



LE SONDAGE SISMIQUE CONTINU

UN EXEMPLE D'APPLICATION DE L'ACOUSTIQUE SOUS-MARINE

par

Olivier LEENHARDT

Géophysicien *

I. GÉNÉRALITÉS.

L'objectif du géophysicien océanographe est la connaissance de la constitution géologique du tréfonds marin.

Les méthodes géologiques comprennent : la bathymétrie, l'observation directe (par plongeur ou sous-marin d'exploration), la photographie par troïka, les dragages et les carottages ; elles ne donnent de renseignements que sur la pellicule superficielle, le plus souvent vaseuse, du fond de la mer.

Nous devons donc recourir aux méthodes indirectes de l'arsenal géophysique. La plupart d'entre elles sont, si j'ose dire, classiques. Elles sont définies à terre et appliquées, sans originalité propre, à l'étude du domaine marin.

— La gravimétrie, avec une précision de quelques milligals, permet de définir les grands ensembles géologiques (échelle mégamétrique de L. Gangeaud [8]).

— Le magnétisme donne des renseignements du même ordre. Dans certains cas, on peut interpréter les anomalies magnétiques à l'échelle kilométrique.

— La réfraction sismique mesure la vitesse de propagation des ondes élastiques dans les couches de l'écorce terrestre. L'épaisseur de ces couches n'est exploitable qu'à l'échelle kilométrique.

— La réflexion sismique avec explosif, telle qu'elle a longtemps été mise en œuvre par les pétroliers, donne un peu plus de précision mais son emploi est lourd.

Le sondage sismique continu, comme la réflexion sismique, ne mesure que les temps de parcours des ondes entre l'émetteur, le réflecteur et le récepteur, mais il est d'un emploi plus simple et son usage se développe rapidement. Ses caractéristiques sont les suivantes :

1. le travail est effectué navire en route (à la plus grande vitesse possible) ;
2. l'émission est fréquemment répétée ;
3. les signaux réfléchis par le fond et le tréfonds marins sont reçus, en général, sur une seule trace ;
4. l'enregistrement graphique se présente sous la forme d'une bande de sonde enregistrée sur papier sec ou humide, (Leenhardt, [12, 14, 15]) ;

5. lorsque le fond est peu accidenté, l'enregistrement continu permet facilement de lever le doute sur la position des réflecteurs, sous le fond ou latéraux.

Le terme « sondage sismique continu » traduit l'expression anglaise « continuous seismic profiling ».

Nous venons de voir le vaste éventail des méthodes géophysiques utilisables en mer. Très généralement donc, les méthodes des différentes disciplines qui constituent ce qu'il est convenu d'appeler océanographie, ne diffèrent pas de ce qu'elles sont à terre. Seules les techniques de mise en œuvre sont spécifiques : elles doivent s'adapter à ce milieu surprenant qu'est la mer et sa surface. Ce qui fait l'unité de l'océanographie, c'est seulement ce lieu commun de contingences que représente le travail à la mer.

Nous voyons ainsi l'originalité du sondage sismique continu dans la méthodologie. Dérivé de l'écho sondage, il n'a pas son équivalent à terre et procède uniquement des possibilités offertes par l'acoustique sous-marine.

Les critères d'interprétation en sondage sismique continu sont :

- les temps de trajet des ondes ;
- les formes des réflecteurs enregistrés ;
- les séquences de réflexions, leurs caractères et leurs fréquences.

On admet, en première approximation, que la couche d'eau est homogène et isotrope et l'on applique les lois de l'optique géométrique.

Ces éléments ne permettent pas d'obtenir une définition précise de la nature géologique des miroirs observés. Celle-ci peut être définie avec de bonnes probabilités par des recoupements entre les données des différentes autres méthodes indirectes ou, avec certitude, par carottage. Mais cette opération est rarement possible.

Après avoir étudié les matériels (émetteurs et récepteurs) et leurs différents cadres d'emploi, nous montrerons sommairement quelques-unes des analyses permettant de parvenir au résultat cherché.

Le Musée océanographique de Monaco dispose actuellement d'un matériel assez complet, qui est bien représentatif de la gamme de matériel existant dans le monde et qui correspond à l'éventail d'ap-

* Au Musée océanographique de Monaco.

pareils distincts nécessaires pour résoudre les problèmes géologiques posés.

II. MATÉRIELS.

A. Émetteurs.

Les émetteurs que nous utilisons fonctionnent tous par décharge de capacités. Celles-ci peuvent être de l'ordre du microfarad sous 1 000 V dans le cas du sondage de vase (énergie inférieure à 1 J), de l'ordre de 50 μ F sous 4 000 V dans le cas du « boomer » (énergie de quelques centaines de joules) ou de l'ordre de 1 500 μ F sous 4 000 V dans le cas du « sparker » (énergie de plusieurs milliers de joules).

D'autres appareils de sondage sismique continu, aux possibilités analogues à celles du « sparker », utilisent des principes différents et ne font pas appel à l'électronique. Ce sont des projecteurs tels que :

1. le canon à gaz, utilisant l'explosion d'un mélange de propane et d'oxygène (Ewing et Tirey [6], Crouzet [3]) ;

2. le canon à air, utilisant la décharge d'un réservoir chargé d'air comprimé à plus de 100 bars (Ewing et Zaunere [7]) ;

3. le flexotir, utilisant l'explosion d'une cartouche de dynamite de 50 g dans une sphère en fonte percée de trous (Cholet *et al.* [1]).

Dans tous les cas, on utilise une impulsion courte et une large bande passante à la réception.

B. Transducteurs.

1. Piézoélectriques.

Les transducteurs de sondage bathymétrique ou de sonar peuvent être utilisés pour le sondage de vase. On émet une oscillation en régime transitoire. L'impulsion acoustique résultante est très brève. On obtient ainsi des résolutions inférieures au décimètre avec des pénétrations dépassant le décamètre.

Nous disposons de plusieurs transducteurs de fréquences nominales allant de 5 kHz à 12 kHz avec des niveaux d'émission (définis pour les régimes transitoires) voisins de 105 dB (Leenhardt [13]). Leur résolution est égale à la demi-longueur d'onde de l'impulsion émise.

A partir d'un bathyscaphe ou d'un sous-marin d'observation, il est possible d'effectuer des mesures

d'épaisseur de vase. Nous l'avons (Edgerton et Leenhardt [5]) réalisé sur la soucoupe plongeante du commandant Cousteau.

Utiliser une impulsion aussi courte que possible, revient évidemment à perdre de l'énergie pour gagner de la résolution ; il faut accepter ce sacrifice pour permettre une comparaison aussi précise que possible des enregistrements et des carottes (Serruya et Leenhardt [17]).

2. Émetteurs non réciproques.

a) Le « boomer ».

Inventé par Edgerton, le « boomer » se compose d'une bobine de cuivre plate à laquelle est juxtaposée une plaque d'aluminium. Lors de la décharge des capacités de l'émetteur dans la bobine, les courants induits dans la plaque écartent violemment celle-ci de la bobine.

La durée d'impulsion est inférieure à la demi-milliseconde.

On utilise deux versions du « boomer » différant par le mode de fixation de la plaque. (Tableau I).

Les distances sont indiquées en temps double de parcours.

La résolution globale qui retient l'attention ici est l'intervalle de temps qui sépare deux signaux discernables ; elle correspond donc à la durée d'impulsion augmentée du temps de trajet du projecteur à la surface et retour au projecteur, auxquels on ajoute la double durée de trajet de l'hydrophone à la surface.

Le rendement du « boomer » est d'environ 2 %.

b) Le « sparker ».

Le « sparker » utilise simplement le bruit créé dans l'eau par une étincelle électrique. Il en existe de nombreux types. Les plus gros fournissent 100 000 J sous 10 000 V. Nous travaillons à environ 1 500 μ F sous 4 000 V, soit une puissance nominale de 10 000 J.

La résolution est d'environ 20 ms, la pénétration peut dépasser 2 s sous plus de 3 s (ou 2 300 m) d'eau.

La répartition spectrale des énergies de ces sources est mal connue.

Le spectre émis par le « sparker » est extrêmement large : au-dessus de 20 000 Hz, Hersey s'en est servi pour sonder la D.S.L. (Deep Scattering Layer) ; néanmoins, la fréquence fondamentale de notre « sparker » E.G. & G. paraît se situer autour de 60 Hz.

TABLEAU I

	V EN VOLTS	C EN MICROFARADS	ÉNERGIE EN JOULES	RÉSOLUTION EN MILLISECONDES	PÉNÉTRATION, SOL. EN MILLISECONDES	SOUS UNE COUCHE D'EAU EN MILLISECONDES
« BOOMER » DE PRÉCISION PETIT	3 500	48	300	2	130	200
« BOOMER »	3 500	160	1 000	5	300	400

Le spectre du « boomer » est plus étroit ; à 1 000 J, la fréquence fondamentale est de 200 Hz environ ; à 300 J, de l'ordre de 1 000 Hz.

3. Hydrophones.

Les dimensions du récepteur L et la distance D de l'émetteur au récepteur sont liés à la profondeur H de l'eau par la relation empirique :

$$L \leq \frac{D}{10} \leq \frac{H}{100}$$

Cette relation correspond aux limites pratiques de mise en œuvre des différents appareils.

1) L'angle sous lequel l'émetteur voit le récepteur sur le miroir que constitue le fond doit être petit, pour ne pas augmenter la résolution.

2) Les rayons réfractés sur le fond ne doivent pas intervenir.

L'usage de la céramique est généralisé, sauf aux très basses fréquences.

a. Hydrophone « ponctuel ».

L'hydrophone ponctuel est utilisé avec le « boomer ». Nous employons, faute de mieux, un « 8 ball » Chesapeake pendu à l'avant du bateau, par temps calme, ou un MP-8 Geospace à la traîne. Il reste beaucoup à faire pour diminuer les bruits d'écoulement sur les hydrophones.

b. Hydrophone « allongé ».

Avec le « sparker », nous utilisons un hydrophone Chesapeake Towflex M-16, de longueur 30 m, traîné à 300 m, derrière le navire. Il se compose de 20 récepteurs en céramique immergés dans un tuyau de néoprène de 7,5 cm de diamètre, rempli d'huile siliconée sous la pression de 1,4 atmosphère.

Les résultats obtenus sont identiques ou meilleurs que ceux qu'indique la littérature lorsque l'on utilise des hydrophones différents, mais couplés avec des projecteurs de puissance nominale bien supérieure : « sparker » 100 000 J de Woods Hole Oceanographic Institution (Hersey [9]), airgun de Lamont geological Observatory (Le Pichon [16]), ou flexotir de l'Institut français du pétrole (Cholet *et al.* [1]) ; cela provient

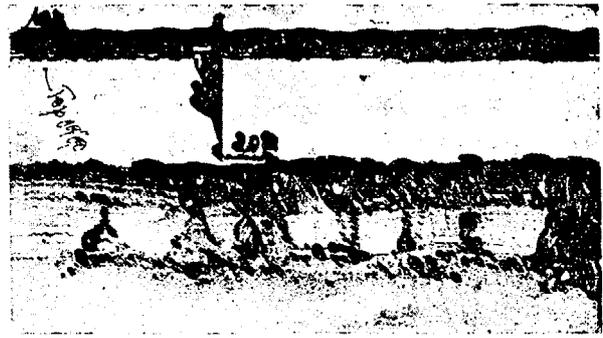


FIG. 1. — Enregistrement au sondeur de vase Edgerton (12 kHz). La bande noire en haut de l'enregistrement correspond au signal d'émission (surface de l'eau).

Le fond apparaît :

- 1) sous forme de bancs lités ;
- 2) de figures triangulaires : les structures en pagode ;
- 3) d'un grisé diffus.

Les bancs lités correspondent à la vase rubanée du Léman (vase actuelle) ; les structures en pagode sont inexpliquées ; le grisé diffus est la moraine.

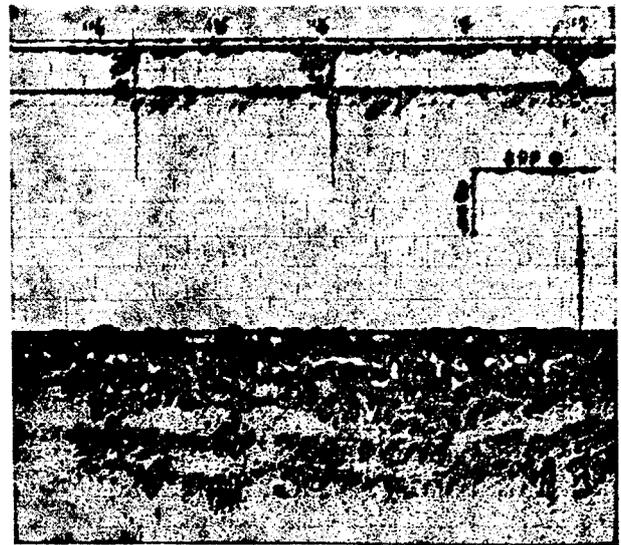


FIG. 2. — Enregistrement au petit « boomer » dans le lac Léman (entre Évian et Lausanne).

Au-dessus de la molasse (voir texte) un niveau non-identifié correspond vraisemblablement à la moraine sous glaciaire. Deux séries de niveaux vaseux surmontent cette moraine. La partie supérieure est plus finement stratifiée.

TABLEAU II

ÉMETTEUR	RÉCEPTEUR	FRÉ- QUENCE Hz	NIVEAU D'ÉMIS- SION S, (dB)	ÉNER- GIE J	PÉNÉ- TRATION mn	RÉSO- LUTION mn	OBJET	REMARQUES
Transducteurs	Piezoélectriques	12	105	1/10	< 35	0,1	Sondage de vase	Transducteur ADP
		10	95					
		6	105				Sondage en soucoupe	
		5	108		> 10	0,2	Sondage de vase	Vibrations radiales avec cône.
Boomer (petit)	Hydrophone ponctuel	300	124	1 000	400	5	Sondage sur le plateau continental.	Vibrations longitudinales (type le Bruse)
Boomer (de précision)	Hydrophone ponctuel	1 000	?	300	150	2		
Sparker	Hydrophone allongé	60	?	10 000	3 000	20	Utilisable en toutes zones.	

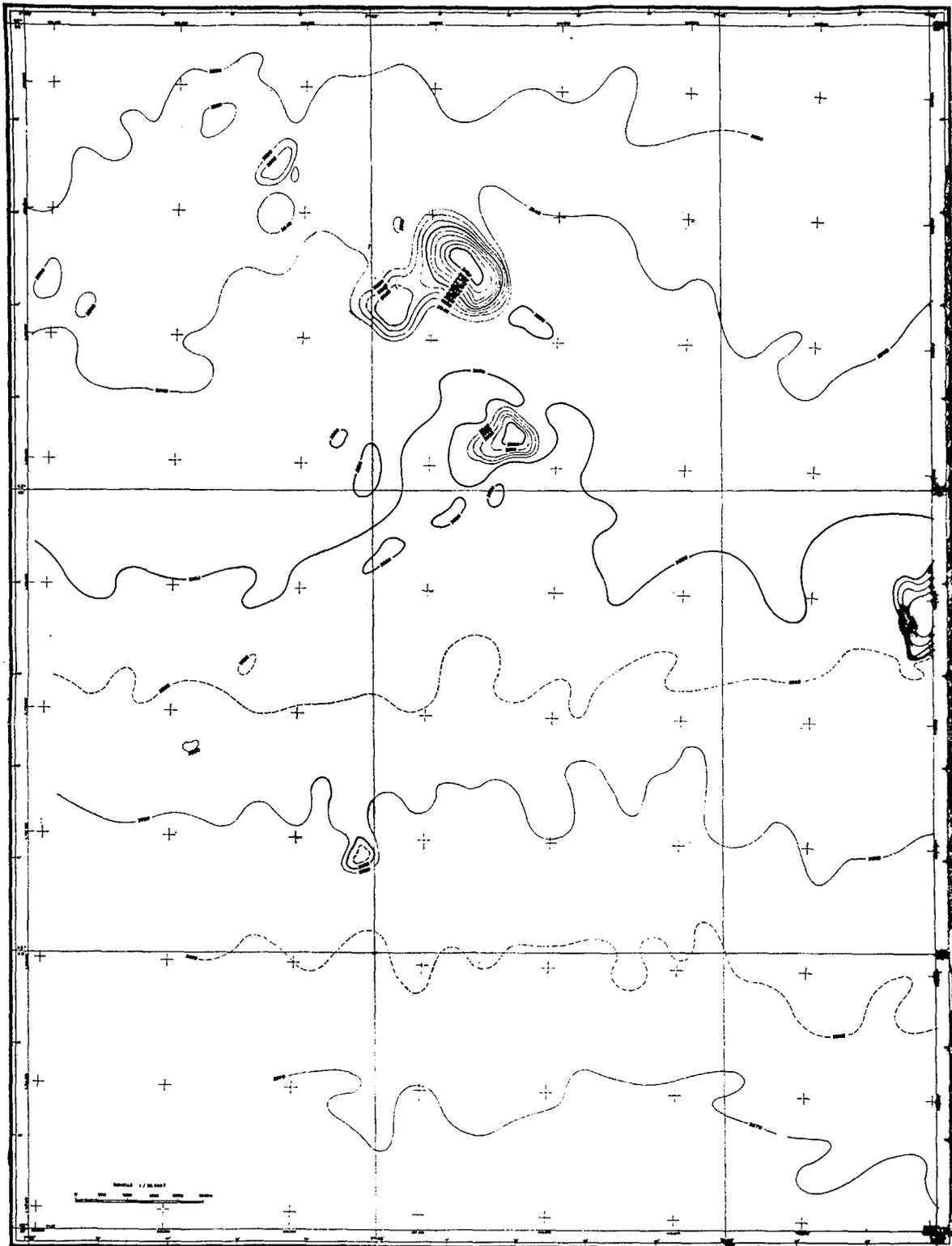


Fig. 3. — Carte en isochrones, temps doubles. Sondage du *Bannock* (EDO UQN/1 A à 12 kHz) sur la zone A. Le quadrillage est à maille de 700 m environ.

On peut considérer que le cadre de la figure représente en première approximation, la maille élémentaire du fond entre Provence-Corse et Baléares.

sans doute du fait que cet hydrophone permet d'améliorer sensiblement le rapport du signal au bruit hydrodynamique de l'écoulement de l'eau sur ce dernier.

III. RÉSULTATS.

Nous disposons d'un éventail d'appareillages capables de résoudre les différents problèmes posés par la géologie. En effet, à chaque appareil corres-

pond une longueur d'onde fondamentale et une puissance, donc une résolution géologique et une pénétration donnée. (Tableau II).

A peu de chose près, la résolution est le centième de la pénétration.

a) Sondage de vase.

Les transducteurs piézoélectriques sont utilisés en sondage de vase. Les bandes passantes employées sont de 6 à 12 kHz autour de la fréquence nominale.

Le sondage de vase permet au sédimentologue de placer ses carottages en connaissance de cause, en tenant compte de la coupe des premiers mètres du fond de la zone étudiée.

Ici, l'interprétation est donc directe (Fig. 1).

Ce type de sondage intéresse, au premier chef, les études de propagation en mer en précisant les conditions au fond.

b) Étude du plateau continental.

Pour l'étude superficielle du plateau continental, nous utilisons le « boomer » et l'hydrophone ponctuel. Les filtres de l'enregistreur sont réglés de 200 à 2 000 Hz.

Dans le Léman, sous des niveaux régulièrement stratifiés, apparaissent des réflecteurs irréguliers avec une surface en marche d'escalier largement ondulée. Par continuité, de la côte suisse à tout le fond du lac, ce réflecteur représente la molasse tertiaire (Fig. 2).

c) Sondage dans la plaine abyssale.

Par plus de 2 000 m d'eau, seul le « sparker », couplé à l'hydrophone « allongé », donne des résultats intéressants.

La bande de fréquences de l'enregistreur varie de 20 à 200 Hz et de 30 à 400 Hz, selon le type d'appareil enregistreur (Fig. 3).

Par écho sondage, Cousteau et Alinat [2] avaient remarqué sur le fond plat, à — 2 700 m, de la plaine abyssale ligurienne, de petites protubérances, longues d'un mille, s'élevant jusqu'à 60 m environ au-dessus du fond. En sondage sismique continu, on observe que ces protubérances correspondent à des dômes intrusifs dans les sédiments sous-jacents, relevant les strates à leur contact (Fig. 4).

C'est la morphologie classique des dômes de sel.

Les carottages étant pour l'instant impossibles, nous avons fait appel à la magnétométrie pour éliminer l'hypothèse de venues magmatiques.

Le « sparker » est utilisable aussi sur le plateau continental. Au sud du Rhône, il donne des résultats équivalents à ceux qu'obtiennent toutes les autres méthodes : le réflecteur profond est interprété, par continuité avec les profils et les sondages de Camargue, comme la vallée pontienne du Rhône (Leenhardt [11]) (Fig. 5).

CONCLUSION

Le sondage sismique continu est une méthode originale en océanographie. Il s'emploie à différentes échelles avec divers appareillages, correspondant aux divers types de problèmes géologiques. Il s'interprète à l'aide d'arguments géologiques ou géophysiques indépendants.

Les spectres de fréquences utilisés sont souvent mal connus et les récepteurs mis en œuvre loin d'être parfaits.



FIG. 4. — Sondage sismique continu « sparker » sur la zone A (10 milles Est de la Bouée-laboratoire). Sparker 9 000 J. Flûte Chesapeake. Filtres 20-200 Hz. Enregistreur E.G. et G. 254. Echelle 2,5 s. Lignes d'échelles 1 s. Émission 1/3. Réception 1.

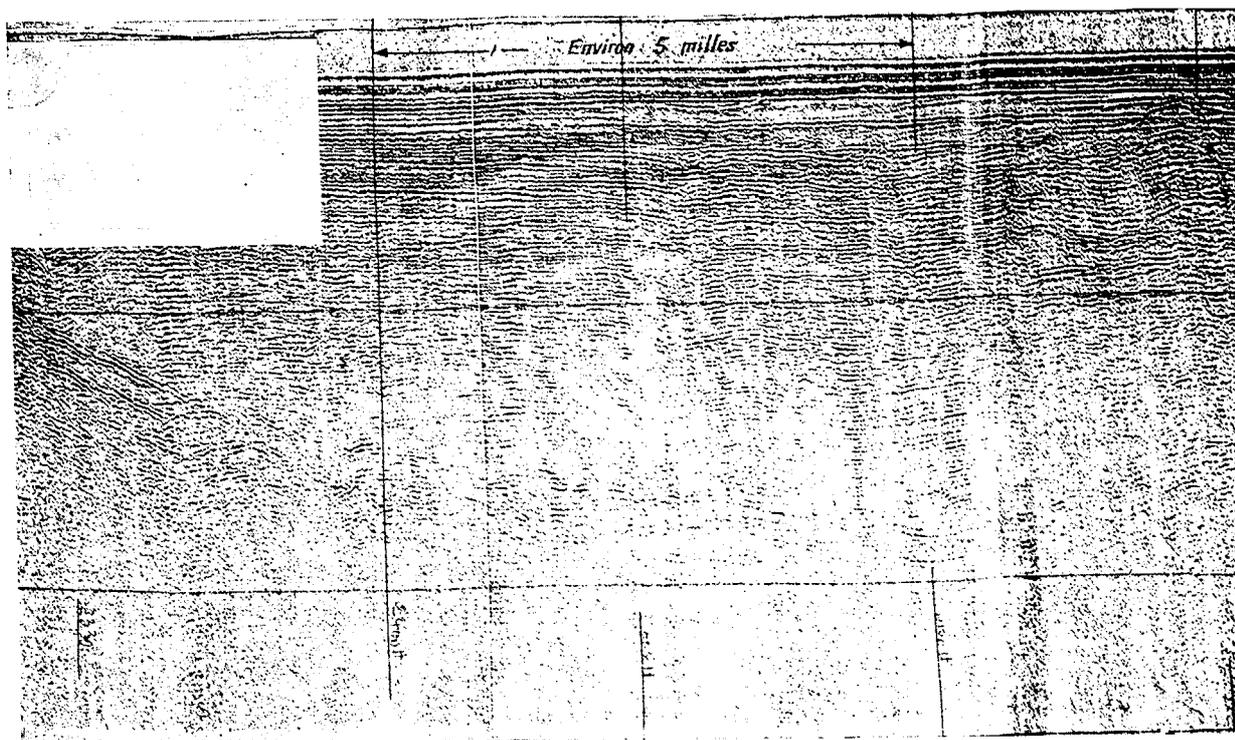


FIG. 5. — Enregistrement sur le 43°10'N au sud du Rhône. Golfe du Lion. *Calypso*, le 13 septembre 1966. L'hydrophone Chesapeake est ici légèrement dégonflé. Son bruit hydrodynamique en est augmenté, ce qui explique que le fond de l'enregistrement soit moins clair que sur la figure 4.

De nouveaux appareillages annoncés sont fondés sur des principes différents ; utilisant au mieux les possibilités offertes par l'acoustique sous-marine, ils devront perfectionner l'outil de reconnaissance géologique existant.

Un point particulier reste à résoudre : le sondage sur la pente continentale. Les échos latéraux se confondent avec les réflexions sur le tréfonds. Peut-être une technique élaborée de traitement du signal permettra-t-elle de résoudre ce problème ?

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CHOLET (J.), FAIL (J. P.), GRAU (G.). Le flexotir. Com. au meeting de l'European Association of Exploration Geophysicists, (1966).
- [2] COUSTEAU (J.-Y.), ALINAT (J.). Accidents de terrain en mer de Ligurie. Océanographie géologique et géophysique de la Méditerranée occidentale. Colloque national du C.N.R.S., Villefranche-sur-mer (avril 1961), pp. 121-123.
- [3] CROUZET (P.). Nouveaux procédés de sismique marine : le « sparkler » et le « gas exploder ». Bull. Ass. Fr. Techniciens Pétrole, (1963), pp. 659-670.
- [4] EDGERTON (H. E.), HAYARD (G. G.). The « boomer » sonar source for seismic profiling. *J. Geophys. Res.*, (1964), **69**, n° 14, pp. 3033-3042.
- [5] EDGERTON (H. E.), LEENHARDT (O.). Mesures d'épaisseur de la vase sur les fortes pentes du Précontinent. *C. R. Acad. Sci., Fr.*, (1966), **262**, pp. 2005-2007.
- [6] EWING (J. I.), TIREY (G. B.). Seismic profiler. *J. Geophys. Res.*, (1961), **66**, n° 9, pp. 2917-2927.
- [7] EWING (M.), ZAUNERE (R.). Seismic profiling with a pneumatic sound source. *J. Geophys. Res.*, (1964), **69**, n° 22, pp. 4913-4915.
- [8] GLANGEAUD (L.). Les transferts d'échelle en géologie et géophysique. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (1962), **4**, n° 7, pp. 912-961.
- [9] HERSEY (J. B.). The sea. Continuous reflection profiling. *Interscience Publishers*, New-York, (1963), **3**, pp. 47-71.
- [10] HERSEY (J. B.). Sedimentary basins of the Mediterranean sea. Submarine geology and geophysics. *Colston paper*, n° 17, (1965), Butterworths., pp. 75-91.
- [11] LEENHARDT (O.). Application de la méthode de statistiques de ΔT à l'étude des sédiments meubles du golfe du Lion. Thèse de 3^e Cycle, (1962), Paris, Océanographie physique, 67 p.
- [12] LEENHARDT (O.). Aperçu sur les techniques et méthodes de sismique marine. *Bull. Inst. océanogr.*, Monaco, (1963), **60**, n° 1269, 64 p.
- [13] LEENHARDT (O.). Le Mud penetrator. *Bull. Inst. océanogr.*, Monaco, (1964), **62**, n° 1303, 44 p., 19 fig.
- [14] LEENHARDT (O.). Le sondage sismique continu. *Rev. Géogr. phys.*, (1965), **II**, **7**, n° 4, pp. 285-294.
- [15] LEENHARDT (O.). Suggestions pour le sondage des fonds de vase fluide. *Rev. hydrogr. internation.*, (1966), **43**, n° 1, pp. 63-72.
- [16] LE PICHON (X.). Étude géophysique de la dorsale médio-Atlantique. *Cah. océanogr., Fr.*, **XVIII**, (1966), pp. 551-620 et pp. 669-713.
- [17] SERRUYA (C.) et LEENHARDT (O.). Étude par carottage d'une structure mise en évidence par le sondeur de vase dans le lac Léman. (*A paraître*).