



(Galliphot-Rouillard)

LES RESSOURCES MINÉRALES ÉLÉMENTS DISSOUS ET FIGURÉS

E. POSTEL

Les minéraux présents dans le milieu marin se rencontrent sous deux formes : d'une part à l'état dissous, d'autre part à l'état figuré. Dans ce dernier cas ils reposent sur le fond ou se trouvent inclus en gisements à l'intérieur des sédiments.

Les éléments dissous

Les minéraux du premier type sont en général des sels qui, après extraction sont utilisés à l'état brut, purifiés ou dissociés en leurs éléments. Trois font actuellement l'objet d'une exploitation étendue : le sel marin, le brome et le magnésium.

Le sel marin. Le sel marin est un chlorure de sodium plus ou moins mélangé d'impuretés. Les réserves océaniques sont énormes. On a calculé que l'évaporation des eaux des mers et des océans laisserait déposer une masse de sel qui, uniformément répartie à la surface des continents, s'étalerait en une couche dépassant

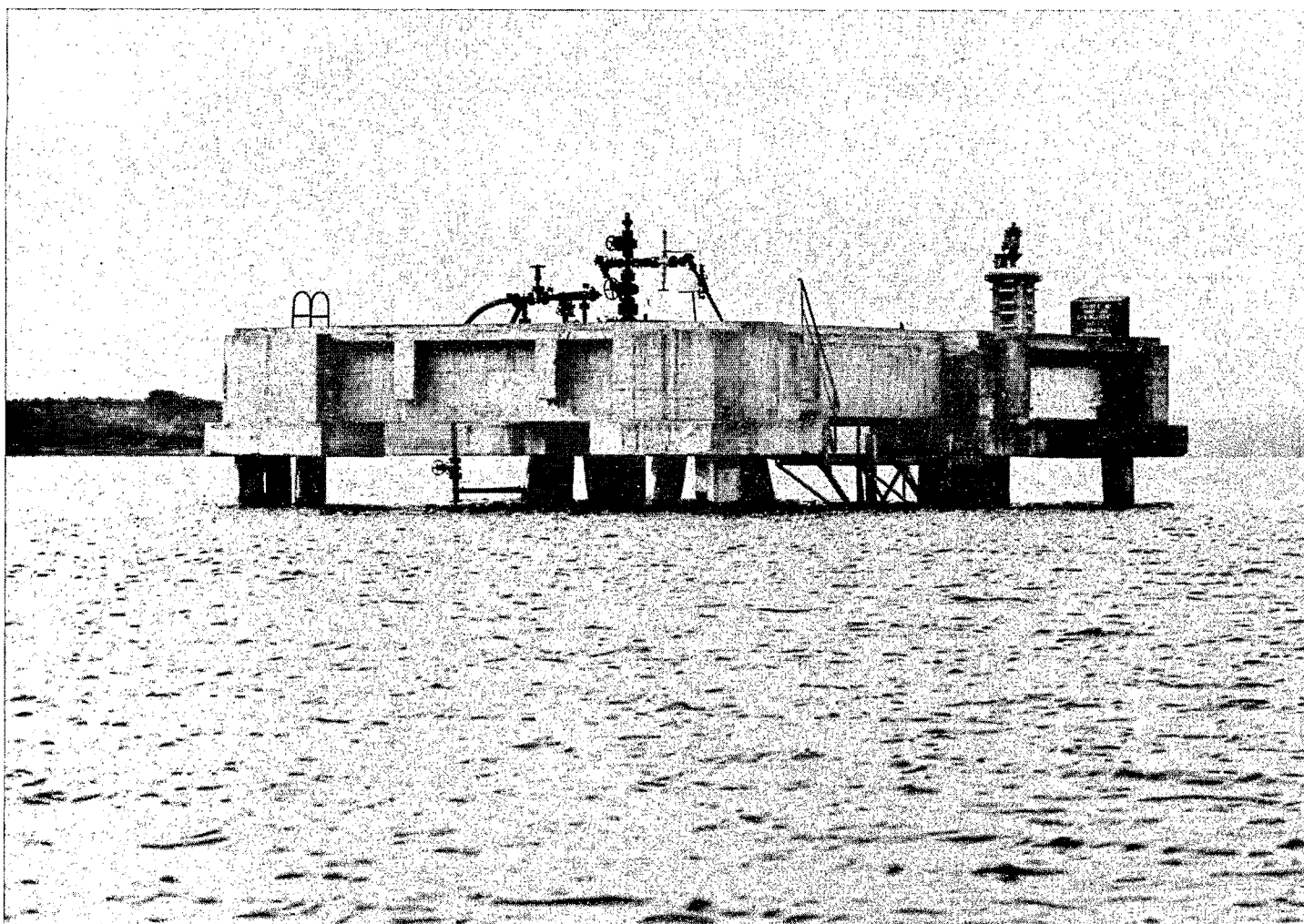
trois cents mètres d'épaisseur, dans laquelle la Tour Eiffel se trouverait par conséquent enfouie. La production mondiale de sel dépasse 50 millions de tonnes par an. La principale source est constituée par les gisements fossiles continentaux (sel gemme). Mais l'extraction par évaporation solaire de l'eau de mer est loin d'être négligeable. La moitié de la production française par exemple (800 000 tonnes) provient des **marais salants**.

Les gros utilisateurs de sel sont les industries de la soude et du chlore (90 % de la production mondiale). L'origine dans ce cas est absolument indifférente. Par contre, en ce qui concerne les industries alimentaires et surtout les usages ménagers les préférences vont nettement au sel de provenance marine contemporaine.

Ce **sel marin** ou **sel gris**, composé de 80 à 90 % de chlorure de sodium et dont les principales impuretés sont des chlorures et des sulfates de cal-

cium et de magnésium, contient des oligo-éléments d'origine minérale ou organique qui, du point de vue diététique peuvent avoir un certain intérêt. On connaît des régimes alimentaires où le sel gris est fortement conseillé. Il est rare néanmoins, même dans ce cas, qu'il s'agisse d'un produit absolument non traité.

En effet, d'un côté des traces de fer, des matières organiques, des bactéries halophiles colorent souvent le sel brut d'une teinte rose ou rouille qui peut aller jusqu'à masquer la teinte grise initiale, et lui communiquent une odeur « de mer » particulière ; d'un autre côté les sels de calcium et de magnésium lui donnent un goût amer, désagréable, et leur hygroscopicité, beaucoup plus forte que celle du chlorure de sodium, le transforme rapidement en une masse pâteuse d'un aspect peu engageant et d'un emploi difficile, au moins dans les utilisations ménagères. Pour toutes ces raisons il faut le raffiner. On fait alors appel à l'un des deux procédés



(Galliphot-Maurij)

suivants, le second étant dans l'industrie moderne beaucoup plus répandu que le premier : lavage et tamisage, dissolution et recristallisation. Le raffinage est plus ou moins poussé en fonction des besoins. Il conduit aux **sels blancs**. Les sels blancs de consommation courante ont un degré de pureté de l'ordre de 95 %, les sels de cuisine fortement élaborés, un degré de pureté de l'ordre de 98 à 99 %.

Les marais salants sont, en France, distribués sur le littoral atlantique, de la Gironde à Quiberon (ils y marquent le pas ou sont en régression), et surtout sur le littoral méditerranéen où ils trouvent, en raison du climat, des conditions d'exploitation beaucoup plus favorables. Les salins de Camargue (Giraud et Aigues-Mortes) couvrent à eux seuls les deux tiers de la production française.

Le brome. Utilisé depuis longtemps par l'industrie photographique, le brome a trouvé de nouveaux débouchés dans l'association de ses composés organiques au plomb tétraéthyle pour la fabrication des anti-détonnants (essences à hauts indices d'octane). C'est vers 1935 que ces produits furent pour la première fois lancés sur le marché, entraînant une augmentation spectaculaire de la production mondiale de brome qui oscillait jusque-là autour de 4 000 tonnes par an. A nouveaux débouchés

nouvelle source de matière première. L'eau de mer fit son apparition sur scène. Elle y occupe maintenant, et de très loin, la première place.

Acidifiée à l'acide sulfurique jusqu'à pH 3,5, débarrassée du gaz carbonique par soufflage, l'eau de mer est traitée par un excès de chlore. Le brome ainsi libéré est chassé par un courant d'air qui entraîne environ 90 % (procédé Ethyl-Dow Corporation). L'isolement et la purification du produit donnent lieu ensuite à des manipulations chimiques qui sortent du cadre de cet exposé. Les Etats-Unis sont les plus gros producteurs mondiaux de brome, suivis de l'Angleterre. En France, l'usine Kuhlman de Port-de-Bouc (Etang de Berre), la seule existant à ma connaissance, possède une capacité de production de l'ordre de 2 000 tonnes par an.

Le magnésium. La demande en magnésium et par conséquent sa production ont été plus ou moins directement liées au développement d'abord de l'aviation, ensuite des industries spatiales. La plus grande partie du magnésium produit dans le monde est préparée par électrolyse du chlorure fondu provenant soit de minéraux terrestres (dolomite, magnésite, carnallite), soit de plus en plus de l'eau de mer qui est devenue depuis quelques années sa principale source de production. Le procédé de traitement consiste dans un premier temps

à précipiter la magnésie par de l'eau de chaux obtenue à partir de coquilles d'huîtres calcinées en maintenant le milieu à un pH assez élevé pour éviter l'entraînement du bore. Après filtration, la magnésie récoltée est neutralisée par l'acide chlorhydrique et la solution obtenue par évaporation partielle soumise à l'électrolyse vers 750°.

Là encore les Etats-Unis arrivent en tête des producteurs mondiaux, et l'usine de la Dow Chemical Company située à Freeport (Texas) dépasse de très loin toutes les autres. L'Angleterre fait assez bonne figure grâce au complexe de Hartlepool. La France n'est pas encore présente dans la compétition.

Ainsi se termine la liste des éléments actuellement extraits de l'eau de mer. Les perspectives s'arrêtent-elles là ?

Dans une conférence prononcée le 20 janvier 1966 devant la **Commission des Techniques futures de la Société des Ingénieurs Civils de France**, et rapportée dans les **Cahiers Océanographiques** de décembre 1967, M. R. Geneslay, directeur à la Compagnie de Géophysique, rappelle que la mer renferme des richesses potentielles dont on peut raisonnablement envisager l'exploitation en dépit de leur très faible concentration. Si l'or, malgré l'attrait qu'il conserve encore de nos jours, ne figure pas au nombre de

celles-ci et se trouve ramené dans la chimie de l'eau de mer au rang de sous-produit, l'uranium et surtout le deutérium apparaissent dès maintenant comme pouvant constituer les fondements de futures activités industrielles.

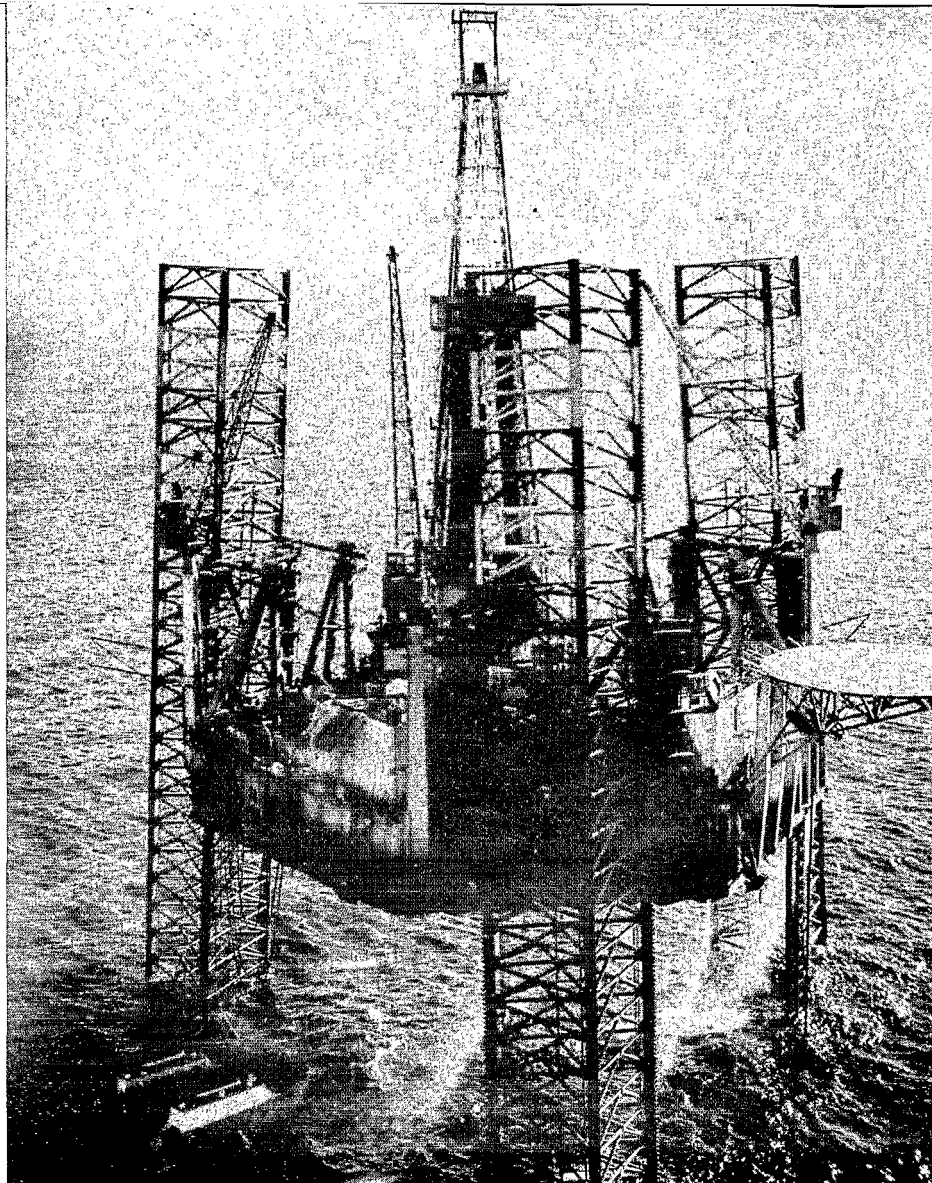
Depuis longtemps convoité, l'or d'origine marine a fait l'objet, au milieu d'un foisonnement de recherches à fort relent alchimique, de tentatives sérieuses d'extraction dont il est bon de mentionner deux exemples.

Le premier parce qu'il a abouti à une très grosse amélioration de nos connaissances sur le milieu marin. Il s'agit de l'expédition allemande 1927-29 (expédition « Meteor »), motivée par la prospection systématique de la teneur en or des eaux de l'Atlantique, expédition qui devait se révéler à ce strict point de vue comme particulièrement décevante, mais apporter en contrepartie, en se situant à un niveau intellectuel beaucoup plus élevé, non seulement un modèle d'organisation et de méthode dans le travail à la mer, mais aussi l'une des plus riches moissons de renseignements et l'un des plus rigoureux systèmes analyse/synthèse des phénomènes observés qu'ait jamais enregistré la science océanographique.

Le second parce qu'il a débouché sur un début d'exploitation qui a définitivement mis fin aux illusions qu'on avait pu entretenir jusque-là. Il s'agit d'une entreprise australienne qui a produit effectivement, dans une usine entièrement conçue et construite en 1935 à cette intention, quelques centaines de grammes d'or, mais à un prix de revient tel qu'elle dut rapidement renoncer à poursuivre son activité.

Contrairement à l'or, l'uranium, malgré sa faible concentration (trois milligrammes par tonne d'eau de mer), retient l'attention des milieux compétents en raison de son intérêt pour l'industrie nucléaire, et l'Angleterre, qui se trouve à la tête du mouvement, a déjà entrepris des études expérimentales relatives à son extraction.

Tel est également le cas du deutérium (ou hydrogène lourd) dont les usages paraissent encore plus prometteurs, mais aussi plus lointains, que ceux de l'uranium. Employé dès maintenant par l'intermédiaire de l'eau lourde comme ralentisseur de neutrons dans certaines piles atomiques, le deutérium est aussi à la base d'une réaction de fusion qui, maîtrisée, devrait ouvrir de nouvelles sources énergétiques dans un avenir plus ou moins rapproché. Bien que sa teneur par rapport à l'hydrogène ordinaire ne soit que de $1/6750$, ces mêmes milieux compétents dont nous avons déjà parlé (en fait les physiciens, océanographes et industriels nucléaires) s'accordent à estimer que les océans en contiennent suffisamment pour assurer une production d'énergie pratiquement illimitée. Pour passer de la phase spéculative à la phase expérimentale puis à la phase industrielle l'extraction du deutérium de



(Rapho - de Sazo)

l'eau de mer n'attend que les progrès de la physique nucléaire dans le domaine de la fusion.

A la suite de ce deuxième volet, l'exploitation des éléments contenus dans l'eau de mer voit donc s'ajouter en tant qu'industries fondamentales, aux trois certitudes déjà notées, deux probabilités à fortes chances d'échéance, ces chances étant liées d'une part au développement de nos connaissances scientifiques et techniques, d'autre part à l'évolution des conjonctures économiques. En outre à côté de ces données réelles ou hypothétiques il convient de mentionner la production d'eau douce, déjà entreprise, comme nous l'avons vu, sur de nombreux points de la planète, et qui tend à se généraliser. Tout cela fait intervenir par voie de conséquence la notion d'industries dérivées qui élargit nettement les perspectives. Grosses consommatrices de matière première, ces activités nouvelles ou prévues accumuleront des résidus qui pourraient peut-être dans ces conditions devenir à leur tour exploitables en tant que sous-produits. C'est tout le problème de l'extraction des éléments présents à l'état de traces, tout le problème de l'exploitation exhaustive des ressources minérales dissoutes qui se trouverait alors posé en termes complètement nouveaux. Hâtons-nous de préciser que personne n'est, dans l'état

actuel de nos connaissances, capable de se prononcer sur le degré de confiance qui peut être accordé à ces spéculations.

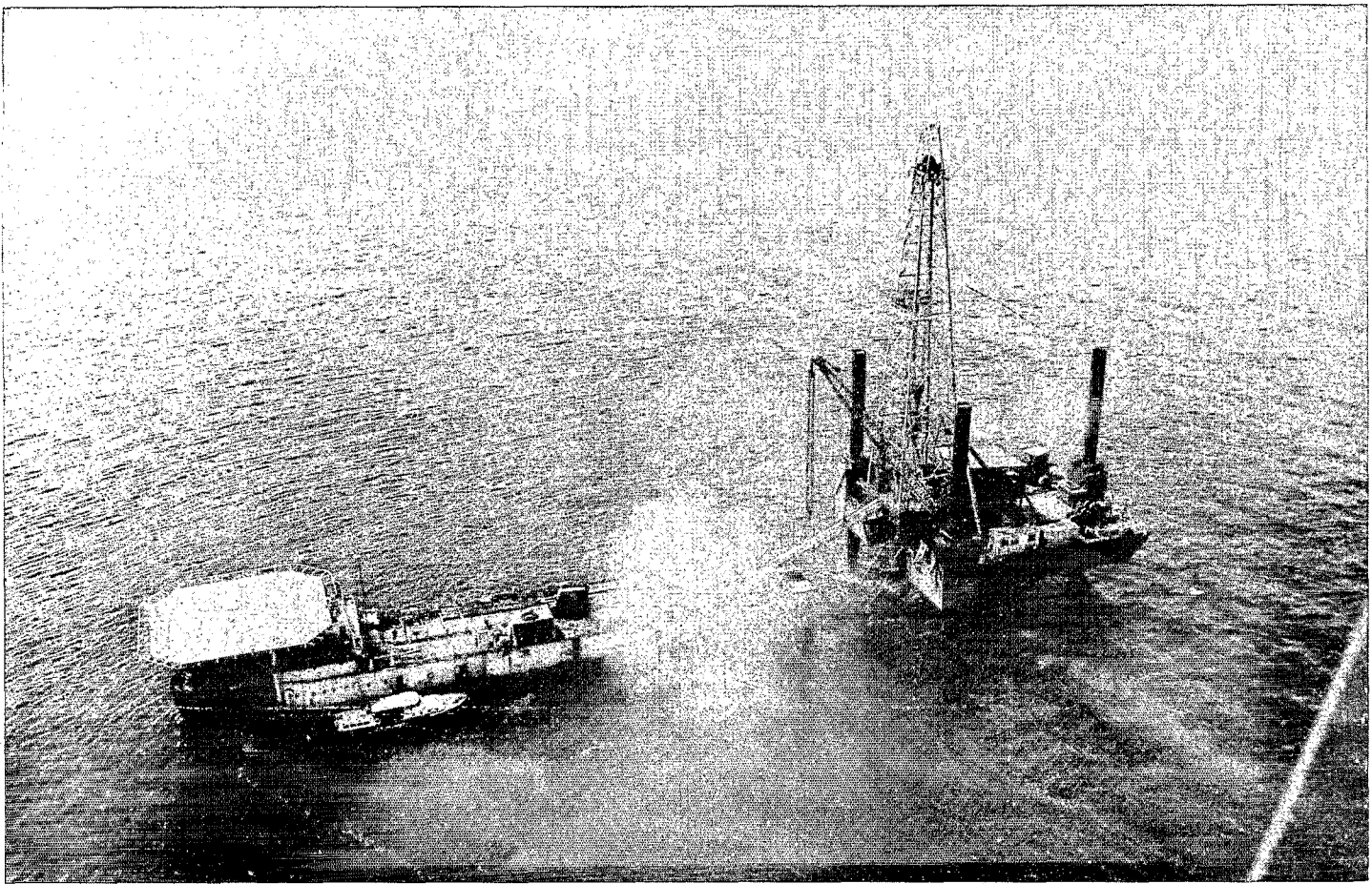
Les éléments figurés

Les éléments figurés, c'est-à-dire non dissous, reposent comme nous l'avons vu sur le sol ou sont inclus dans les couches sous-jacentes à l'état de dépôts ou de filons.

La couverture aqueuse pose évidemment des problèmes pour la découverte comme pour la mise en valeur des gisements sous-marins. Les uns sont d'ordre technique, les autres d'ordre économique.

Au point de vue technique le plateau continental est pratiquement accessible en tous ses points aux différentes méthodes d'exploitation actuellement employées : suçage, dragage, forage, etc... Tous les minéraux présents à moins de deux cents mètres de profondeur sont donc théoriquement dès maintenant à la disposition de l'humanité quel que soit leur mode de présentation (roches en place, état meuble ou consolidé). Il n'en est plus de même au-delà de la rupture de pente où seuls dragage et ramassage par bennes peuvent être envisagés.

Au point de vue économique l'augmentation du coût d'extraction avec



(Rapho-Herschritt)

Gabon, Port Gentil, gisement de pétrole de la SPAF.

la profondeur est un facteur rapidement limitant. Pour qu'un minerai soit exploité, ou pour que son exploitation soit avancée comme hypothèse plausible, il faut, au-delà d'une certaine profondeur, ou bien qu'il présente une teneur remarquablement élevée en un corps dont l'industrie fait une grosse consommation, ou bien qu'il contienne des constituants dont leur rareté sur terre fait qu'elle en éprouve un pressant besoin.

En réalité, et en dehors des hydrocarbures sur lesquels nous reviendrons ultérieurement, la liste des matériaux exploités ou dont l'exploitation éventuelle a récemment défrayé la chronique océanographique se réduit à fort peu de chose. Le cinquième

continent est à peine défloré, si ce n'est sur sa frange côtière. Le talus et les grandes profondeurs sont encore complètement vierges, mis à part les travaux à caractère scientifique ou expérimental. Le tableau 1 résume l'état actuel de la situation.

MATÉRIAUX EXPLOITÉS

Sables, graviers, matériaux de construction.

Sables, graviers, galets sont exploités un peu partout dans le monde, soit au-dessus du niveau de la mer, soit dans la zone de battement des marées, soit en dessous de la laisse

de basse mer. Ce qui n'est pas sans poser certains problèmes de conservation, notamment sur les côtes bretonnes.

Sables métallifères.

Inconnus en France (1), ainsi qu'en Europe, ils comptent ailleurs des sables titanifères, des sables stannifères et des sables thorifères.

Sables titanifères (titane). Connus en zone intertropicale, notamment des deux côtés de l'Atlantique. Exploités en particulier au Sénégal (usine de Sangomar sur le Bas Saloum).

Sables stannifères (étain). Connus et exploités en Malaisie et Insulinde.

Sables thorifères (thorium). Connus et exploités dans le sud de la péninsule indienne.

Tous ces sables sont en général côtiers.

Placers diamantifères.

Connus et exploités au large de l'Afrique du Sud. Les placers (gîtes détritiques) sont disséminés sur le plateau continental (façade atlantique).

Magnétite.

La magnétite est un oxyde de fer (Fe_2O_3). Connue et exploitée au Ja-

TABLEAU 1

	Eléments exploités	Eléments connus dont l'exploitation peut être envisagée comme hypothèse plausible	Eléments recherchés avec intérêt
Plateau continental	Sables, graviers, matériaux de construction Sables métallifères Placers diamantifères	Phosphorites	Minerais de cuivre, d'étain, de plomb et de zinc
Talus continental			
Grandes profondeurs		Nodules océaniques Boues rouges	

(1) A l'exception des sables stannifères de Penestin (Pointe de l'Étain, Morbihan).

pon par une trentaine de mètres de profondeur (2).

MATÉRIAUX CONNUS DONT L'EXPLOITATION PEUT ÊTRE ENVISAGÉE COMME HYPOTHÈSE PLAUSIBLE

Nodules océaniques.

Les nodules sont des concrétions de forme plus ou moins sphérique et de taille variant dans les deux cas qui nous intéressent de celle d'un petit pois à celle d'un gros ballon de plage.

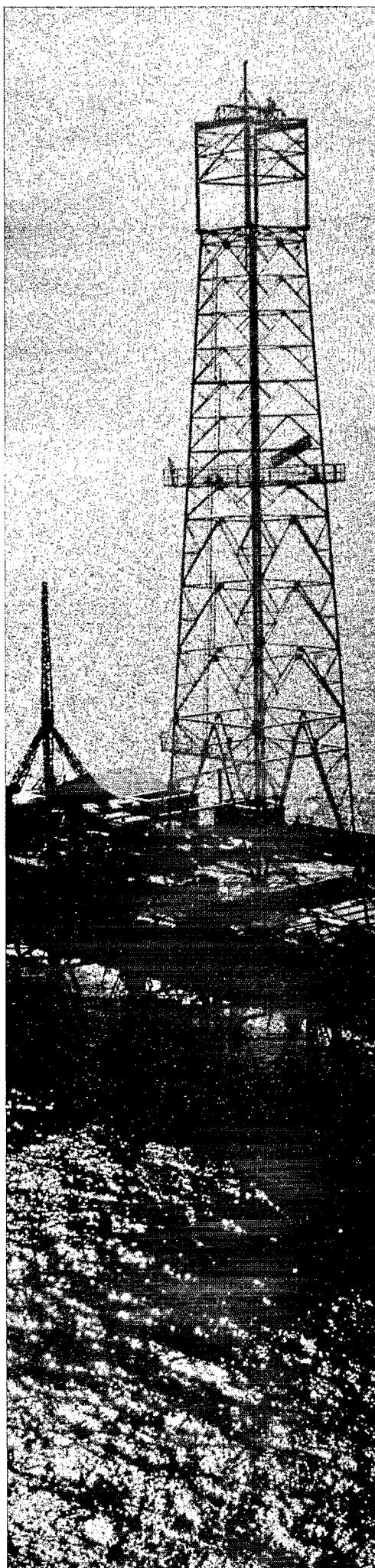
Phosphorites. Les phosphorites se présentent sous forme de champs répartis en général sur le plateau continental et le plus souvent dans les régions à « upwellings » (remontées d'eaux profondes). Elles sont notamment au voisinage de l'Espagne, de l'Australie, du Japon, de l'Afrique du Sud, de l'Argentine et des États-Unis. Pour les phosphorites peu profondes des côtes de Californie le prix de vente pourrait s'établir entre treize et quatorze dollars la tonne, ce qui en raison de leur forte teneur en phosphore les amène au seuil de la compétitivité sur le marché des engrais et des produits chimiques.

Nodules de manganèse. Les nodules de manganèse sont beaucoup plus profonds que les phosphorites. Bien que l'inventaire des surfaces sur lesquelles ils sont disséminés soit loin d'être terminé, on estime dès maintenant qu'elles occupent de 20 à 50 % des grands fonds du Pacifique et sont largement étendues sur ceux de l'Atlantique. La densité de répartition, calculée d'une façon précaire sur quelques sondages effectués surtout par les Américains, donne des chiffres de l'ordre de 15 à 40 000 tonnes au kilomètre carré, ce qui représente au total une énorme réserve de matière première, infiniment supérieure à ce que nous connaissons sur terre.

L'origine de ces nodules est encore discutée, mais on sait que, contrairement à ce qui se passe pour la majorité des ressources minérales, ils continuent à se former actuellement, et ceci à un rythme qui dépasse celui d'une éventuelle exploitation. Leur composition varie d'un point à l'autre. On a pu y déceler jusqu'à vingt-huit constituants. Néanmoins le manganèse est toujours dominant (20 à 50 %) et généralement accompagné de nickel, de cobalt et de cuivre (chacun de 1 à 2 %).

D'après leur composition il faudrait que le prix des nodules de manganèse s'établisse, une fois débarqués, autour de soixante dollars la tonne. C'est sur cette base que doivent être

(2) Une mine de fer sous-marine a également été exploitée beaucoup plus près de nous, à Diélette (Manche), jusqu'en 1962. Mais son accès se faisait par galeries à partir du rivage.



(Rapho - B. Brake)

conçus et calculés les engins et installations nécessaires à leur extraction et à leur manutention. La question n'en est encore qu'aux supputations, voire aux timides études préliminaires, mais il n'est pas exclu que face à la raréfaction de certaines sources terrestres elle passe brutalement au premier plan de l'actualité.

Boues rouges.

Les boues rouges, formées de particules extrêmement ténues, couvrent de 25 à 30 % de la surface du fond des océans. On trouve dans ces boues des teneurs moyennes de 20 % d'alumine, 10 % d'oxyde de fer, 3 % de sels de magnésium, des traces de manganèse, de nickel, de cobalt, de cuivre et de vanadium. Sans intérêt économique immédiat malgré leur richesse très supérieure à celle de bien des minerais terrestres, elles ne sont en général citées par les océanographes que pour rappeler l'extraordinaire potentiel constitué par les couches sédimentaires des grands fonds océaniques.

ÉLÉMENTS RECHERCHÉS

En dehors des éléments exploités et des éléments connus se placent les éléments recherchés dont la nature peut d'ailleurs varier d'un pays à l'autre en fonction des ressources propres de son territoire. Pour nous en tenir à l'industrie française les minéraux dont elle aurait le plus besoin sont d'après le **Progrès Scientifique** (114, décembre 1967) : le cuivre, l'étain, le plomb et le zinc. Le Bureau de recherches géologiques et minières (B.R.G.M.) multiplie les sondages, notamment dans le Massif Central et en Bretagne, pour tenter de remédier à cette carence.

Parallèlement à ceux-ci la prospection méthodique du plateau continental serait envisagée par la Compagnie Générale pour les Développements Opérationnels des Richesses Sous-Marines (D.O.R.I.S.) qui, filiale du groupe E.R.A.P., orientait jusqu'à maintenant ses activités uniquement vers les hydrocarbures, mais vient de décider de les élargir. Perspective à ne pas perdre de vue, ni par les géologues, ni par les industriels. Peut-être y a-t-il là, en effet, une chance à saisir pour chacun d'eux : les premiers de mieux connaître leur précontinent, les seconds de participer à l'exploitation des richesses qu'il pourrait éventuellement révéler.

Les hydrocarbures.

Le monde consomme aujourd'hui en quelques jours autant de pétrole qu'il en consommait en un an au début du siècle.

La production mondiale qui était de l'ordre du milliard de tonnes il y a une centaine d'années a franchi le cap du milliard en 1960 et aura probablement doublé par rapport à ce dernier chiffre d'ici deux ou trois ans. Parallèlement à cette mise en valeur spectaculaire des hydrocarbures liqui-

des, les hydrocarbures gazeux (gaz naturels) ont pris depuis la dernière guerre une place considérable sur le marché des sources d'énergie.

Ces données suffisent à justifier le vaste mouvement qui s'opère actuellement vers la recherche et l'exploitation de nouveaux gisements. Mais alors même qu'il reste beaucoup à découvrir sur les continents, « pétroliers » et « méthaniens » s'intéressent de plus en plus au plateau continental, entraînant bon gré, mal gré les océanographes dans leur sillage. Trois raisons peuvent être invoquées à l'appui de ce comportement.

La première se fonde sur la continuité de texture arrière-côte/plateau. Il était naturel, comme le rappelle R. Geneslay (op. cit.), de rechercher au-delà des rivages le prolongement des provinces pétrolières littorales du Vénézuéla, du Golfe du Mexique et plus près de nous, dans le vieux monde, des régions voisines de la Caspienne. Ceci d'autant plus que dans des lagunes, ou en tout cas par faible hauteur d'eau, l'implantation de derricks de forage n'est pas sensiblement plus difficile qu'à terre.

La seconde fait appel aux connaissances acquises sur la nature du plateau, encore sommaires dans le détail, mais géographiquement étendues à l'ensemble de la planète : les terrains sédimentaires où les conditions géologiques propres à la présence du pétrole pourraient être réunies couvrent une surface considérable, de l'ordre de dix millions de kilomètres carrés.

La troisième tient aux remarquables progrès des techniques de prospection. Si pour le géologue, qui travaille par voie directe, la présence d'une couche d'eau est toujours un obstacle, il en va tout autrement pour le géophysicien, qui travaille par voie indirecte et aux yeux duquel cette couche n'est autre qu'un « mort terrain » supplémentaire dont les caractéristiques physiques sont parfaitement connues. Or c'est essentiellement aux techniques géophysiques

que font appel les prospecteurs : gravimétrie, magnétisme et sismique. On déduit la nature des terrains sous-jacents :

dans les deux premiers cas des altérations constatées par gravimètres et magnétomètres de la pesanteur et du magnétisme terrestre ;

dans le troisième des caractéristiques à la réception d'ondes mécaniques (acoustiques ou sub-acoustiques) émises au niveau de ces terrains et enregistrées après réflexion ou réfraction sur leurs différentes couches.

Mais quel que soit le procédé employé il aboutit dans la meilleure hypothèse à localiser les terrains dont les caractéristiques font supputer qu'ils contiennent du pétrole. Pour vérifier cette supputation, comme pour passer de la phase d'exploration à la phase d'exploitation, une seule solution : procéder à des forages.

Les forages sous-marins.

Les forages sous-marins sont réalisés avec des appareils classiques (tré-pans) installés soit sur des plates-formes fixes, soit sur des plates-formes mobiles qui, une fois remorquées sur le site choisi, affermissent sur le fond des piliers métalliques par rapport auxquels elles se hissent, au moyen de dispositifs mécaniques, à une certaine hauteur au-dessus de la surface.

L'évacuation des hydrocarbures est, en cas de succès des opérations, assurée par des **têtes de forage** situées à l'origine sur la plate-forme elle-même, de plus en plus maintenant sur le fond de la mer. Si la côte est proche (quelques kilomètres au plus) ces têtes y sont directement reliées par « pipe-line ». Si elle est éloignée le circuit est jalonné de plates-formes intermédiaires qui regroupent des émissions de plusieurs forages et procèdent à l'occasion à la séparation des gaz.

Malgré de gros investissements en matériel, mais en raison de la facilité

des déplacements et du travail, le coût de la prospection en mer est en moyenne cinq fois moins élevé que le coût de la prospection à terre. En contrepartie le prix de revient des forages est six fois plus lourd.

Par ailleurs l'implantation des installations pétrolières est dans l'état actuel de la technique considérée comme possible jusqu'à des profondeurs de l'ordre d'une cinquantaine de mètres. Au-delà, dit Geneslay (op. cit.), les solutions connues « feront place à des solutions neuves faisant intervenir soit des navires, soit des installations semi-immersées ou même immergées. Il faudra alors résoudre le problème de l'indispensable fixité par des ancrages statiques ou dynamiques, ces derniers faisant intervenir des propulseurs à hélices dont le fonctionnement serait asservi à des dispositifs de repérage radio-électriques, ultrasonores, ou encore à l'inclinaison d'un câble amarrant l'installation sur un corps mort ».

Facilement accessible aux chercheurs, la fraction la plus profonde du plateau continental est donc encore interdite aux exploitants. Il est fort probable que ce n'est pas pour longtemps.

Production mondiale des gisements sous-marins. Perspectives régionales.

Deux cents plates-formes sont en service dans le monde, dont une certaine dans le Golfe du Mexique. Les gisements sous-marins fournissent déjà 15 % de la production de pétrole, 6 % de la production de gaz naturels. On sait les énormes réserves que contiennent à nos portes les fonds de la Mer du Nord. Ceux de la Manche paraissent beaucoup moins riches. Quant à ceux de l'Atlantique, ils restent encore énigmatiques et feront sans doute l'objet dans les années qui viennent de prospections sérieusement programmées. Une grosse partie de l'activité du navire océanographique « J. Charcot » leur sera probablement consacrée.

Las Palmas : forage sous-marin

(Galliphot-Colos)

