées

Avant de conclure cette étude rapide sur les exploitations de minéraux dissous dans l'eau de mer, il faut dire que dans le fond de certaines cuvettes plus ou moins liées à des phénomènes volcaniques ou d'effondrement, on a noté des poches d'eaux anormalement salées et parfois à température élevée, notamment en Mer Rouge, devant Jeddah, par - 2 000 mètres de fond où la salinité est dix fois supérieure à la normale et où la température atteint 60°C.

On y a observé des teneurs élevées en fer, cuivre, manganèse, plomb et zinc.

Des Sociétés américaines, comme la KENNECOTT COPPER, s'intéressent à cette question, et il n'est pas impossible qu'un jour de telles saumures naturelles soient utilisées.

LES DEPOTS MEUBLES NON CONSOLIDES

Les dépôts meubles, nous l'avons vu, forment une couverture plus ou moins épaisse d'éléments très variés (sables, graviers, vases, boues, nodules) qui coiffe une grande partie du substratum rocheux du fond de la mer. Suivant leurs origines, on peut les classer en :

- Sédiments détritiques qui tirent leur origine directe de l'érosion des continents et qui ont le mieux résisté à l'attaque des milieux ambiants successifs. On les trouve sur les plateaux continentaux, mais ils peuvent être transportés jusque dans les plaines abyssales où le diamètre des particules devient généralement très fin.

- Sédiments biologiques constitués par l'accumulation d'organismes vivants : coquilles, boues coralliennes, etc...

- Sédiments d'origine chimique ou biochimique représentés par les nodules et concrétions variés.

I. Les gisements

Du point de vue exploitation, il faut considérer successivement:

- Les gisements de plages actuelles
- Les placers off shore du plateau continental
- Les matériaux pour Travaux-Publics
- Les concentrations biologiques
- Les boues abyssales
- Les concrétions et nodules

A. Les gisements de plages actuelles.

Les gisements de plages actuelles sont souvent exploités depuis fort longtemps. Ils font la transition entre les gîtes détritiques terrestres et marins.

On y trouve des concentrations de minéraux les plus divers : or, platine, argent, magnétite (fer), minéraux du titane (ilménite, rutile etc...), zircon, chromite, monazite, colombite etc... et bien sûr le quartz, qui constitue l'élément principal de nombreux sables et graviers.

A l'exception du quartz, les gisements ceinturent le plus souvent les anciens boucliers ou régions fortement minéralisés et soumis à une érosion intense, c'est à dire les régions de climat tropical ou celles bordées par un relief côtier important : Afrique, Inde, Ceylan, Madagascar, Australie, Brésil, Alaska, Asie du Sud Est, etc...

L'Australie par exemple fournit 90% du rutile et 60% du zircon produits dans le monde à partir des sables de plages.

Ces sables noirs sont généralement considérés comme provenant des roches ignées de l'intérieur et peuvent former des bancs pratiquement purs de 30 cm d'épaisseur.

L'exploitation se fait par drague suceuse, après que la terre de surface et le recouvrement stérile, s'ils existent, aient été décapés au bull-dozer. La concentration est opérée en deux stades:

- une préconcentration sur le chantier par voie humide, dans une installation mobile pour séparer l'ensemble des sables noirs.

- le préconcentré est ensuite transporté à une usine de finissage travaillant à sec et séparant par des procédés magnétiques et électrostatiques les constituants des sables noirs.

B. Les placers off shore

Les placers off shore sont d'anciennes plages ou chenaux iluviatiles, actuellement ennoyés par la dernière transgression post-glaciaire. Il s'agit de sables et graviers présentant une certaine teneur en minéraux denses appelés également "minéraux lourds", généralement intéressants du point de vue minier.

Souvent ces placers off shore sont reconnus à partir d'indices cotiers, mais il ne faut pas les confondre avec les gisements de plages, car leur exploitation est elle purement marine.

Actuellement de très nombreux minéraux sont exploités dans les gisements off shore du plateau continental.

1. Les sables à minéraux lourds

Les sables à minéraux lourds, minéraux du titane, zircon, monazite, terres rares, thorium, sont exploités en Amérique, Asie et Australie. Il est impossible de connaître leur production exacte, car les statistiques englobent malheureusement la production des sables de plages.

2. L'étain

L'étain (cassitérite) se trouve principalement en Indonésie (devant les îles de Bangka, Billiton, Singkep, toutes au Sud Est de Singapour) et en Thaïlande (île de Phuket: AOKAM TIN Ltd et TONGKHAH HARBOR DREDGING Co.), et accessoirement en Malaisie.

L'Indonésie a été le premier pays à exploiter des gisements off shore de quelque importance. L'Etat indonésien possède neuf dragues à godets opérant par des fonds marins, jusqu'à -30 mètres et jusqu'à 10 km des côtes. Les teneurs d'exploitation vont de 150 grammes d'étain par m³ à plus de 1 000 g/m³.

En 1965, 10 000 tonnes de concentrés d'étain (24,2 millions de dollars) ont été extraites, pour l'ensemble de la production off shore mondiale.

Des projets d'extraction de sables stannifères devant la Cornouaille anglaise sont à l'étude, mais il ne semble pas que les possibilités puissent être comparées à celles de l'Asie du Sud-Est.

De même, le B.R.G.M étudie les dépôts meubles de l'estuaire de la Vilaine qui semblent présenter des concentrations intéressantes de cassitérite, malheureusement peu étendus.

3. Les diamants

Les diamants sont exploités au large du Sud Ouest africain, au Nord de l'embouchure de l'Orange, par des fonds de 15 à 30 mètres. Les concessions s'étendent maintenant sur près de 400 km de longueur. Ce sont les seuls gisements de ce genre à être prospectés et exploités dans le monde.

En 1961 la MARINE DIAMOND Corp. (Sam Collins) démarra la prospection, et la première opération d'exploitation eut lieu en 1962. En 1963 la MARINE DIAMOND s'associa avec la DE BEERS. Cette année là, la production totale a dépassé 1,7 millions de dollars en pierres de joaillerie, à partir de 300 000 m³ de graviers.

A cette époque, le prix de revient du m³ était de 3,10 dollars, avec un bénéfice de près de 4 dollars par m³. Mais les conditions de travail très sévères (houles très fortes et tempêtes fréquentes) occasionnèrent la perte de plusieurs unités minières et les opérations devinrent déficitaires : en 1965 on notait un déficit de 2,65 dollars par m³ pour un volume traité de 170 000 m³ de graviers et une production de 195 000 carats.

Depuis, la production a été sujette à de grandes fluctuations; le "Diamanktus", bateau destiné à extraire 5 300 m³ à l'heure, fut retiré du service après seulement trente mois d'utilisation. Actuellement, il n'y a plus que deux unités en opération (Barge III et Colponton). Une troisième (Pomona) fut lancée en mars 1967, mais elle fut endommagée lors d'une tempête dès son premier essai.

La production record a été de 2 000 diamants en un seul jour. La production totale pour 1965-1966 a été de 8,9 millions de dollars. Actuellement elle serait encore déficitaire par rapport aux frais engagés dans l'opération.

Outre la "MARINE DIAMOND" déjà citée, d'autres Sociétés ont demandé des concessions : la "SOUTHERN DIAMOND" (une autre affaire Collins), la "TIDAL DIAMONDS" (De Beers et P. Getty), la "TERRA MARINA" (la seule où la groupe DE BEERS n'ait pas encore pris d'intérêt).

Des recherches analogues ont été menées, rapidement il est vrai, sur la côte Est de l'Afrique Australe, et même au large des Guyanes ; elles n'ont donné aucun résultat. De l'avis des experts, les conditions très particulières qui existent devant la côte du Sud-Ouest africain semblent très difficiles à retrouver ailleurs dans le monde.

Malgré leurs difficultés actuelles, les exploitations de diamants Sud africaines restent une des activités minières off shore de pointe.

4. L'or et le platine

Les gisements off shore d'or et de platine, parfois associés à l'argent sont principalement localisés devant l'Alaska. 39 permis ont été déjà accordés, dont 27 dans la région de Nome, 2 à Kodiak et 5 à Juneau.

Les principales Sociétés intéressées sont la SHELL OIL C^o et la WILLIAM HYDRAULICS Inc. d'Oakland. En dehors des exploitations littorales, il ne semble pas que le stade des prospections soit dépassé. Dans la région de Nome, malgré une tranche d'eau ne dépassant pas 20 mètres, l'épaisseur excessive du recouvrement stérile paraît poser quelques problèmes.

5. Le Fer

Des sables très riches en magnétite ont été découverts en 1960 en plusieurs zones littorales du Sud de l'île Kyushu (Japon). Dans la seule baie d'Ariake (YAWATA IRON AND STEEL C^o) les réserves ont été évaluées à 1,7 billion de tonnes de sables minéralisés dont 40 millions de tonnes sont favorables à une extraction immédiate.

La composition moyenne de ces dépôts est de 56 % de fer, 12 % d'oxydes de titane et 0,26 % de phosphore. L'exploitation a lieu à 1 mille des côtes par des fonds inférieurs à 18 mètres. En 1962 36 000 tonnes avaient été extraites, rapportant 3,6 millions de dollars. Au cours de 4 dernières années, plus de 7 millions de tonnes ont été traitées.

L'avantage de ces exploitations réside dans la qualité du minerai de fer (magnétite Fe_3O_4) qui permet une fabrication de fonte à proximité immédiate du site de production : le prix de revient d'une tonne est de 40 dollars, au lieu de 70 dollars pour une préparation métallurgique dans les conditions ordinaires.

Tout récemment, des placers de magnétite ont été reconnus en Nouvelle-Zélande, au large de la côte occidentale de l'île du Nord.

Tous les placers actuellement en exploitation cités ci-dessus sont encore situés très près des côtes et sous des tranches d'eau ne dépassant pas 20 à 30 mètres.

C. Les Matériaux pour Travaux-Publics

Les matériaux pour travaux-publics exploitables en mer sont situés sur le plateau continental et sont de deux types, puisqu'il est possible de récupérer des sables et des graviers ou des accumulations coquillères.

1. Sables et graviers

D'importantes accumulations de sables et graviers existent en de nombreux endroits du plateau continental, souvent à proximité des côtes. L'extraction par dragage ou pompage de ces matériaux est essentiellement localisée aux U.S.A, dans les régions portuaires et les Grands Lacs, et en Grande-Bretagne, dans la Manche, où les Anglais ont localisé 68 000 km² de sables et de graviers directement récupérables. Ils utilisent des chalands de 500 tonnes chargés en deux heures.

Pour 1966, l'ensemble de la production mondiale a été estimé à 75 millions de m³ (100 millions de dollars).

En France, de petites exploitations artisanales draguent certaines accumulations sableuses très près des côtes ou devant l'embouchure de certains estuaires, en Bretagne. Un inventaire précis des richesses françaises en sables et graviers marins est en cours.

Il ne fait aucun doute que l'exploitation de ces sédiments va prendre une importance énorme dans quelques années.

2. Accumulations coquillières

Les accumulations coquillières sont fréquentes en certains endroits du plateau continental. L'estimation globale pour 1965 est de 15 millions de m³ extraits (30 millions de dollars). La production est encore relativement peu développée et sert à la fabrication de la chaux et des ciments:

- Aux U.S.A., dans la baie de San Francisco et dans le golfe du Mexique, les dépôts peuvent avoir 6 mètres d'épaisseur et sont récupérés, soit par dragage, soit par succion. Les fonds ne dépassent pas 20 mètres. En baie de San Francisco, les coquilles sont naturellement mélangées à de la vase silicatée, et le mélange qui est pompé, permet la fabrication directe du ciment.

-En Islande (baie de Faxa), jusque par des fonds de 40 m., les dépôts auxquels sont mélangés des débris de tufs basaltiques sont renouvelés par les tempêtes. La drague-suceuse montée sur un bateau de 1 100 tonnes pompe 8 000 tonnes d'eau à l'heure avec 3 à 5 % de solides.

- Aux Hawaï et aux Bahamas une production existe également.

Tout comme les sables et graviers du plateau continental, ces accumulations coquillières sont promises dans un proche avenir à une exploitation intensive.

Citons enfin le cas du "maërl", concrétionnement dû à une algue calcaire (Lithothamnium calcareum), qui se produit en certains endroits bien localisés des côtes de Bretagne.

A Concarneau, aux îles de Glénan, en Côtes du Nord, le maërl est exploité pour l'amendement des sols pauvres en calcaire qui caractérisent cette région. En 1965, la production était d'environ 26 000 tonnes. Des études détaillées concernant la cartographie de ces gisements et le taux de reproduction de cette algue ont déjà été commencées.

D. Les concentrations biologiques

Il est connu que de nombreux animaux et végétaux marins ont la propriété de concentrer certains éléments dissous, souvent dans une proportion considérable. C'est ainsi que l'iode est extrait de certaines algues qui le concentre jusqu'à une teneur 100 000 fois plus élevée. Mais d'autres organismes offrent des concentrations intéressantes: ainsi les squelettes de poissons donnent des enrichissements en plomb (x $20 \cdot 10^6$), en zinc (x 1 000 000), en cuivre (x 1 000 000), en vanadium (x 280 000). Signalons également la présence de cobalt dans les carapaces de homards.

Certaines sociétés américaines s'efforcent actuellement de localiser de telles concentrations, pour en envisager l'exploitation.

E. Les boues abyssales

Nous avons étudié très précisément les boues abyssales dans un chapitre précédent.

Au point de vue possibilité d'exploitation, il faut savoir que lorsque les circonstances techniques et économiques s'y prêteront, il sera peut être possible de récupérer les argiles rouges, soit comme matériau brut (argile), soit pour en extraire de l'Alumine, du cuivre, du nickel, du cobalt, des terres rares, etc... Rappelons que le tonnage de ces argiles est évalué à 10^{15} tonnes.

De même les boues siliceuses pourraient servir de matière première pour la silice et constituer la base de matériaux nouveaux de construction, d'isolants thermiques et acoustiques, de filtres et adsorbants les plus divers. Leur tonnage total atteint 10^{13} tonnes.

Néanmoins, l'exploitation des boues abyssales n'est pas encore sérieusement envisagée.

Dans un autre ordre d'idées, sur la ride médioocéanique du Pacifique Sud, on a ramassé des échantillons de sédiments meublés enrichis en fer, manganèse, cuivre, chrome, nickel, plomb etc.. qui pourraient se prêter à une exploitation. Dans cette région, le flux de chaleur dégagé des profondeurs de la terre est particulièrement élevé, indice d'exhalaisons volcaniques.

F. Concrétions et nodules

Les concrétions sont localisées dans les zones où le taux de sédimentation est très faible, permettant par là même aux précipitations de se développer en toute tranquillité à partir d'un germe initial. D'autres facteurs plus complexes concourent également à leur formation : topographie sous-marine, courants, fumerolles et émanations volcaniques sous-marines...

1. Phosphorites

Les gisements les plus connus de phosphorites sont situés devant les côtes de Californie du Sud (U.S.A et Mexique). Ils sont relativement peu profonds : entre 60 et 200 mètres. On pense que les gisements californiens sont de l'ordre de 1,5 billions de tonnes de dépôts phosphatés, dont 10 % seraient facilement exploitables. Cette évaluation, certainement très approximative, représenterait une réserve mondiale de 300 ans sur un taux d'extraction annuel de 500 000 tonnes.

Cependant les industriels hésitent encore à se lancer dans une telle entreprise. Une tentative d'exploitation en 1962-1963 s'est soldée par un échec. Selon les thèses officielles, l'arrêt des dragages aurait été la conséquence du travail dans une zone de décharge de munitions déclassées, exposée de surcroît aux exercices de tirs de l'U.S Navy. La compagnie ayant réussi à se faire indemniser, certains pensent que ces incidents sont survenus fort à propos, eu égard aux prix de revient excessifs auxquels semblait condamnée l'opération.

On connaît d'autres gisements, généralement plus profonds au large de la Floride-Géorgie (Blake Plateau), des Andes, de l'Argentine, de l'Afrique du Sud, de l'Australie et tout récemment de la Nouvelle-Zélande. Une exploitation rationnelle de ces gisements pose encore des problèmes sérieux, car le pourcentage d'impuretés métalliques a pour effet d'en réduire la valeur marchande.

2. Nodules de manganèse

Les nodules de manganèse sont localisés d'une manière générale au delà de 2 000 mètres de fond et sont très abondants dans l'Océan Pacifique.

Toutefois, un intéressant gisement a été découvert dans l'Atlantique, sur le Blake Plateau, par 800 à 1 000 mètres de fond. C'est à cet endroit même que pour la première fois un sous-marin océanographique, l'"Aluminaut", a été utilisé pour une reconnaissance de gisements.

On a pu montrer que les nodules de manganèse, de composition très variable selon les régions, se forment actuellement bien plus rapidement que n'augmente la consommation actuelle de manganèse. Associés à ce dernier, on y trouve en grand nombre d'autres éléments, en proportion très variable (nickel, cobalt, cuivre, molybdène, vanadium, fer etc...), mais qui nuisent dans l'état actuel des techniques à l'extraction du manganèse.

De ce fait, il ne semble pas que les conditions de rentabilité d'exploitation de nodules soient encore atteintes. La limite économique de profondeur serait de 1 600 mètres. Mais sous l'influence de certains facteurs, elle pourrait atteindre rapidement les fonds de 4 000 à 5 000 mètres.

C'est ainsi que la KENNECOTT COPPER a apporté en juillet 1967 un élément nouveau quant à l'utilisation de ces nodules. Elle a mis au point un procédé les employant pour combattre la pollution atmosphérique occasionnée par la combustion du charbon, permettant par la même occasion la récupération du manganèse sous forme de sulfate et des autres métaux non ferreux qui l'accompagnent.

Quand on connaît l'importance qu'attachent les Américains aux problèmes de pollution, on peut voir là un débouché très intéressant.

Des projets technologiques concernant l'exploitation des nodules de manganèse sont très avancés aux U.S.A. Leur tonnage estimé à ce jour est de 10^{12} tonnes. La valeur d'une tonne récupérée varierait de 2,30 dollars par 300 mètres de fond à 5 dollars par 6 000 mètres.

3. Baryte

La baryte, ou sulfate de baryum, est draguée en de rares endroits sous forme de concrétions ou de fins cristaux, par des profondeurs allant de 300 à 1 200 mètres (Ceylan, îles Kai en Indonésie, côte sud de Californie). Cette substance ne paraît pas avoir une extension potentielle très importante, mais elle pourrait trouver un usage commercial comme ingrédient dans les boues de forage ou dans le raffinage du sucre.

4. Glauconie

La glauconie est parfois très fréquente sous forme de grains verts de silicate complexe hydraté, sur la marge continentale, à des profondeurs variant de 10 à 1 800 mètres. On en trouve par exemple en Californie, à l'Ouest de l'Amérique du Sud, en Afrique occidentale, Nouvelle-Zélande, Chine, au Japon et au Portugal. Elle pourrait être exploitée comme fertilisant à cause de sa teneur en potassium (4 à 9 % de K_2O)

II. Les Méthodes d'exploitation

Etant donné ce qui vient d'être dit, l'exploitation des dépôts meubles non consolidés du fond des océans relève exclusivement à l'heure actuelle des techniques de dragages. Il s'agit en fait "de mines à mer ouverte" par analogie avec les "mines à ciel ouvert" dont l'exploitation est finalement très voisine.

Une unité d'exploitation peut être décomposée en plusieurs éléments:

- l'excavation sur le fond et la remontée des matériaux.
- le triage ou l'enrichissement.
- l'évacuation des matériaux et le rejet des déchets.

Ces opérations sont plus ou moins les mêmes que celles qui sont effectuées à terre, mais le milieu marin impose certaines servitudes nouvelles que nous avons étudiées dans le chapitre traitant du travail en mer.

Les techniques d'excavation peuvent faire appel selon la nature du gisement aux méthodes mécaniques répétitives telles que pelleteuses, draguelines ou crapaud pour les matériaux friables, ou peu durs, ou granuleux; aux méthodes mécaniques continues telles que chaînes à godets, roues à godets ou trépan pour les matériaux durs ou en voie de consolidation; ou encore aux méthodes hydrauliques à jet ou à succion pour les matériaux vaseux, limoneux ou granuleux.

Ces dragues sont évidemment montées sur des supports adaptés à leur profondeur d'utilisation, et comme pour le pétrole, elles ont d'abord utilisé des bateaux classiques. Au fur et à mesure du développement de l'exploitation des dépôts non consolidés, des supports spécialement conçus pour le dragage en mer sont ensuite apparus. Il faut cependant savoir que l'on ne compte actuellement que moins de 80 unités importantes de dragage dans le monde, et que l'ensemble de cette technique fait l'objet de progrès beaucoup moins spectaculaires que ceux concernant les plateformes de forage pétrolier.

A. Dragues simples

Les draguelines conviennent dans l'état de la technique actuelle pour les fonds meubles ou semi-consolidés des grandes profondeurs. Le godet est simplement tiré sur le fond par le support de surface (bateau), rempli puis remonté.

Ce procédé très peu sélectif à le mérite de ne nécessiter que des investissements très faibles, par contre son prix

de revient assez élevé est du à la faible production horaire qui diminue évidemment avec la profondeur et qui n'atteint que dans des conditions favorables 300 m³ par heure.

B. Dragues à bennes

Les dragues à bennes preneuses, ou crapauds, sont actuellement utilisées en Thaïlande (étain), Japon (Fer), Allemagne (sables et graviers). Elles sont plus sélectives que les précédentes, et conduisent à de meilleurs résultats (jusqu'à 1 100 M³/heure). Par contre, elles ne conviennent que pour les profondeurs plus modestes (100 mètres)

C. Pelleteuses

Les pelleteuses peuvent être de simples pelles mécaniques, avec un équipement butte, placées sur une barge, ou des appareils spécialement adaptés. Dans tous les cas, leur utilisation se limite aux fonds ne dépassant pas une dizaine de mètres, mais elles peuvent par contre attaquer des dépôts relativement durs.

D. Dragues à godets

Les dragues à godets, (roue à godets ou chaîne à godets) d'un fonctionnement continu, sont communément employées pour l'exploitation des placers d'étain, en Indonésie, Thaïlande et Malaisie. Elles permettent de gros rendements horaires (1 800 m³/h) et un coût relativement faible. Leur profondeur de travail varie de 10 à 40 mètres.

Ce type de dragues nécessite un ancrage qui peut être réalisé de deux façons différentes :

- Par une grande béquille enfoncée dans le sol marin autour de laquelle la drague pivote (type californien)
- Par des lignes d'ancrage.

Ces dragues ont une grande puissance installée et généralement on utilise un groupe Ward-Leonar.

E. Dragues hydrauliques ou à succion

Ces dragues sont utilisées surtout pour les dépôts non consolidés et les sables et graviers. La production est très forte quand le problème de l'entrée continue d'un maximum de matériaux dans le tube de succion est résolu. Le suceur peut être muni de couteaux pour des dépôts consolidés.

Utilisés pour le moment par fonds moyens (60 mètres), des projets existent pour rendre les dragues à succion opérationnelles par grands fonds, pour l'exploitation des nodules de manganèse. Un dispositif de propulsion en profondeur du suceur sera nécessaire, de même que des caméras de télévision.

F. Drague "Airlift"

Le procédé "Airlift" utilise l'air sous pression débité à la base de l'engin, pour créer une dépression dans le tube et permettre ainsi l'ascension des matériaux dans le tubing.

Valable pour les dépôts meubles, les dragues "Airlift" ont l'avantage d'être opérationnelles par des fonds de plus de 500 mètres, mais avec un coût relativement élevé.

G. Dragues à hydrojet

Les dragues à hydrojet ont le même principe de fonctionnement que l'"Airlift" mais l'air est remplacé par de l'eau sous pression. On utilise justement la pression de l'eau pour désagréger préalablement les dépôts que l'on exploite. Elles sont destinées aux fonds moyens pour lesquels elles sont compétitives.

Voilà à l'heure actuelle les différents types de dragues qui existent. Il ne fait pas de doute que ces différentes techniques ne sont encore qu'embryonnaires, et que personne ne sait exactement ce que l'avenir réserve.

Par exemple un projet dénomé "L'extracteur mobile Submersible" se compose d'un véhicule submersible équipé d'une drague hydraulique et d'un certain nombre de trémies à minerais submersibles. Une flottabilité à peu près neutre est donnée à l'ensemble par des hélices ou par des ballasts. L'énergie est fournie par l'intermédiaire de cables à partir de navires de surface. Les trémies sont remontées à la surface et déversées dans un minéralier.

D'autres projets existent et chacun peut à sa guise imaginer les entreprises les plus téméraires.

A notre sens, il faut quand même savoir que le contrôle des opérations d'excavation au fond de la mer, du fait de leur mobilité, rend beaucoup plus difficile que pour l'exploitation pétrolière, toute tentative d'automatisation et d'emploi de robots, d'autant plus que les dépôts exploitables se trouvent généralement à de grandes profondeurs.

Etant donné les difficultés que rencontrent les pétroliers en ce domaine, on peut croire qu'il faudra encore longtemps une intervention humaine directe, pour l'exploitation des dépôts non consolidés.

Jusque par des fonds de 800 à 1000 mètres, il sera peut-être encore possible d'utiliser des plongeurs autonomes. Ensuite il faudra prévoir une gamme variée d'engins submersibles et d'engins d'excavation de fond analogues à ceux utilisés actuellement par les Travaux-Publics. Des grands progrès technologiques restent donc à faire.

En ce qui concerne le triage sur place des matériaux extraits, il n'y a rien de particulier à signaler. Les techniques sont les mêmes que celles employées à terre et sont donc très variées. L'évacuation des matériaux retenus n'est qu'un problème de transport maritime; par contre, le rejet sur place des déchets doit être contrôlé de façon à ce que les courants ne ramènent pas ces déchets sur le gisement, ce qui implique généralement d'importantes études hydrauliques.

LE SUBSTRATUM ROCHEUX IMMERGE

Puisque les plateaux continentaux appartiennent géologiquement aux continents, ils présentent les mêmes possibilités minières qu'à terre. Les gisements que l'on peut trouver sont de type continental classique (filons, amas, gîtes stratiformes), mais l'exploitation des substances minérales enfouies dans le substratum rocheux immergé des océans est pour le moment encore très aléatoire et n'existe que dans de rares cas particuliers.

Il faut en effet distinguer deux cas d'exploitation :

- Le gisement est accessible à partir des côtes par un réseau de puits et galeries classiques.
- Le gisement n'est pas accessible à partir des côtes.

I. Gisement côtier

L'exploitation de gisements sous marins côtiers ne relève pas directement des techniques marines.

On trouve ainsi actuellement des gisements exploités de fer en Finlande et à Terre-Neuve (1 700 000 tonnes par an) ; charbon en Nouvelle-Ecosse, à Taïwan, au Japon, en Turquie et en Ecosse (33 500 000 tonnes par an) et de soufre aux Etats-Unis (600 000 tonnes par an). En France, la mine de Dielette (Cotentin) qui s'engageait sous le plateau continental a été fermée depuis peu.

II. Gisements enfouis off shore

A notre connaissance, aucune exploitation de gisement enfoui off shore n'existe, et aucun projet sérieux n'a même été entrepris.

Mais il ne fait pas de doute qu'un jour des techniques tout à fait originales et encore insoupçonnées permettent leur exploitation, quand les circonstances économiques seront favorables. Il faut bien dire, en effet, que le peu de rapport des opérations minières classiques décourage actuellement les esprits les plus aventureux qui pourraient envisager d'implanter par quelques centaines de mètres de fond, sous une voûte de béton, un carreau de mine et des puits, et de se lancer à l'assaut des roches abyssales.....

LAROUSSE vient de publier un ouvrage de 600 pages consacré aux Fonds Marins.

SCIENCE & VIE vient de sortir un numéro spécial consacré à la conquête des océans.

Il n'est pas rare de voir des libraires réserver des vitrines entières à l'océanographie.

Tous les mois, une revue scientifique au moins publie un article relatif au domaine marin.

Ces différentes manifestations de la réalité de la pénétration de l'homme dans le milieu hostile des océans n'ont en effet pas comme seul but de satisfaire la curiosité du Grand Public mise en éveil par la publicité faite autour des exploits de quelques navigateurs solitaires...

Amorcée par la recherche et l'exploitation des gisements pétroliers immergés, la MISE EN VALEUR DES SUBSTANCES MINERALES DU DOMAINE MARIN prend actuellement une ampleur sans limites.

L'homme avait fondé de grands espoirs sur la conquête des astres proches de la terre. Mais la lenteur du développement de la technologie spatiale et les difficultés à rendre envisageable une utilisation économique des richesses potentielles extérieures à notre Globe l'ont conduit à entreprendre un effort nouveau vers les espaces bleus des océans, pour satisfaire une demande en matières premières en progression constante.

Il est significatif en effet de savoir que les engins océanographiques les plus évolués proviennent en droite ligne des ateliers des grandes sociétés d'aviation américaines travaillant pour l'industrie spatiale.

.../...

Des astronautes américains reconvertis en aquanautes, dirigent maintenant des expériences de plongée profonde.

Mais loin d'être concurrentes, ces deux intrusions de l'homme en milieux hostiles différents servent la science et les progrès techniques, et ont déjà des résultats qui profitent à chacun de nous.

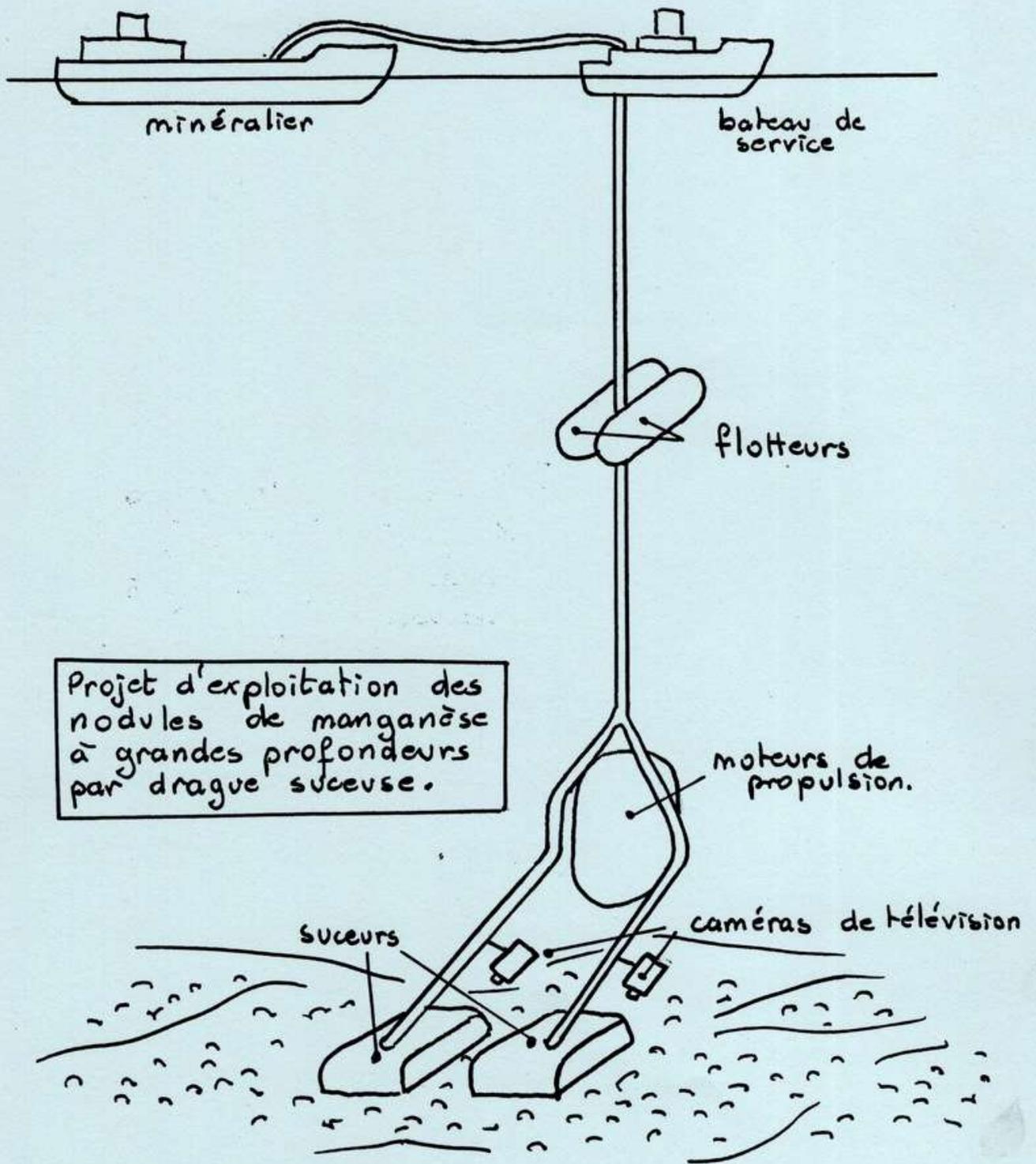
Des satellites de télécommunication aux nodules de manganèse dépollutionneurs, il ne faut pas voir en effet la seule recherche du prestige ou du rapport financier, mais l'expression du laborieux travail de l'homme à vaincre les éléments qui lui sont les plus défavorables.

Beaucoup a déjà été fait pour la conquête des océans.

Beaucoup reste à faire pour réaliser UNE MISE EN VALEUR DE LEURS SUBSTANCES MINÉRALES.

Et il ne fait pas de doutes que les réalisations futures en ce domaine pourront laisser rêveurs les esprits les plus imaginatifs de maintenant.

Douai, Avril 1969.



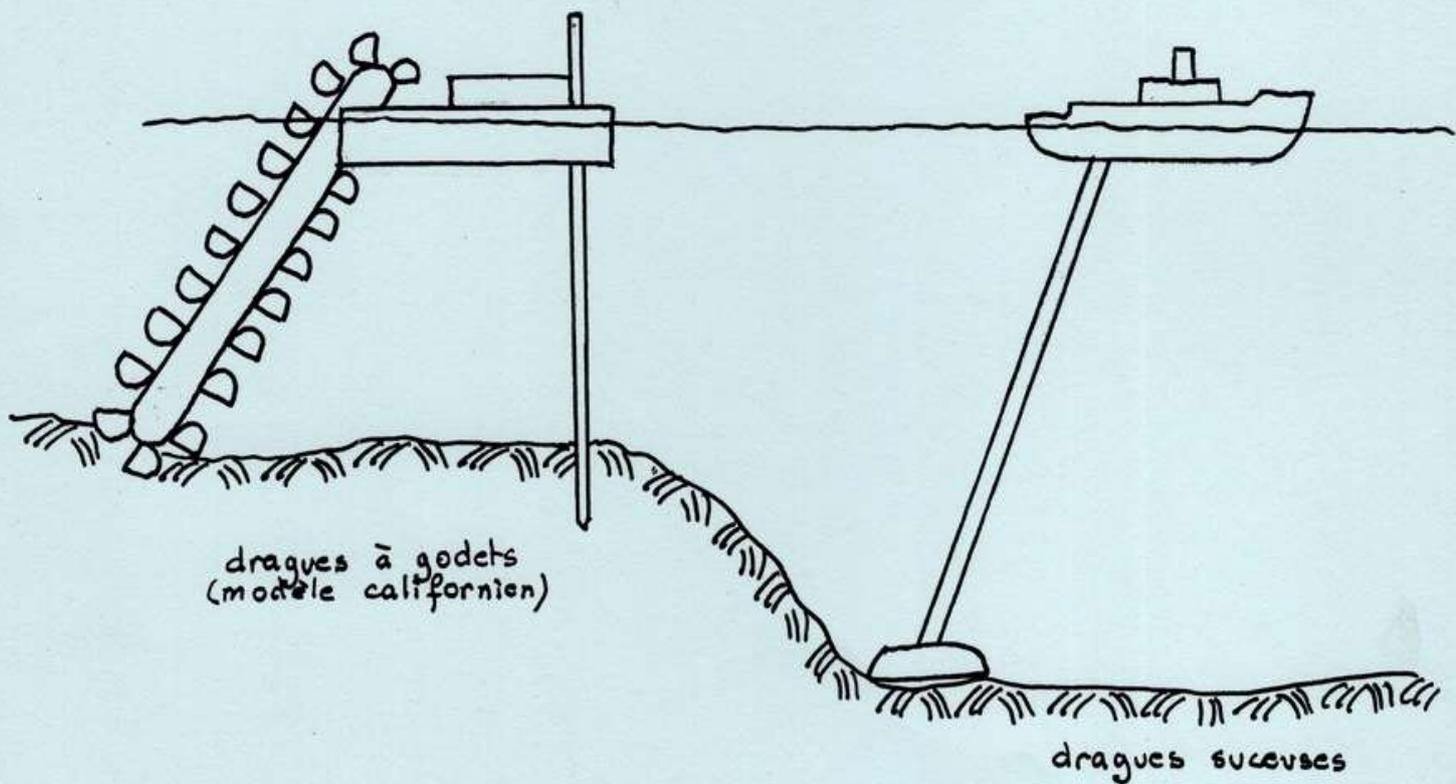
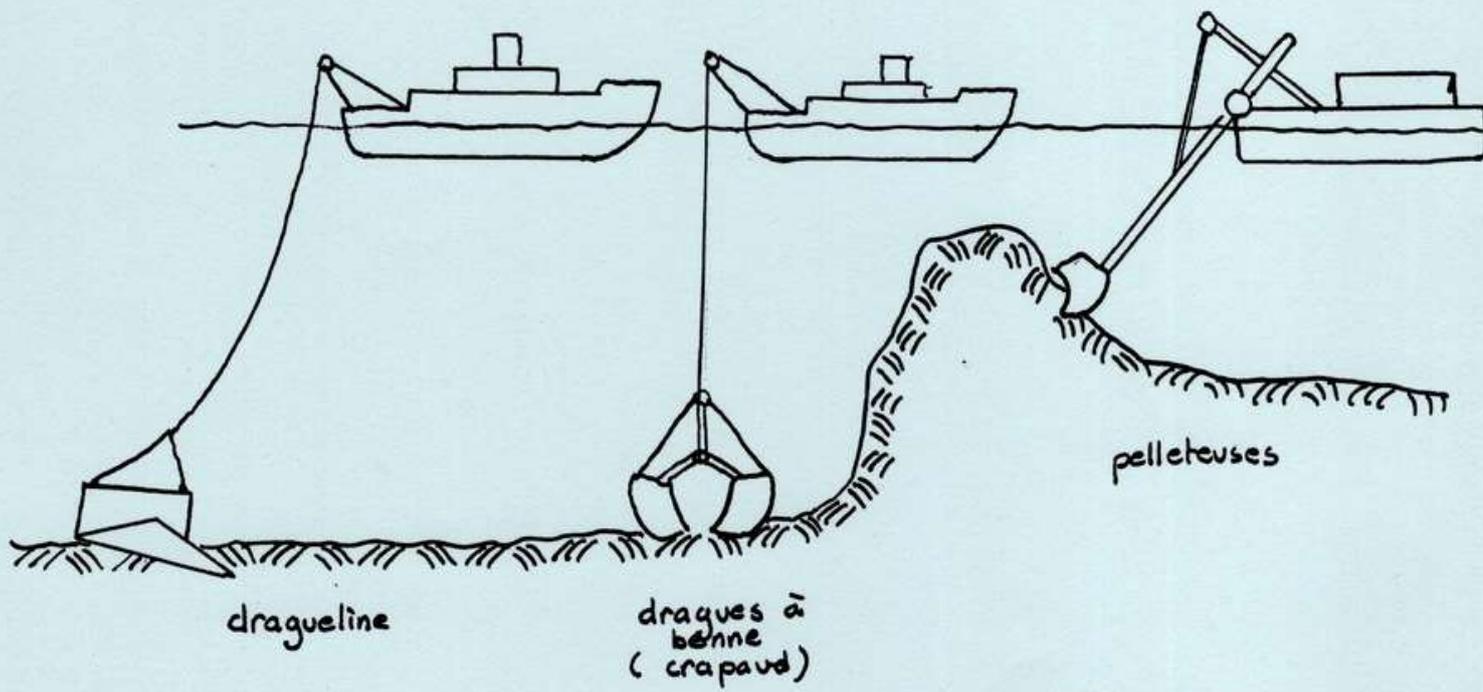


Fig. 16 Principaux types de dragues

Fig. 9. Exemple de benne-photo donnant un échantillon ponctuel des dépôts superficiels. La caméra photo associée permet de prendre un cliché du fond à 4 m avant la prise de l'échantillon.

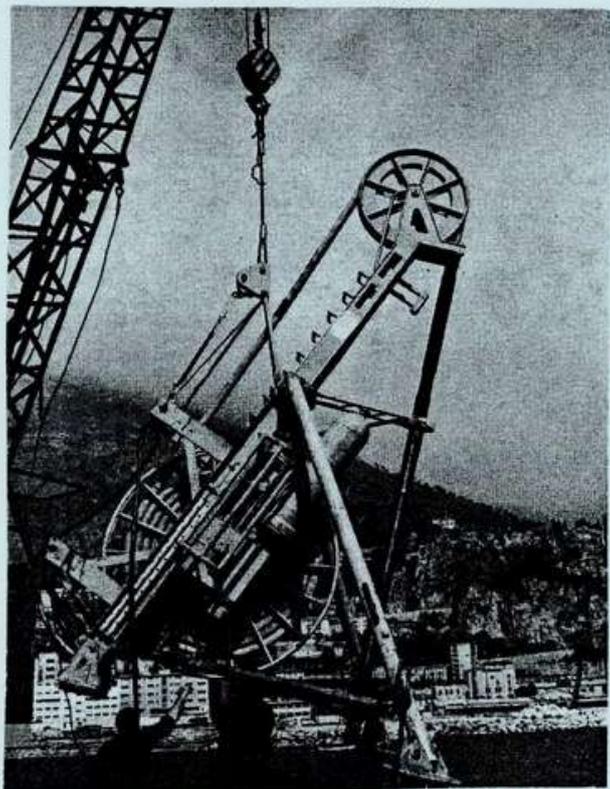
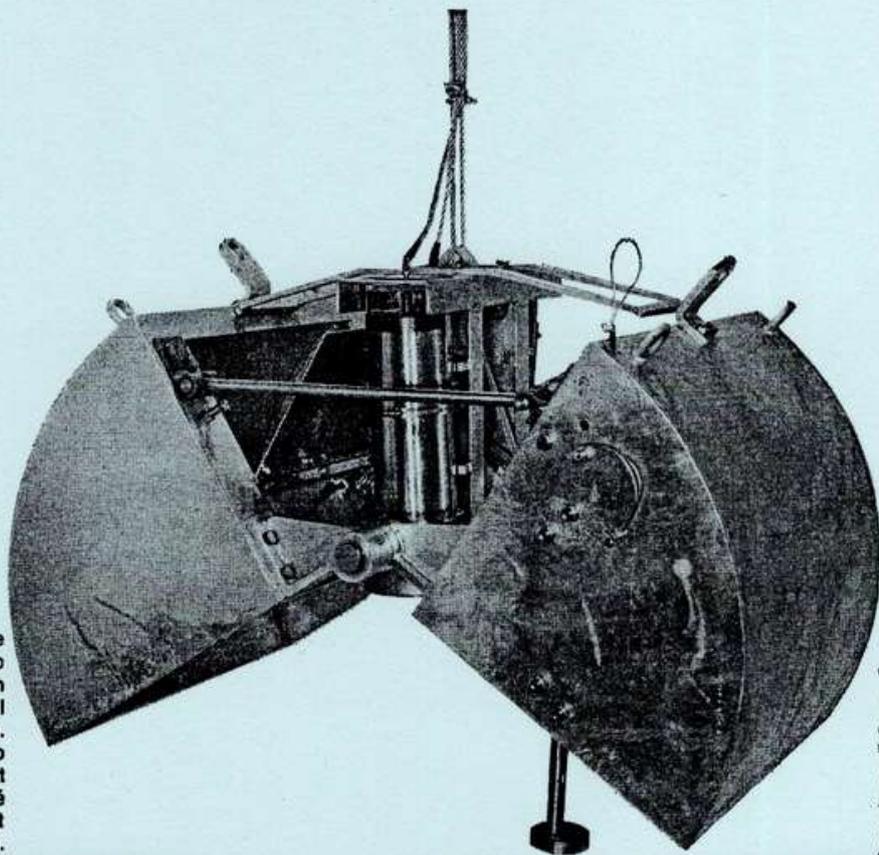
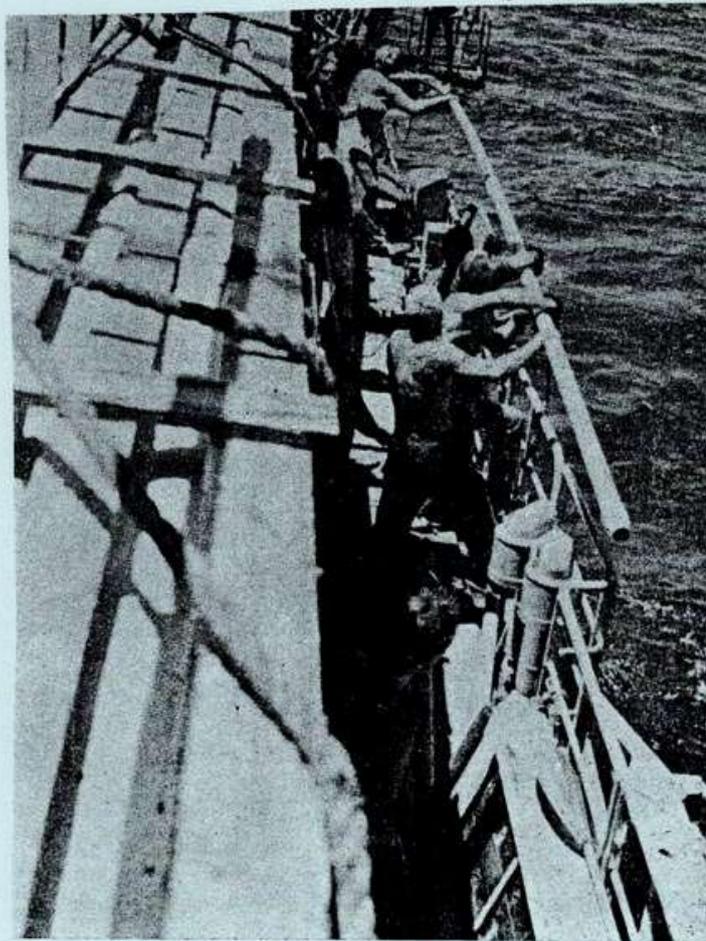


Fig. 4. — L'électro carottier sous-marin ECSM 2 : Appareil de carottage des fonds marins mis au point par l'Institut Français du Pétrole permettant le prélèvement, à partir du fond de la mer, d'un échantillon de 1 m de longueur et de 90 mm de diamètre à la cote désirée jusqu'à une profondeur de 40 m dans le sol sous une hauteur d'eau maximale de 300 m. Il est entièrement télécommandé depuis la surface, le carottage s'effectuant à l'aide d'une électroforeuse reliée au bati support par une conduite flexible.
L'ensemble pèse environ 6 tonnes et sa mise en œuvre ne nécessite pas un navire spécialisé.

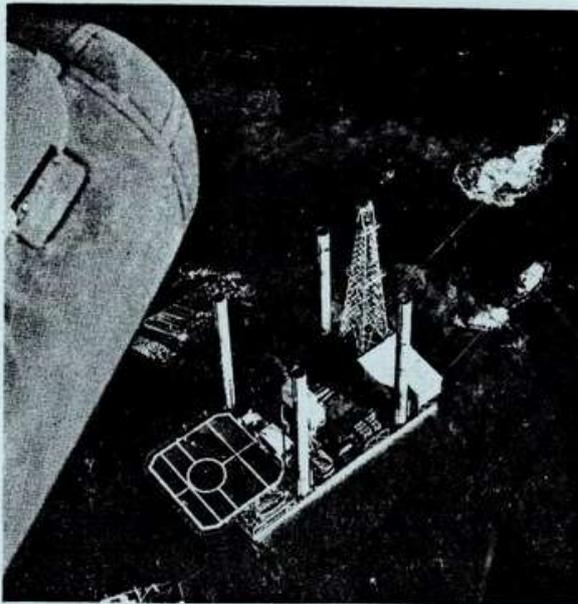


RECUPERATION D'UN CAROTTIER

Il s'agit d'un carottier à piston Kullenberg destiné aux grands fonds (— 4 000 mètres). Ce carottier peut traverser une vingtaine de mètres de vase.



Plateforme
autoélévatrice Roger Buttin



Plateforme "Adma
Enterprise"

Plateforme
autoélévatrice Ile de France
(FORATIER)



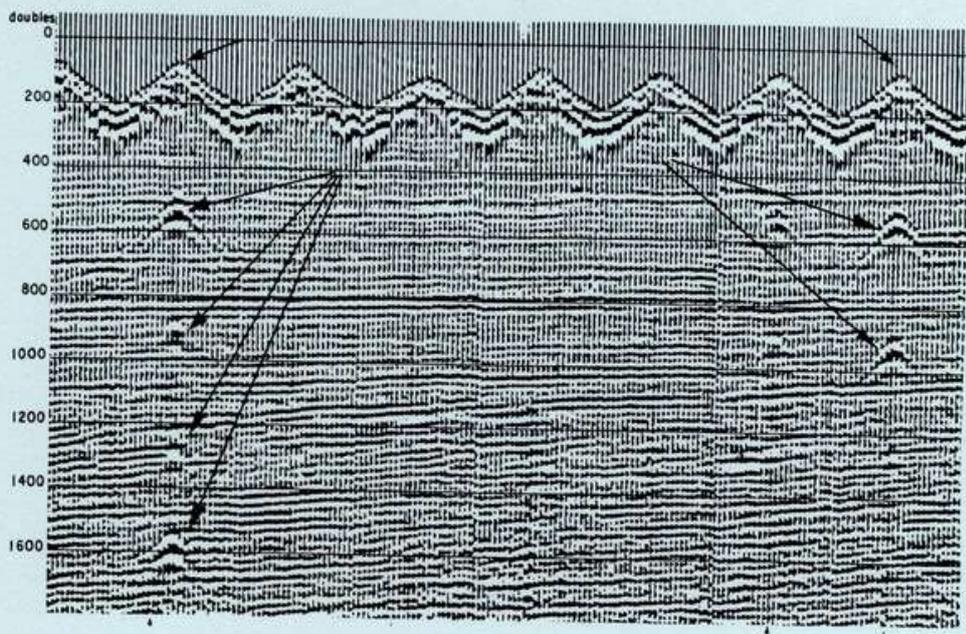


Fig. 5. — Enregistrements sismiques avec effet « bulle »



Fig. 3. — Magnétomètre à pompage optique fixé sous la carlingue de l'avion porteur
(Photo Institut Géographique National)

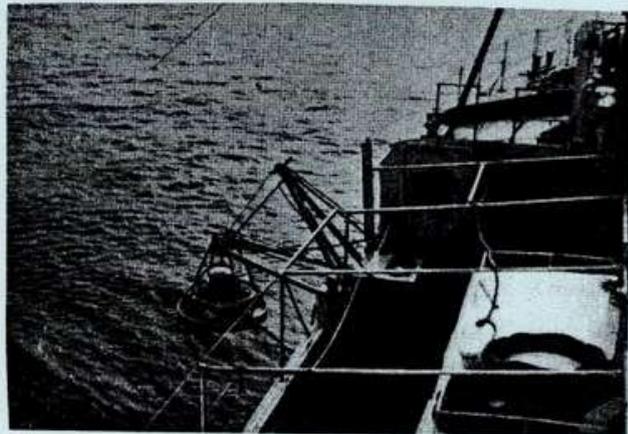
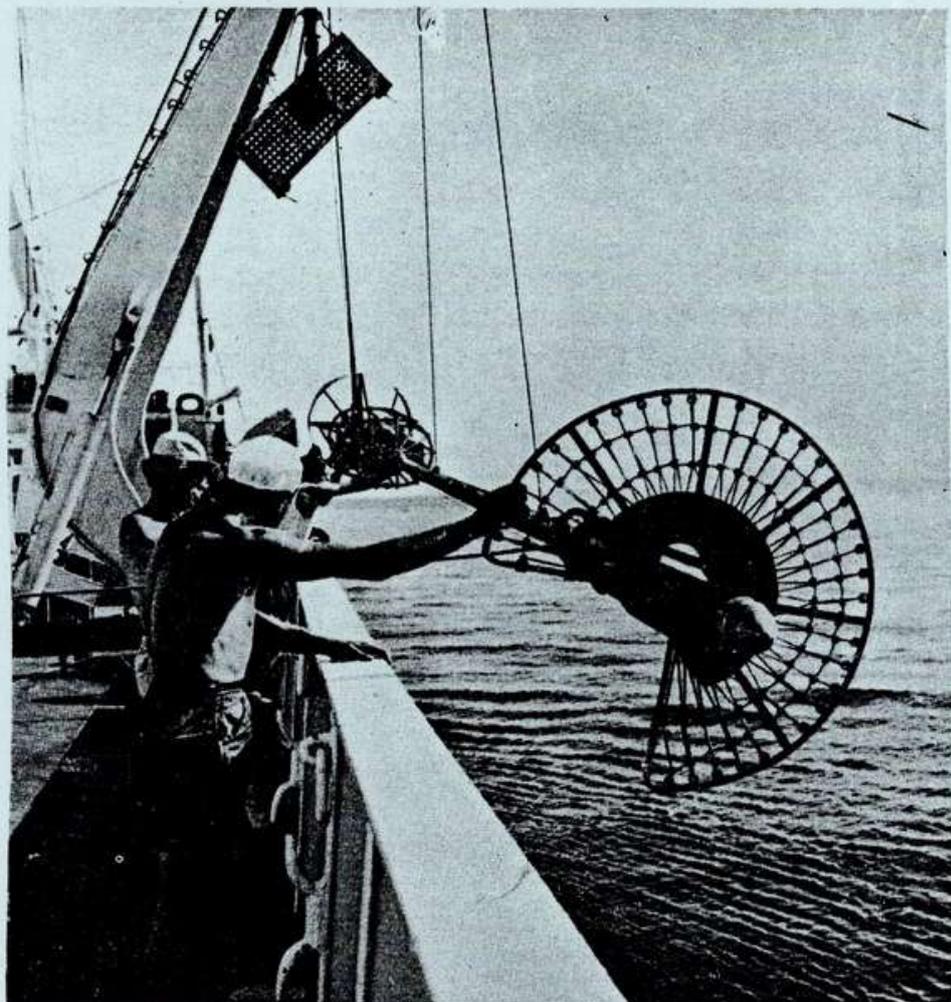


Fig. 2. — Gravimètre prêt pour l'immersion (Photo X)



SONDE DE RESISTIVITE EN COURS DE MISE A L'EAU

L'appareil possède sa propre source d'énergie et permet d'obtenir jusqu'à 80 profils de résistivité sans qu'il soit besoin de le remonter. Il a été mis au point par M. Kermabon, directeur de la Comex.

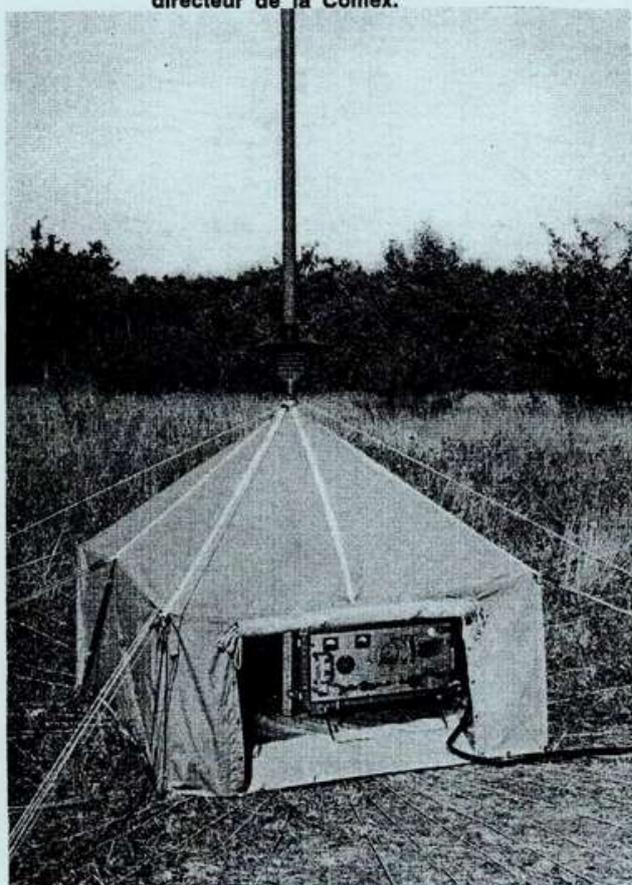
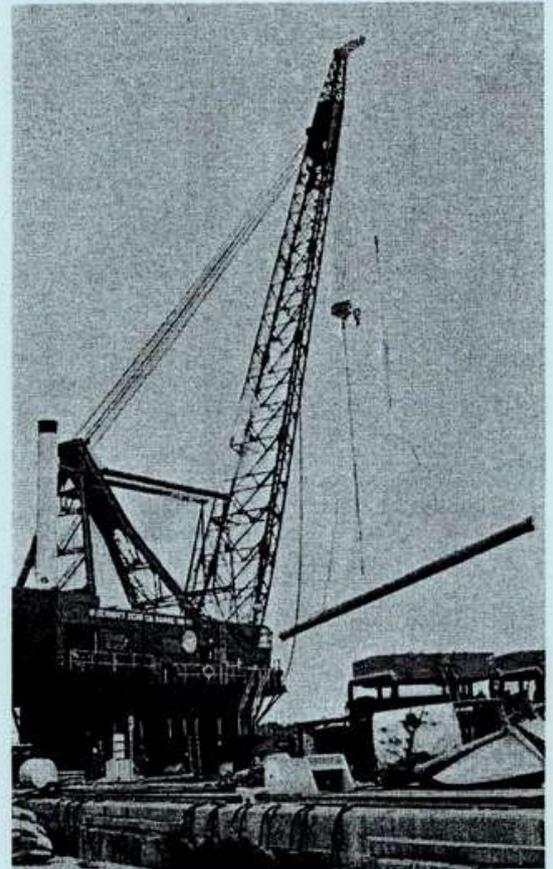
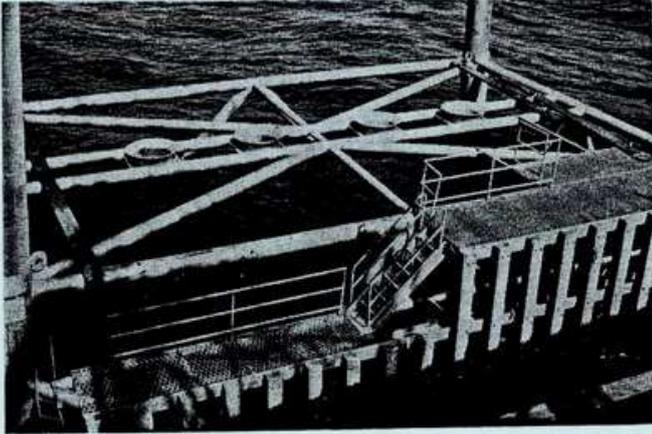
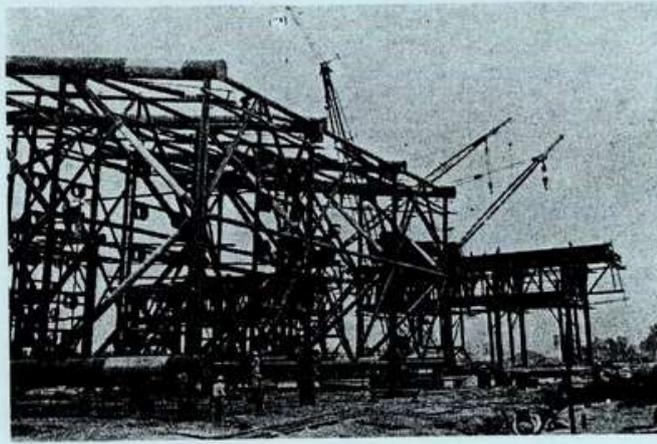
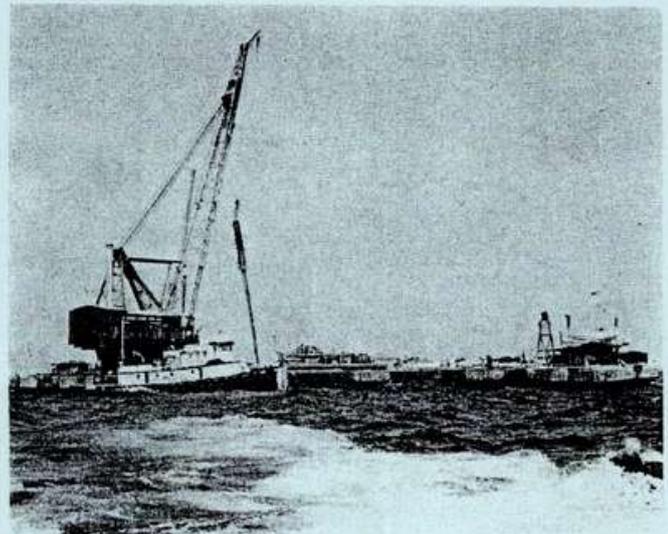
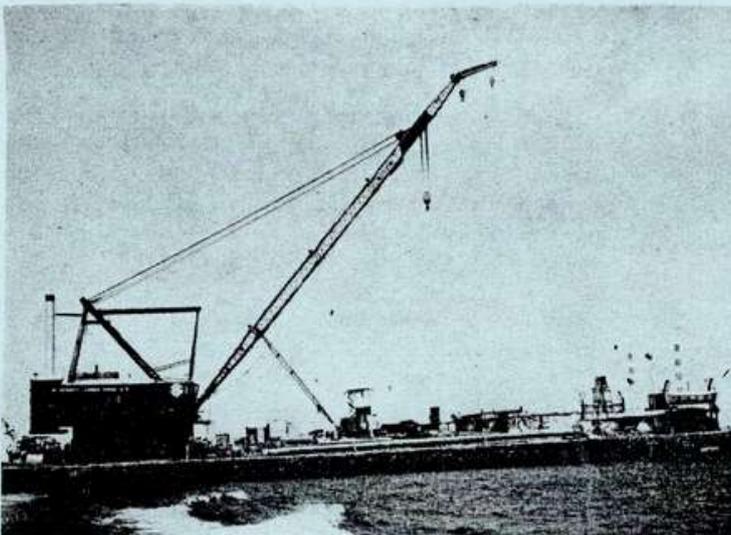


Fig. 7. — Station émettrice Toran (Photo SERCEL)

Structures fixes.

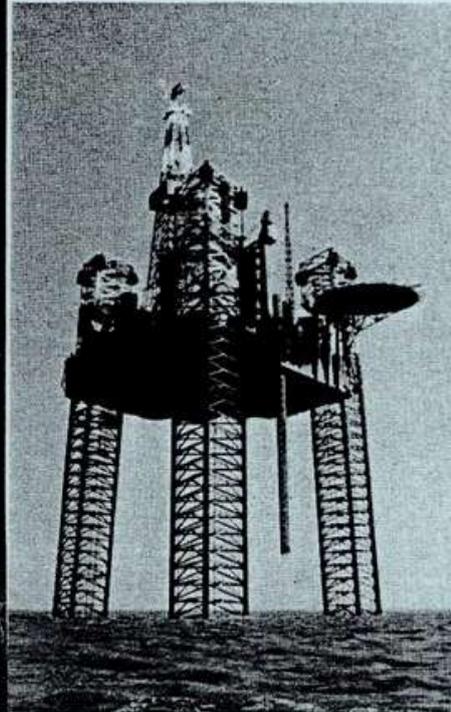
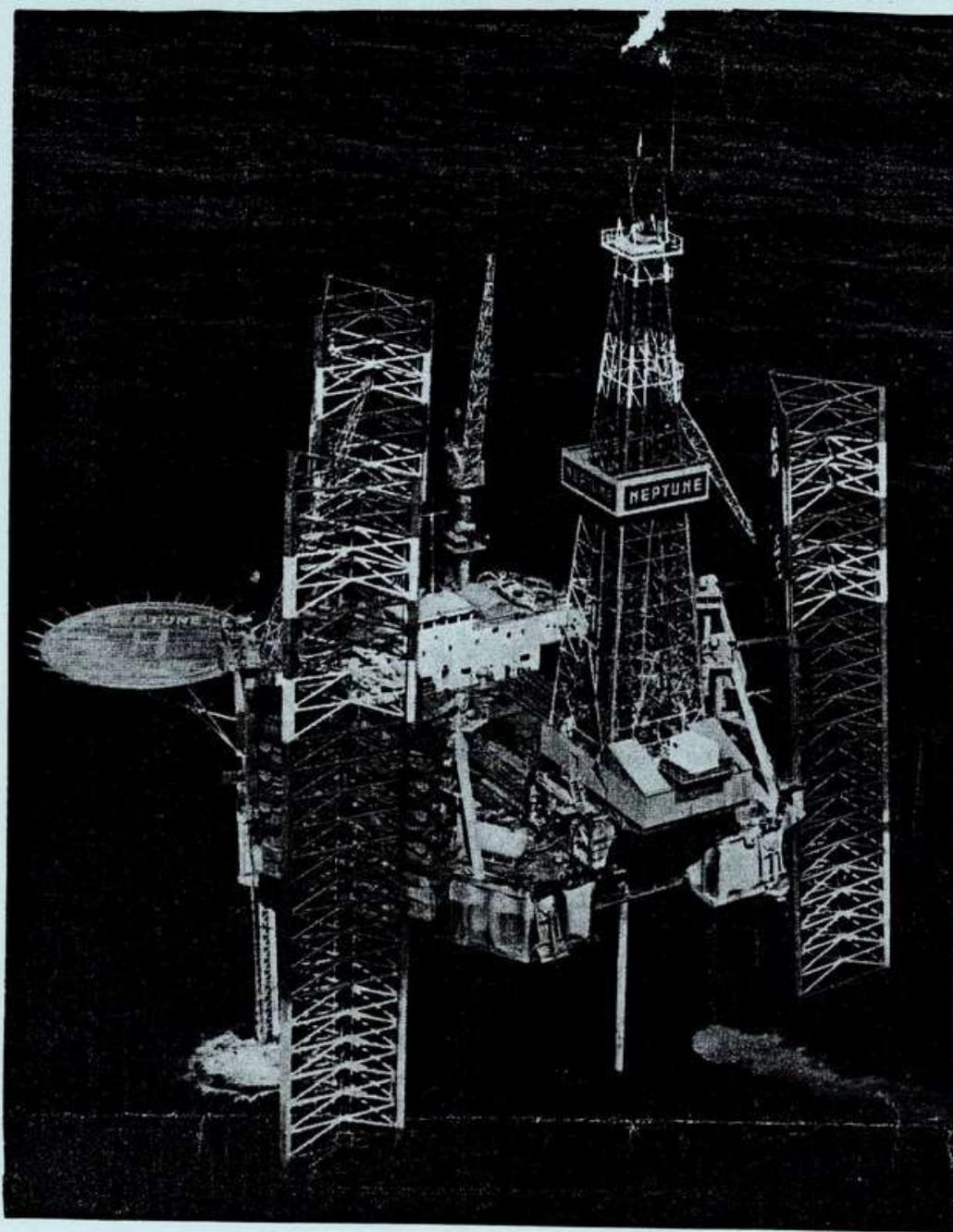


Mac. Dermott
Ponton grue
mettant en place
les structures fixes

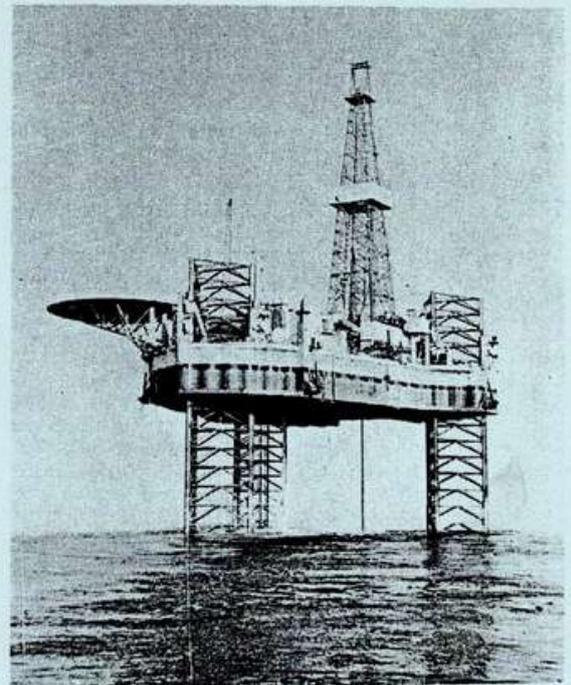


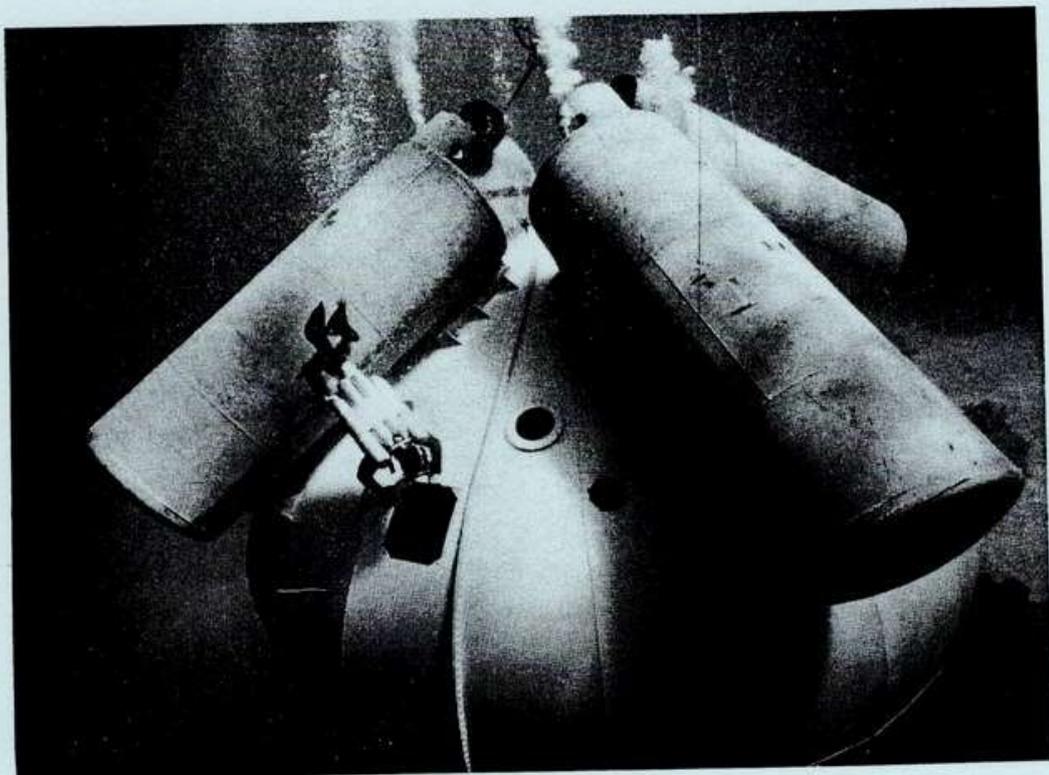
Plateformes
Auto élévatrices

Neptune Gascoigne
Plateforme Léchou nouveau
à piles inclinables

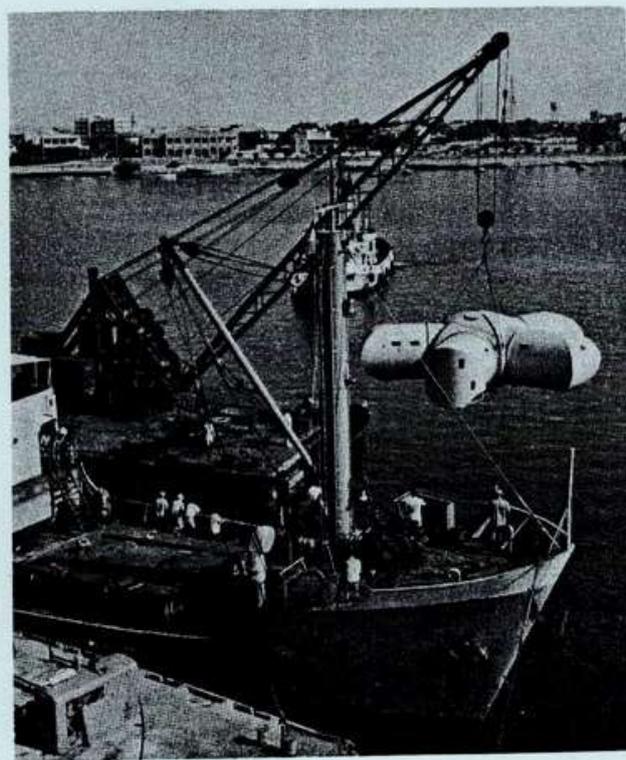


Neptune 1





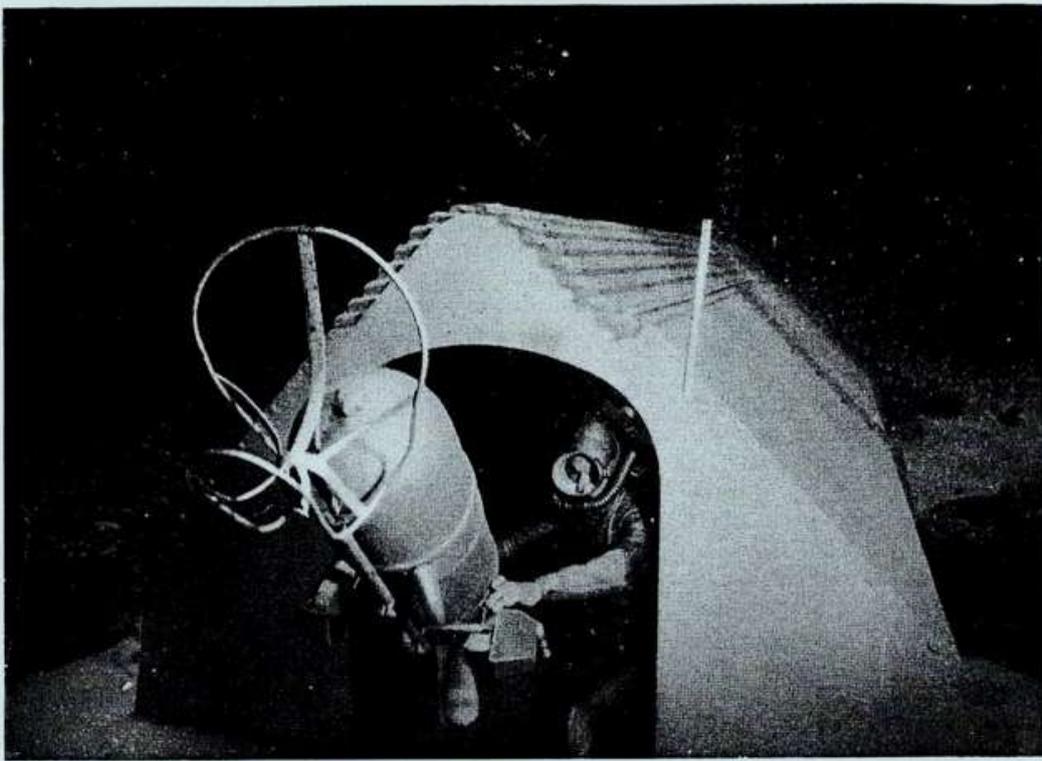
garage à
soucoupes
avec ballasts



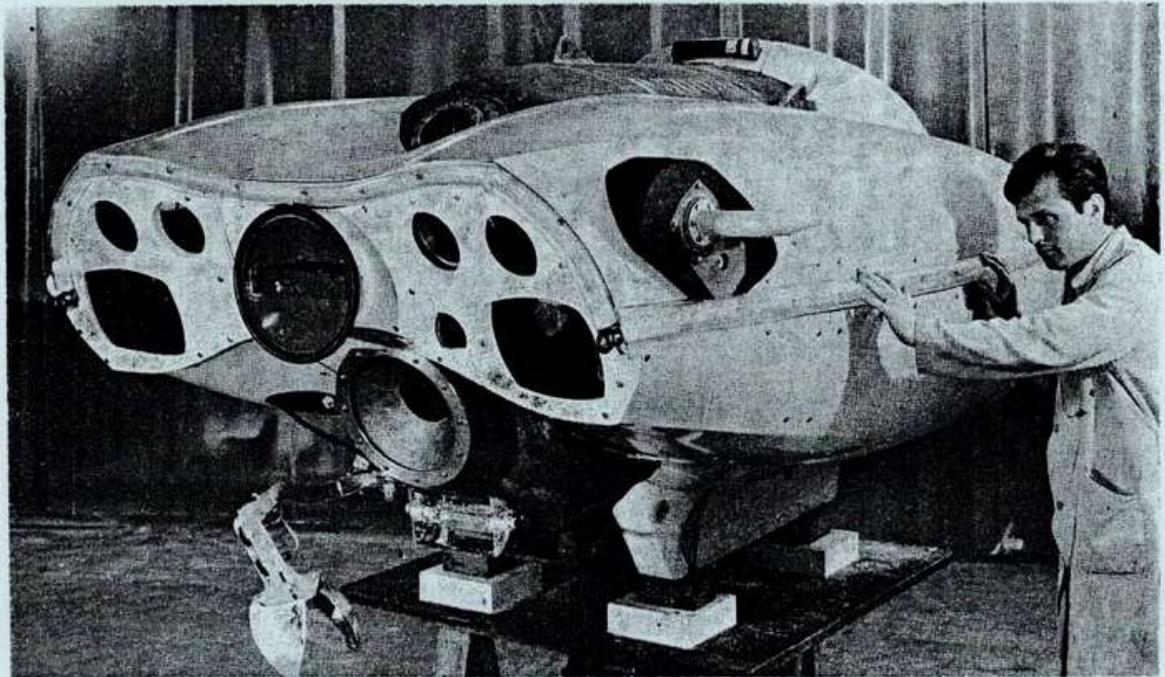
Maison sous
la mer du Commandant
COUSTEAU



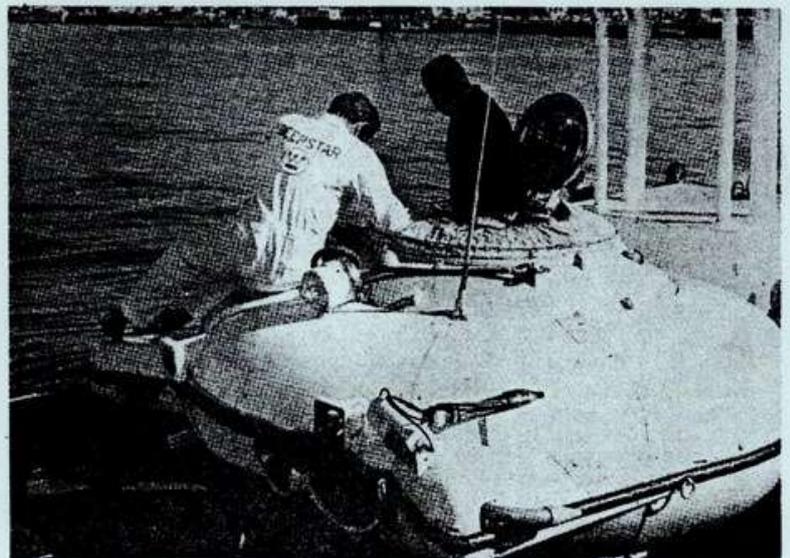
Plongeurs
autonomes



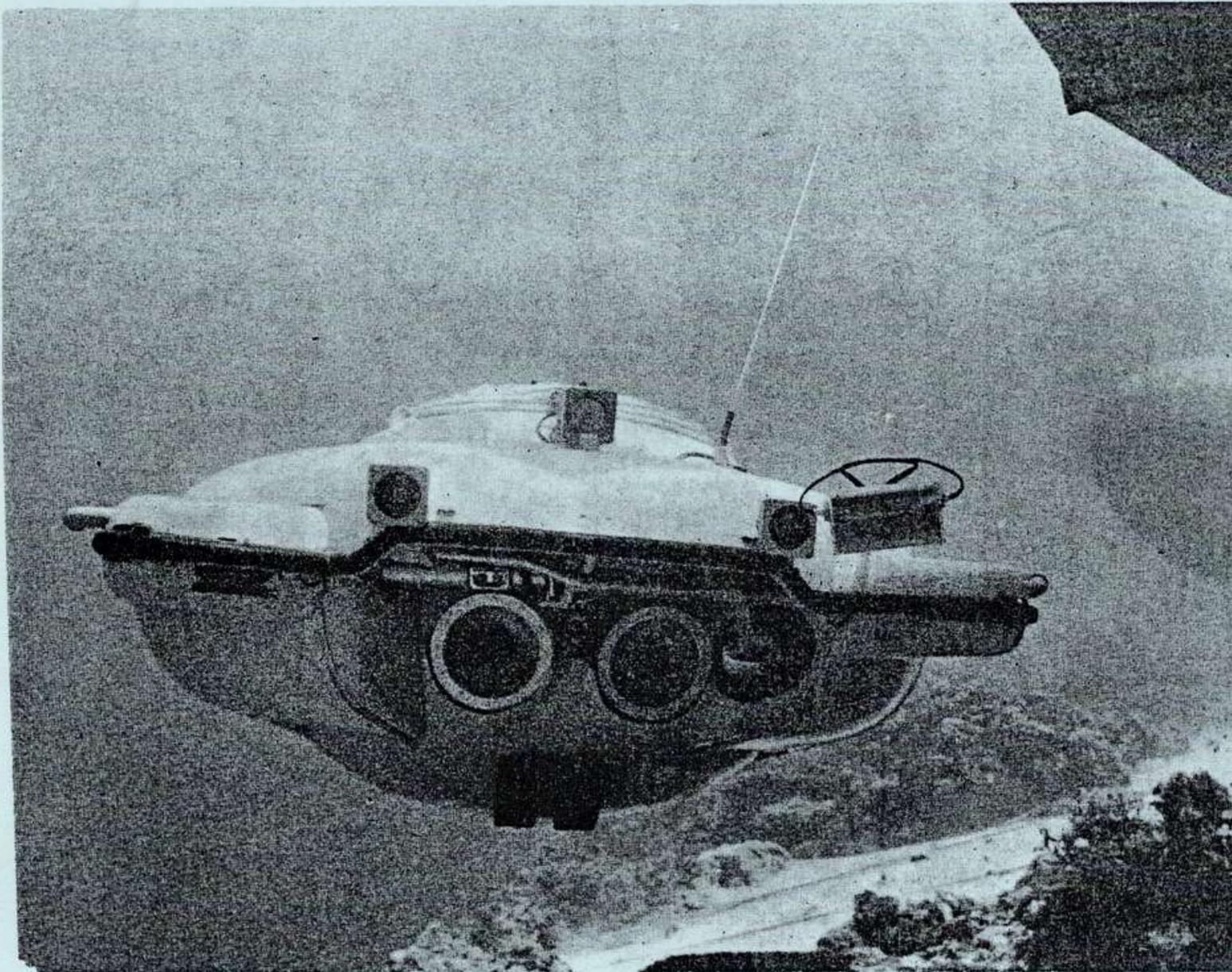
Plongeur avec
scouter sous-marin
sortant d'un hangar



Soucoupe plongeante
mono place SP.500
"Puce de mer"

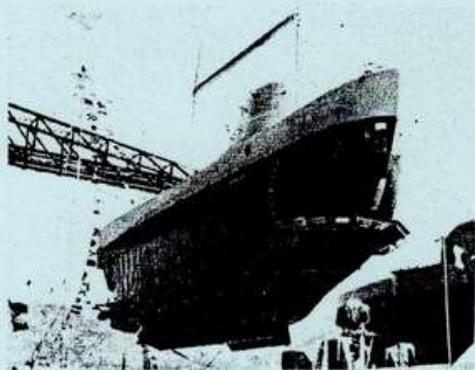


Soucoupe plongeante
biplace



Soucoupe plongeante
P 350

rayon d'action 3 à 4 milles
autonomie 5 heures



Archimède B 11 000.

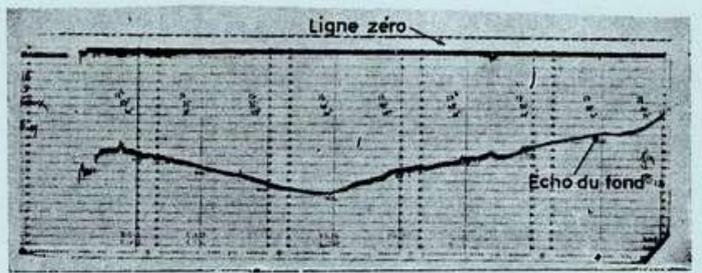
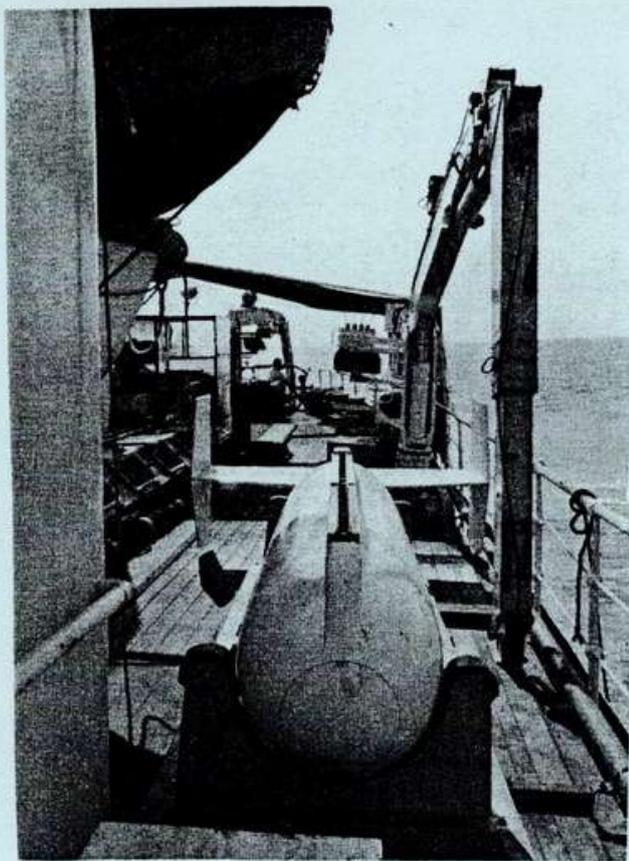


Fig. 4. - Exemple d'enregistrement de l'écho du fond.

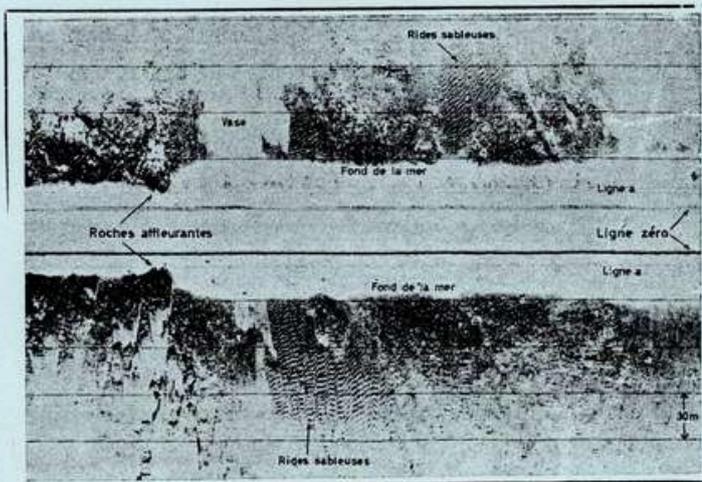


Fig. 6. - Exemple d'enregistrement obtenu par sondeur latéral (Mark I de la société Edgerton).

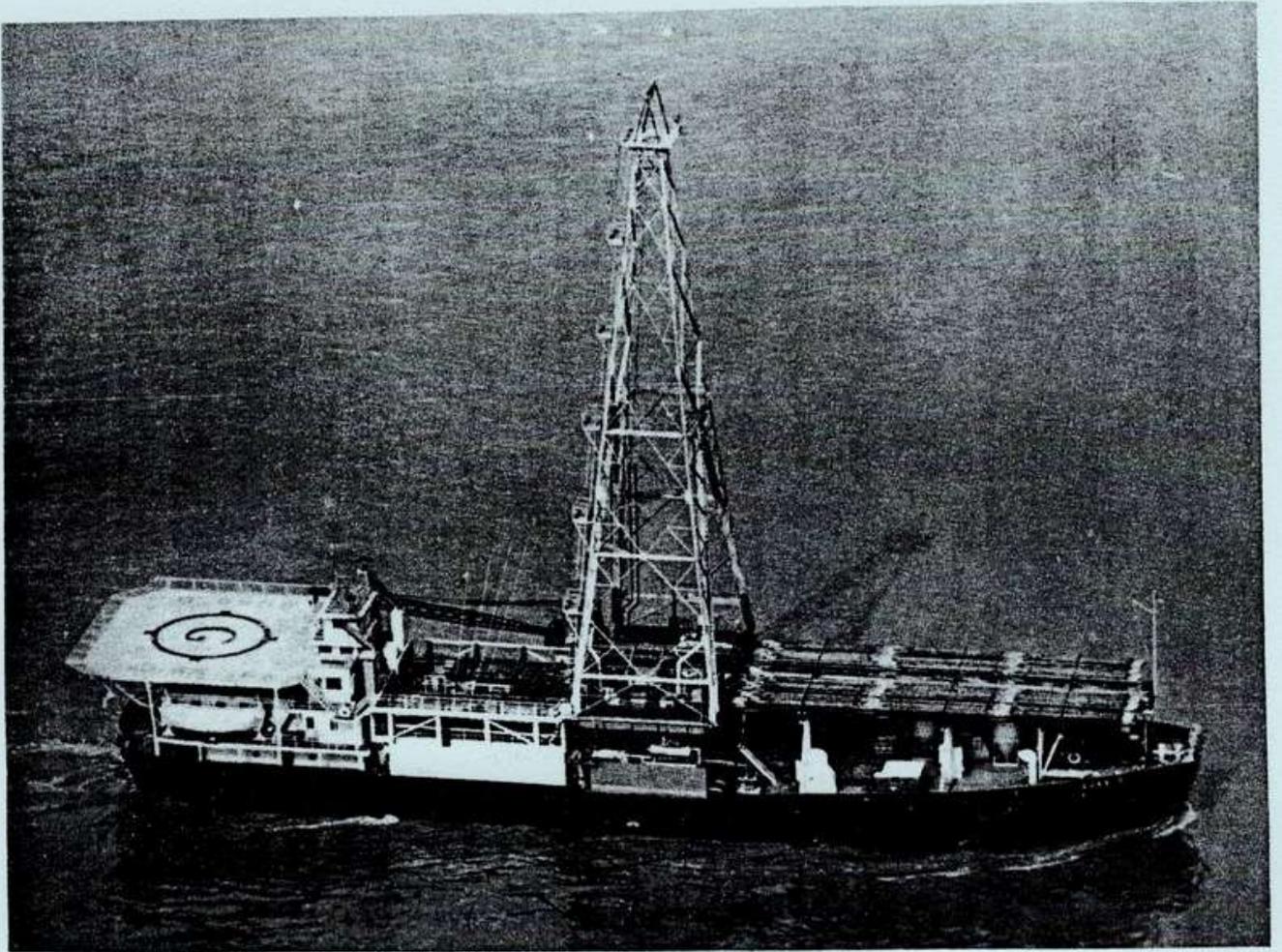


Fig. 3. — Exemple de photographie sonore du fond de la mer obtenue grâce au sonar latéral :

- en bas : enregistrement brut (photographie oblique);
- en haut : enregistrement corrigé par un dispositif optique pour obtenir un véritable plan.

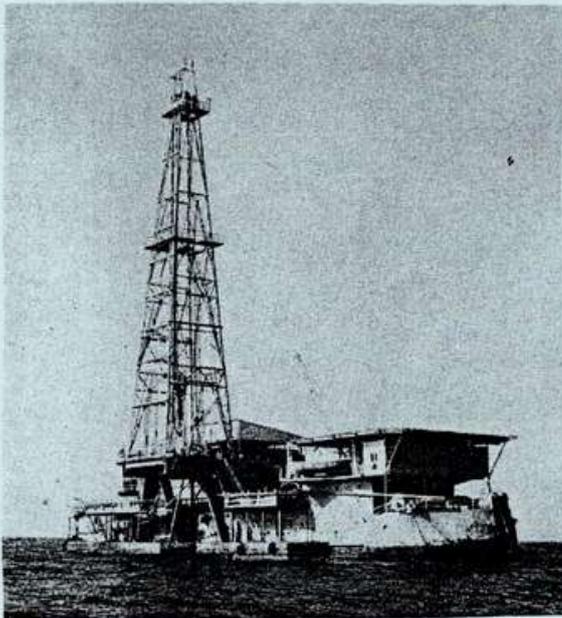
La zone couverte est d'environ 1 500 m dans le sens d'avancement du bateau et 500 m latéralement.

(Phot. X).

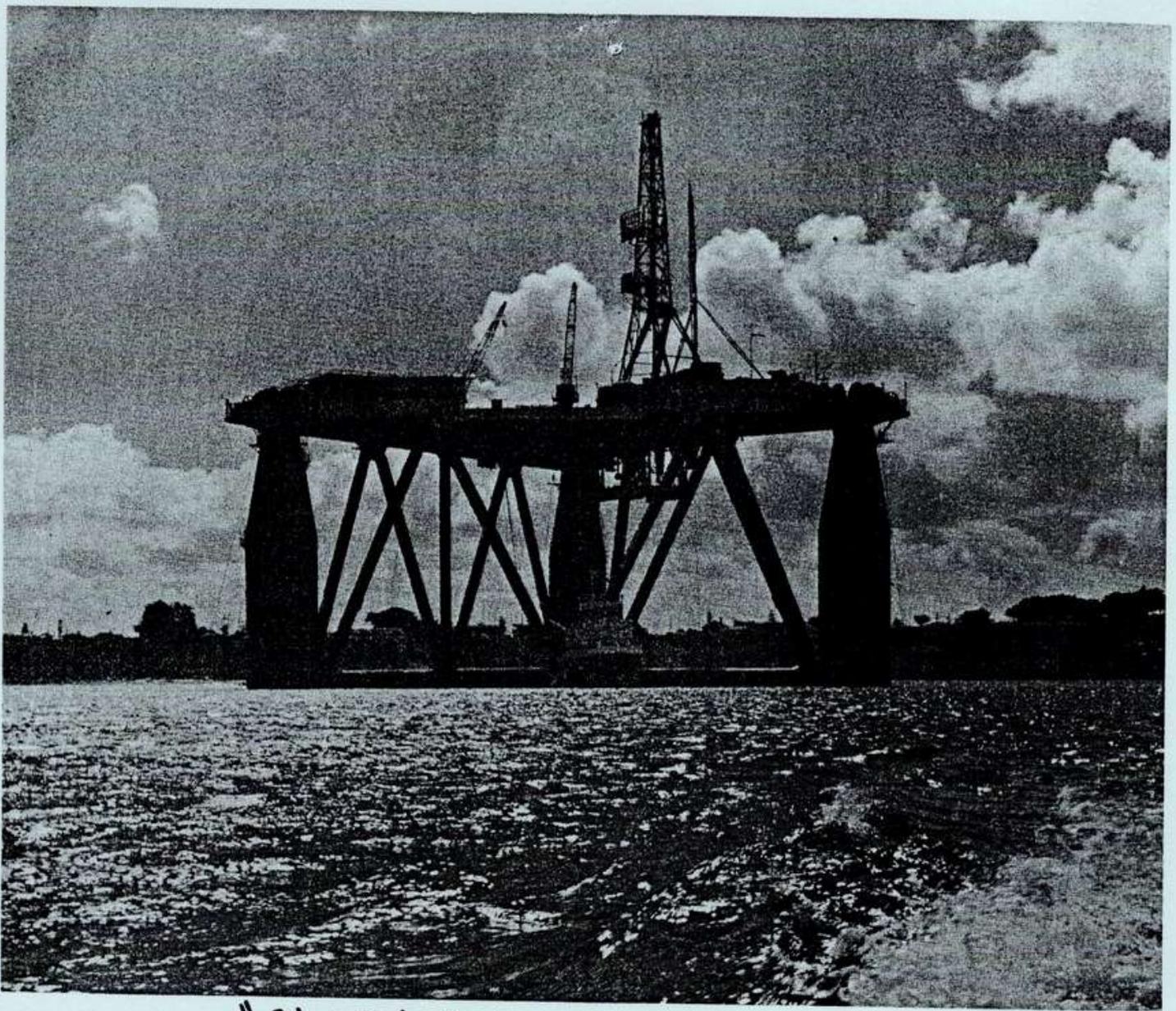


" GLOMAR "

" NOLA 3 "

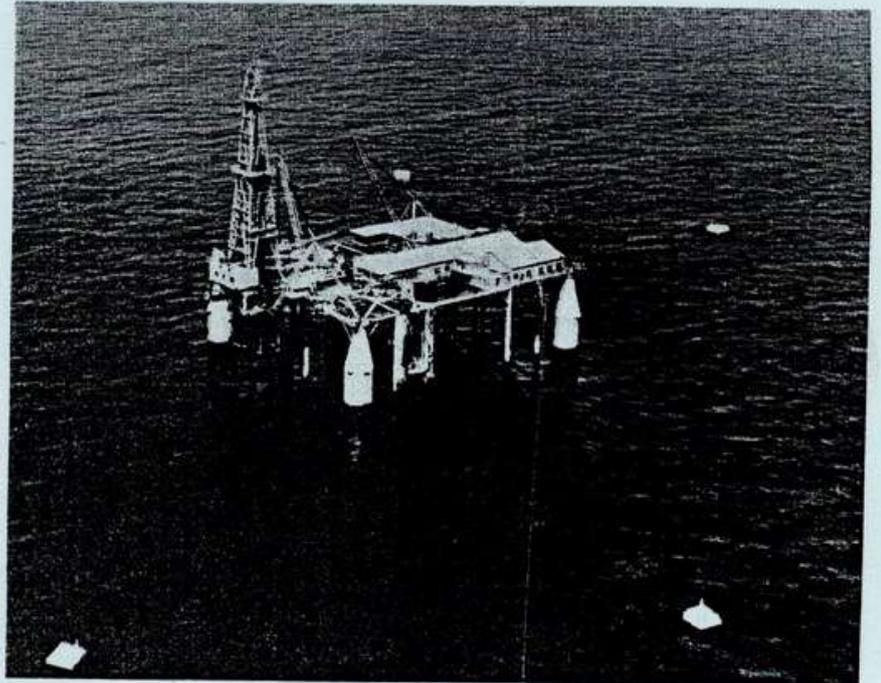


Bateaux de Forage



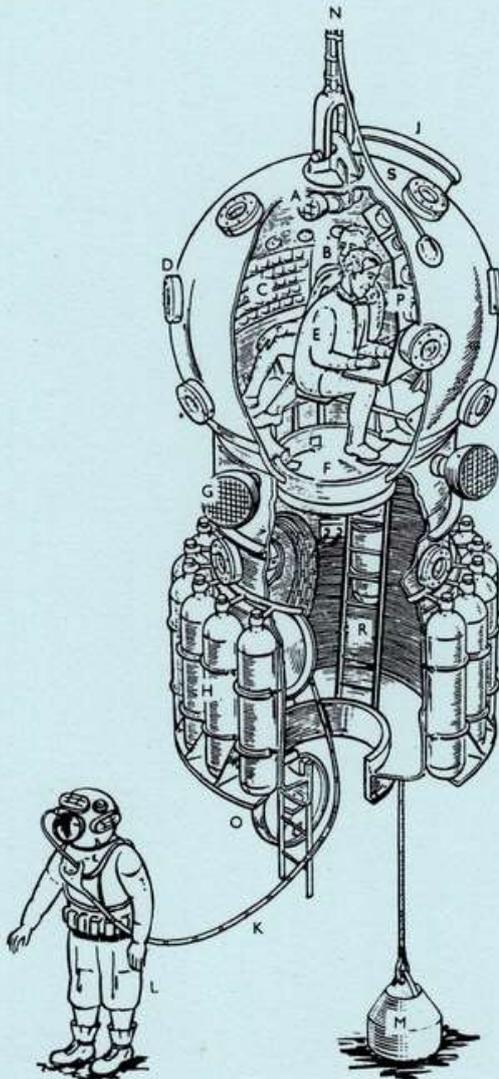
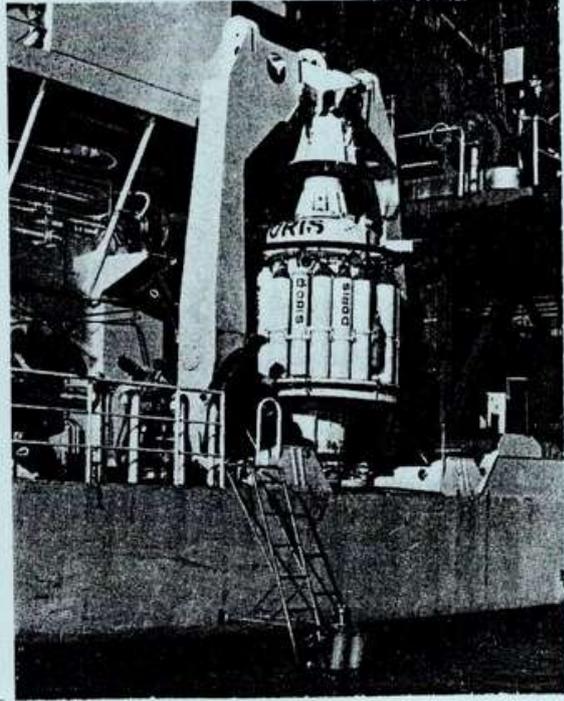
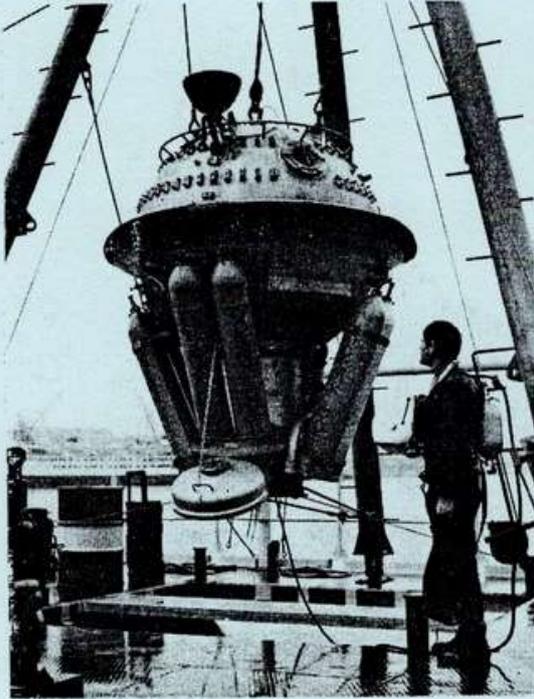
"Blue Water"

Plate formes
Semi-Submersibles

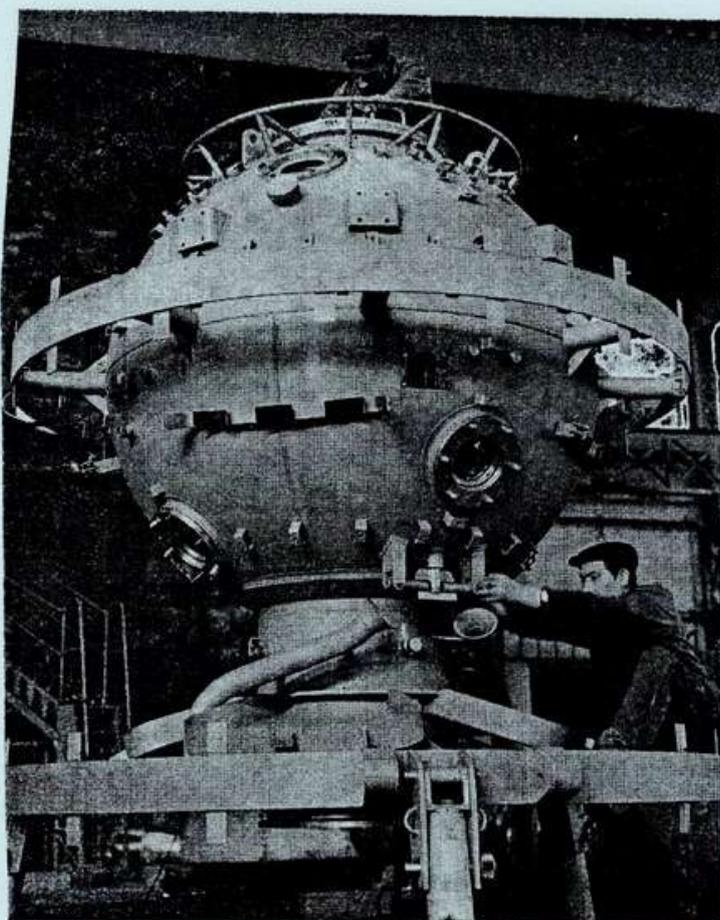
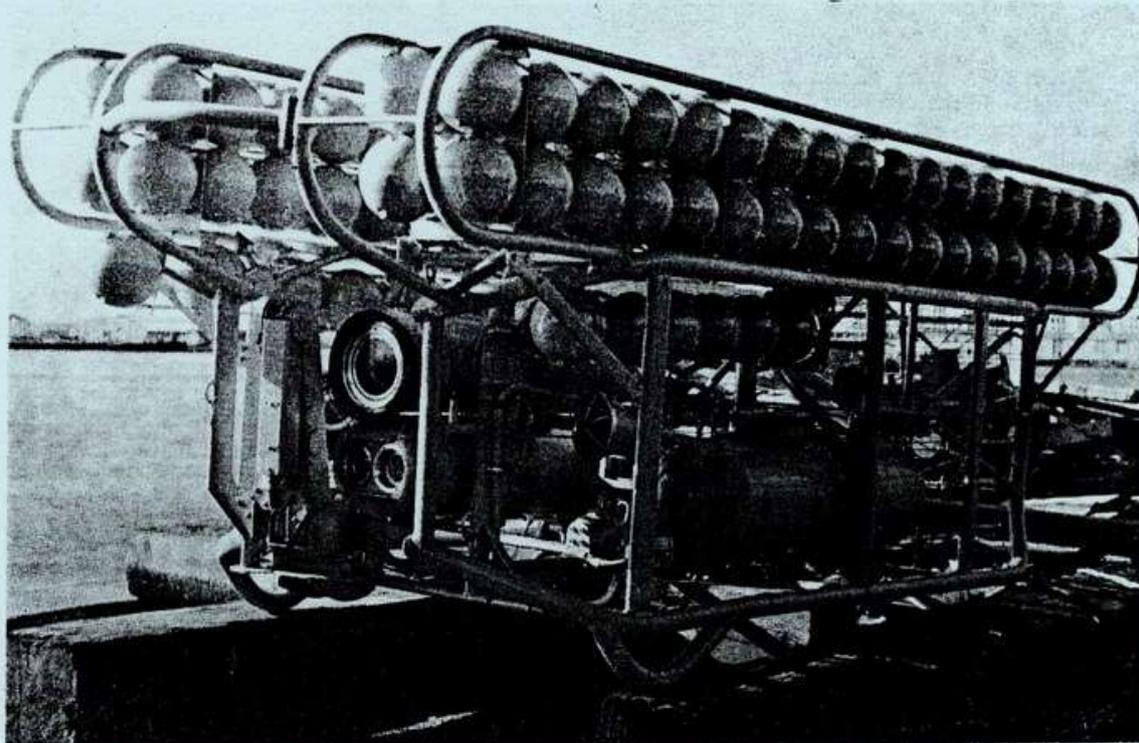


Cette tourelle sphérique de plongée à 180 mètres peut être adaptée par clampage en moins d'une minute sur un caisson de surface et les scaphandriers transférés en quelques secondes, en équi-pression, dans le caisson, par un conduit vertical très court.

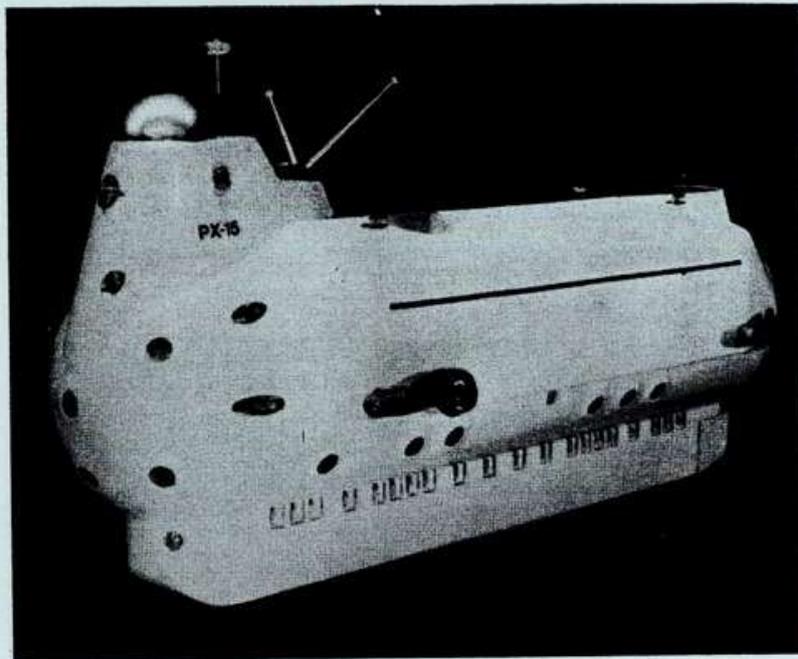
Cette tourelle de plongée profonde pouvant contenir deux plongeurs peut travailler jusqu'à 200 mètres avec utilisation en surface d'un caisson de décompression mis en œuvre à partir de l'Astragale. Elle est le fruit d'une coopération Elf-Erap avec la Doris.



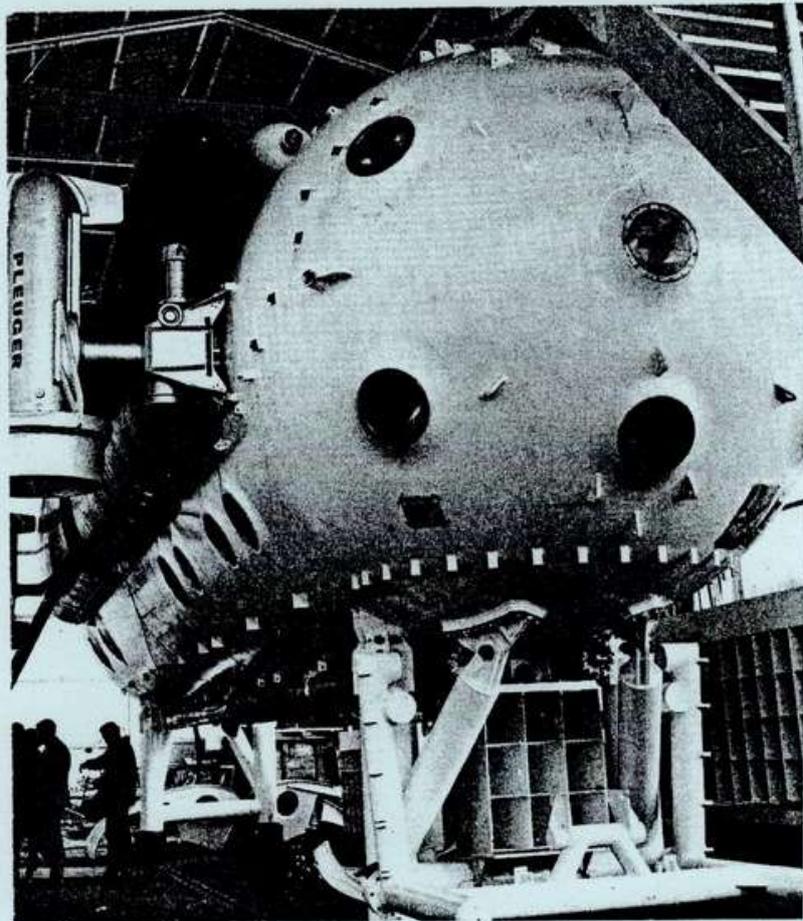
A) évacuateur de gaz carbonique, B) plongeur au repos, C) cartouches chimiques pour l'absorption du gaz carbonique, D) hublots d'observation, E) technicien, F) panneau supérieur du sas, G) lampes flood, H) bouteilles d'oxygène et d'hélium sous pression, J) double panneau d'accès à la cabine, K) tuyau d'alimentation du plongeur en mélange respiratoire, L) plongeur au travail, M) masse d'ancrage (largable), N) cordon ombilical, O) double panneau d'accès au sas, P) tableau de commande, R) échelle d'accès à la cabine, S) tuyau d'alimentation en mélange respiratoire.

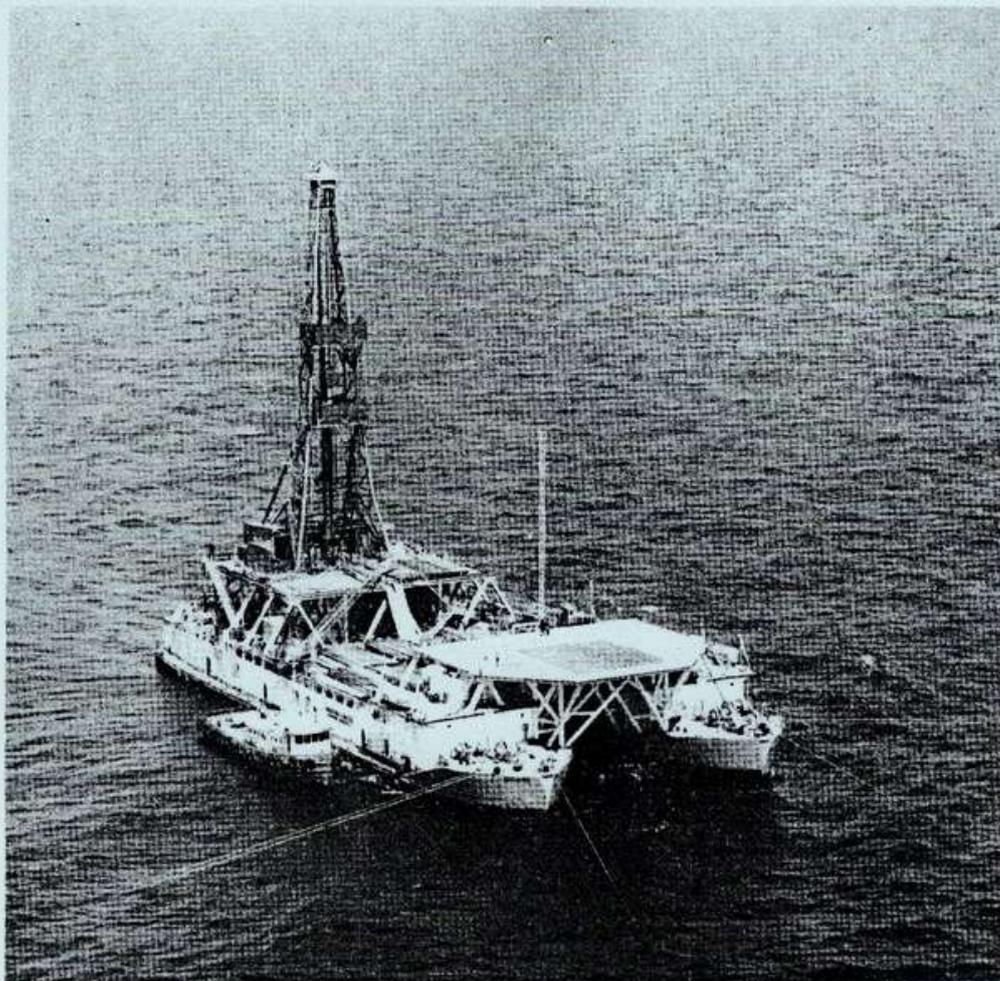


Travail de chaudronnerie inox en acier Uranus 50
(austénoferritique, chrome, nickel, molybdène, cuivre)
pour une sphère de plongée Comex, d'un diamètre de 1,90 m
et d'un poids de 2 900 kg. Epaisseur de la sphère : 13 mm,
définie en limite de plongée de 200 mètres.



● Le PX-15, sous-marin de recherches de Piccard-Grumman. Noter les projecteurs insérés dans la proue et la quille.





CATAMARAN
"CP BAKER"



Le "TEREBEL"
Navire à ancrage
dynamique de l'IFP
de flexo forage.

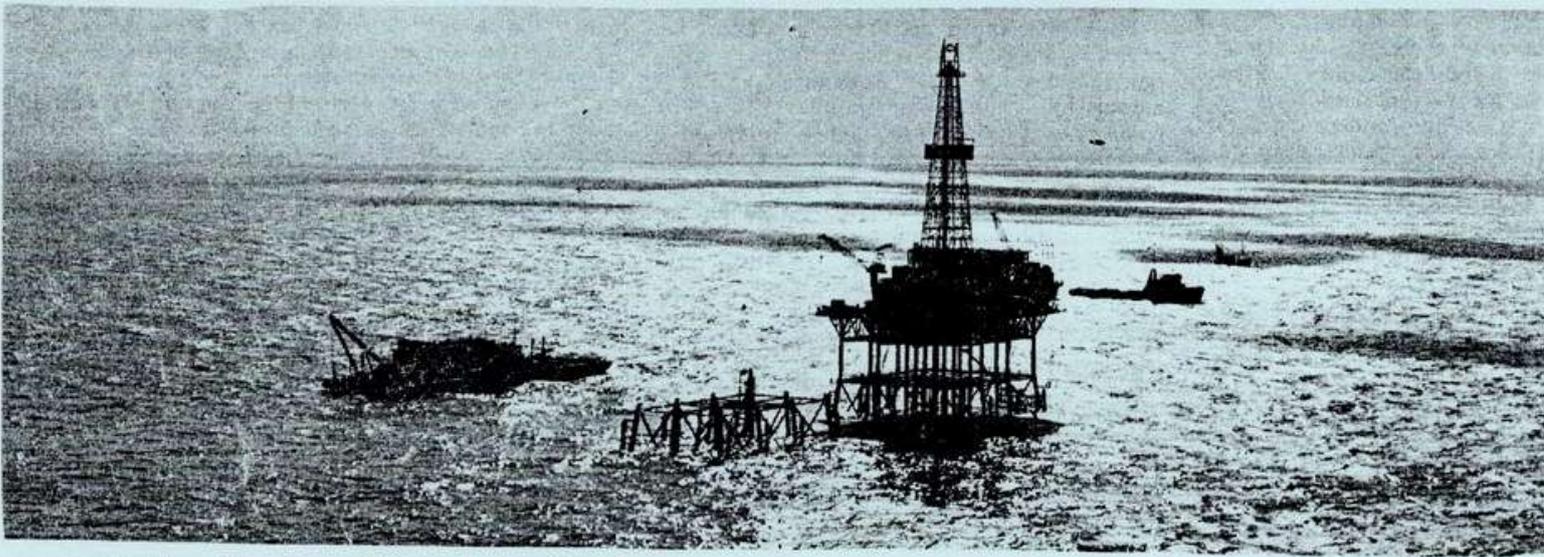
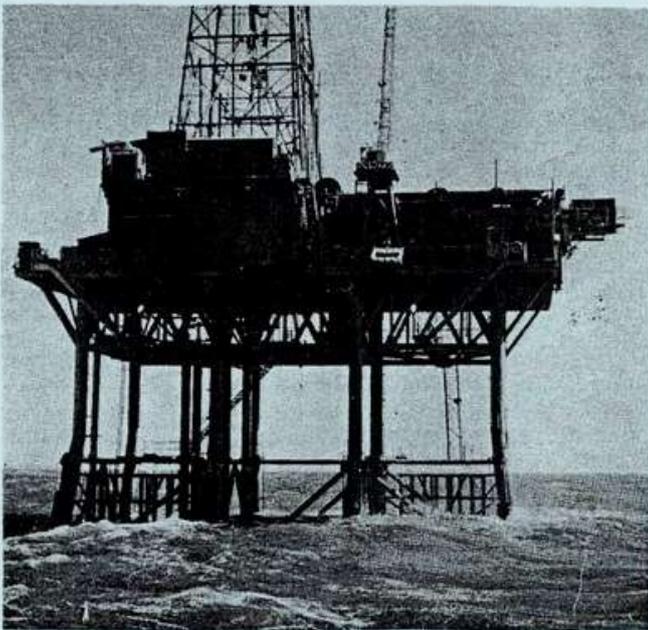
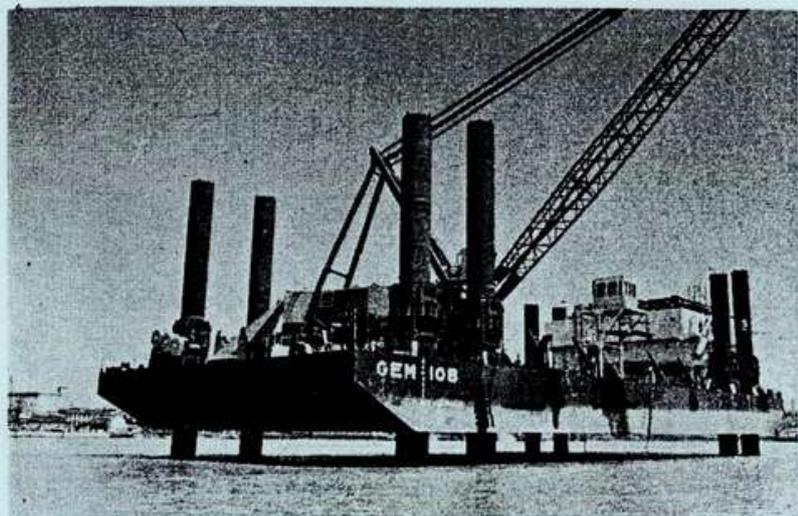


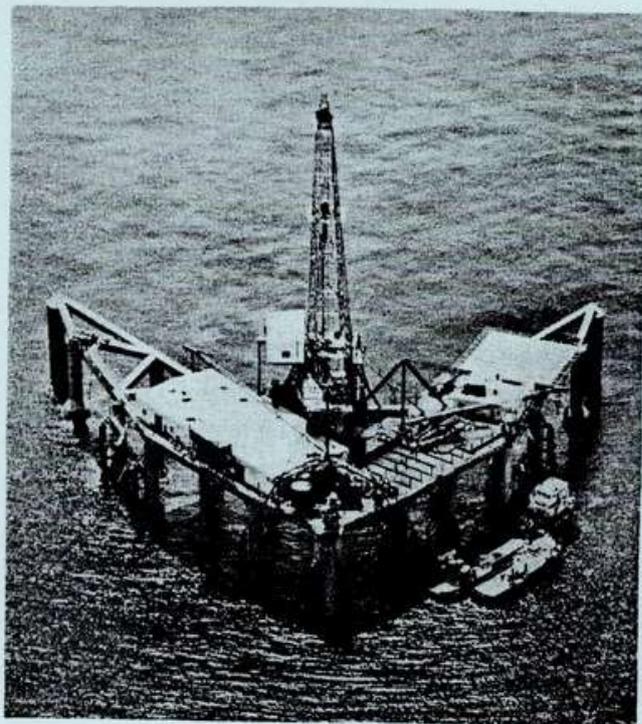
Plate forme fixe "Unifor"
 Gisement de gaz de Lemn Bank
 en Mer du Nord
 (Shell-Esso)



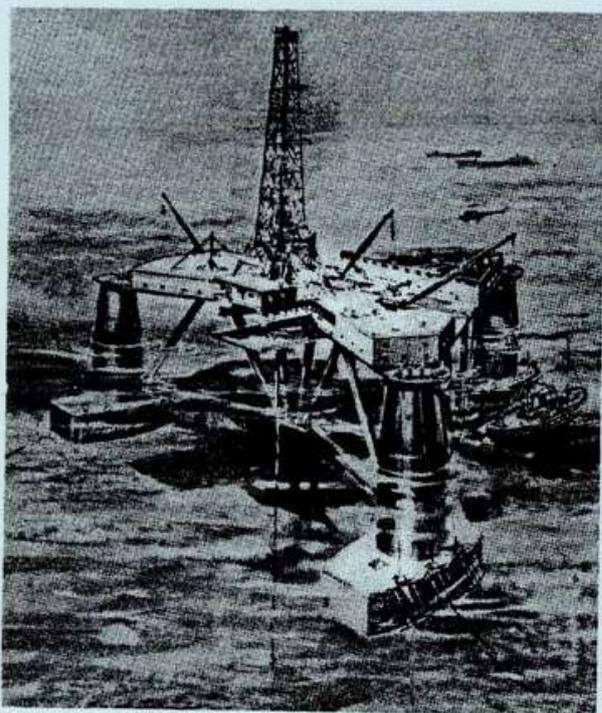
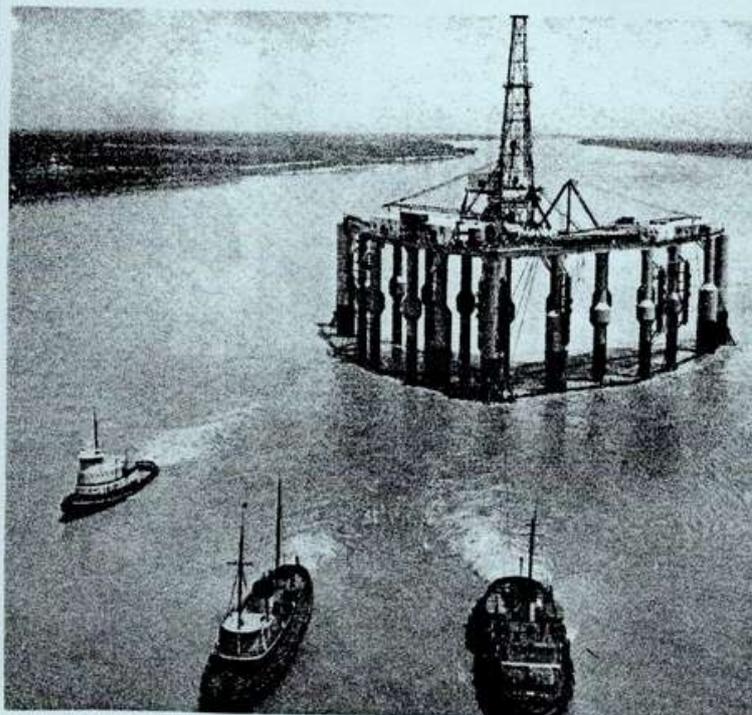
Plateforme fixe assistée
 d'un tender



Plateforme
 temporaire autoélévatrice
 GEM 108

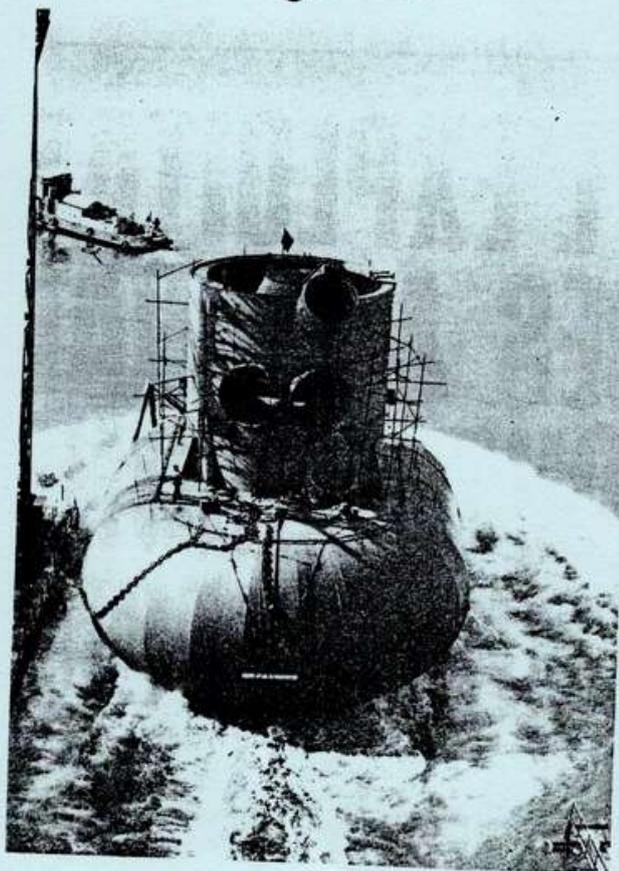


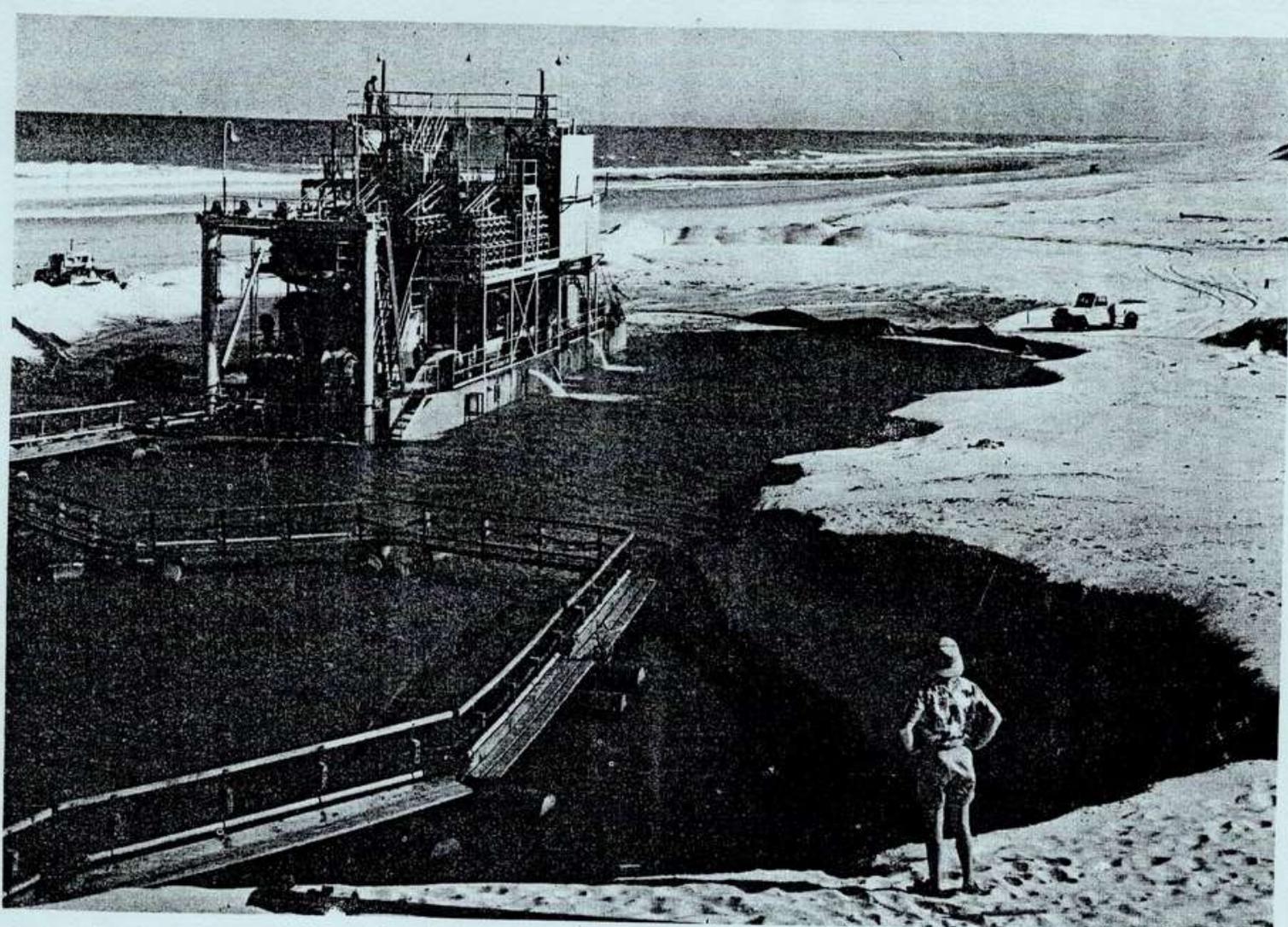
Plateforme flottante " OCEAN DRILLER "



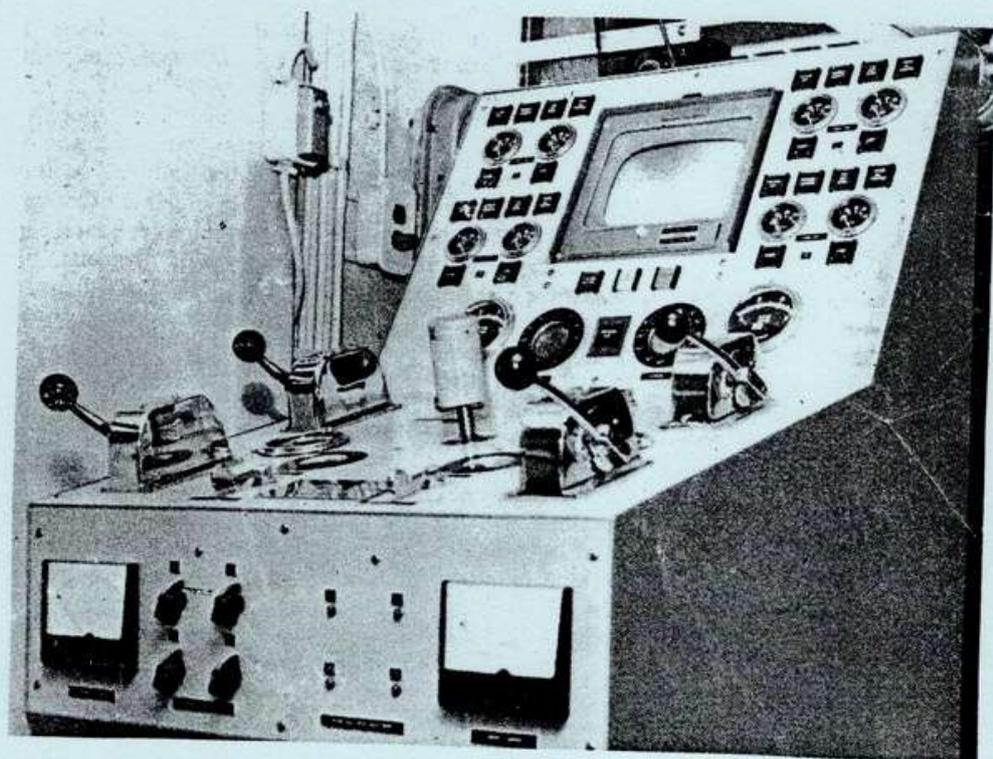
Plateforme flottante " SEDCO "

FloHeur de la
plateforme semi-soumersible
Pentagone 81





Drague pour exploitation
des sables de plages.
(Ruhle - Zimm - Penzance)



Pupitre de
commande
d'un système
d'asservissement dynamique



Plateforme de traitement

Plateforme de production

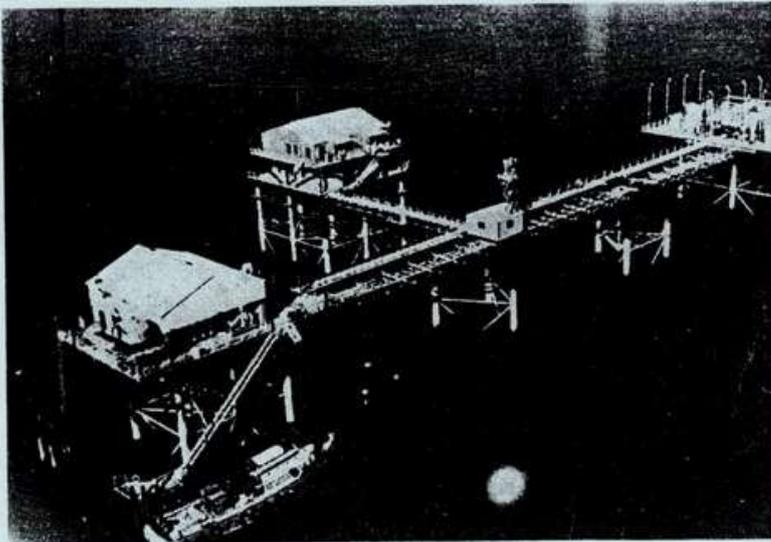
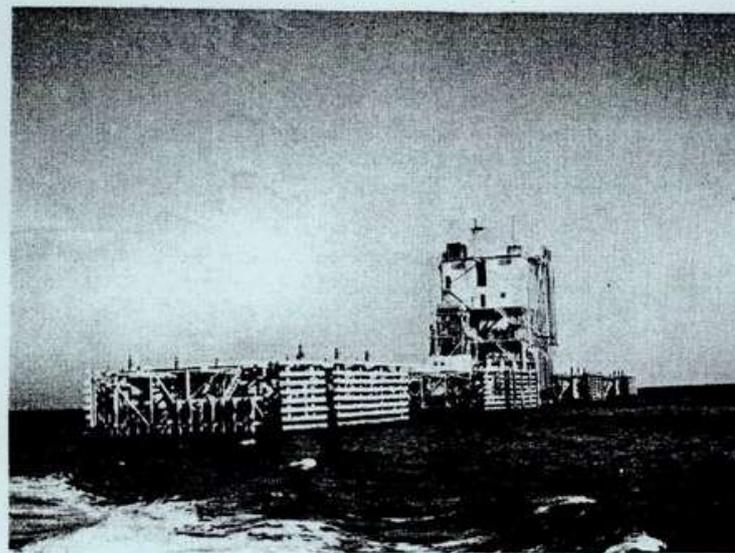
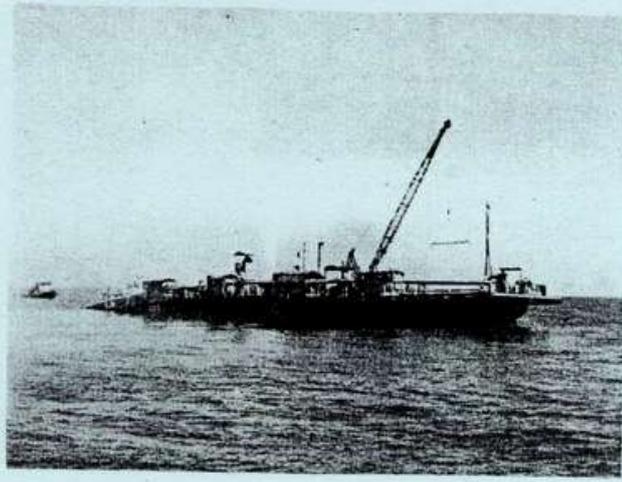


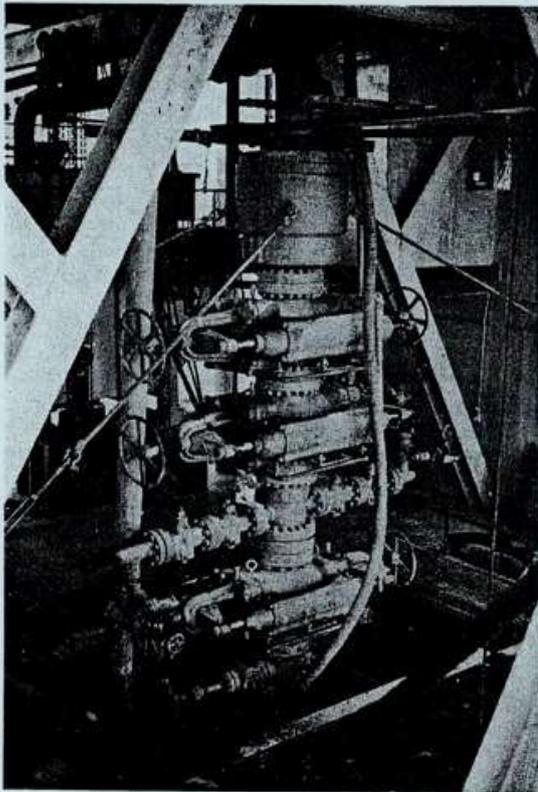
Plate-forme de regroupement en mer
avec installation de traitement

Approvisionnement en mer
pour chargements
de pétrolier





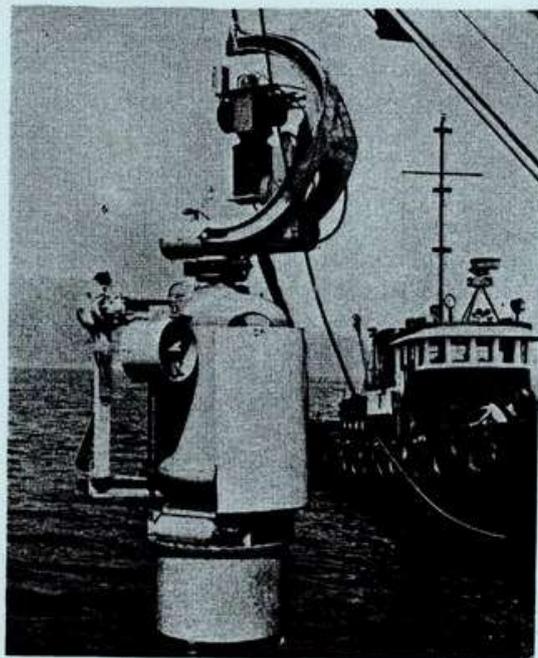
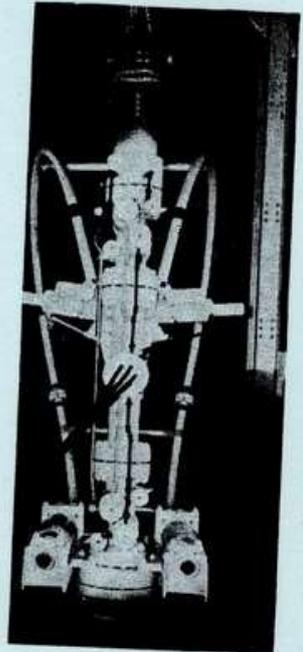
barge de pose
de conduites en mer

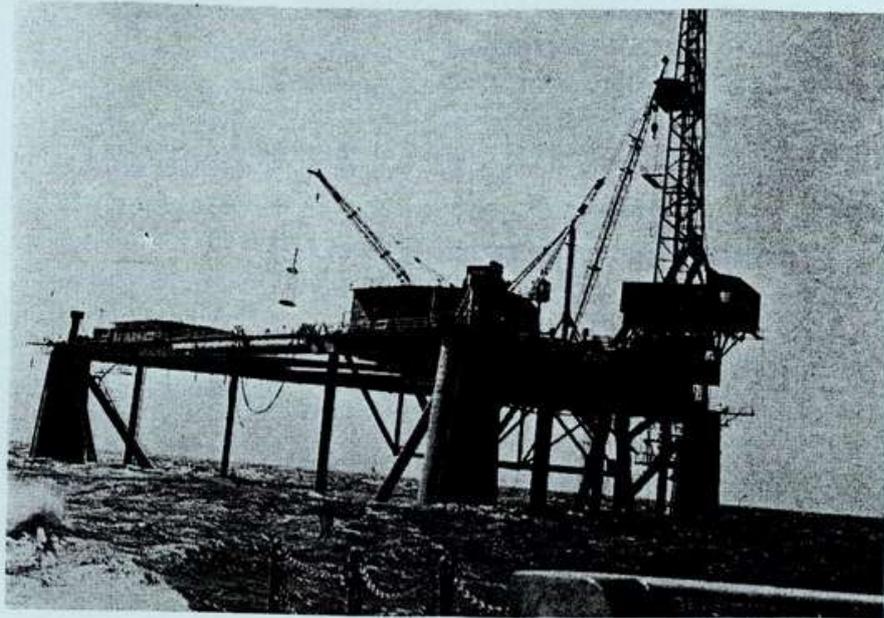


Puits de forage
Tête de puits avec
l'empilement des
obturateurs de
sécurité.

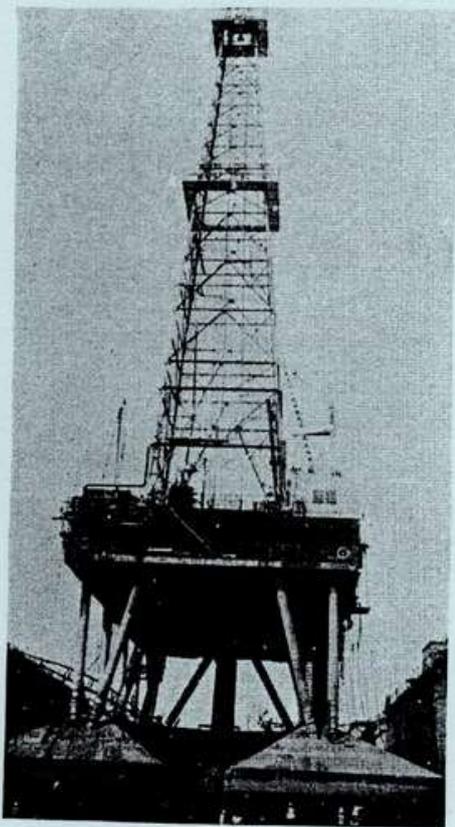
manipulateur
électrique pour
tête de puits
immersées

Tête de
production
sous-marine
à télécommande
hydraulique

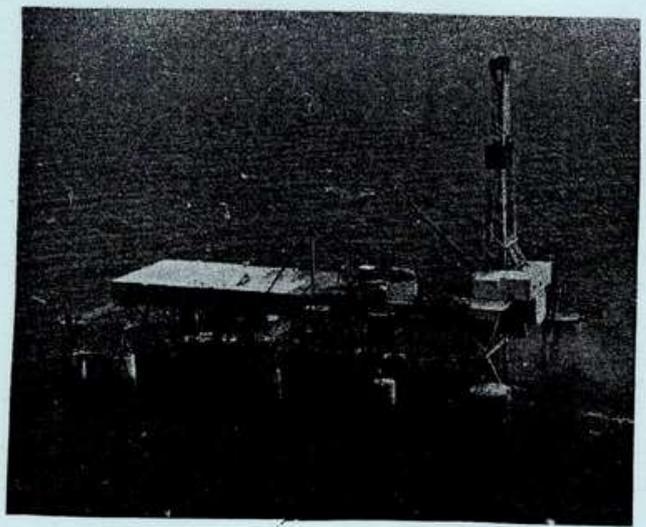




Plateforme
Mc Gee n° 54
posée sur
le fond



Plateforme de forage
sur caissons longitudinaux
"Calco S. 45"



Plateforme avec colonnes
stabilisatrices

chaland pouvant
être coulé sur place

