

## Session 8 : Unmanned deep sea observatories

## OCEAN BOTTOM SEISMIC OBSERVATORIES

Félix Avedik

Marine Geosciences Department, Ifremer Centre de Brest, BP 70, 29280 Plouzané cédex, France.

Obtaining a detailed image of the Earth's interior is considered by the earth scientist as an important step towards comprehension of the functioning of the globe as a system.

Although the first images were obtained by Wiechert, Gutenberg and others at the end of the XIXth century from earthquake modelling, it was not thought to extend seismic experiments and observations into marine areas until the late 1930's.

Detecting and localizing nuclear blasts was an essential stimulus of the actions undertaken in the 1960's to emplace seismological observatories on the seafloor.

The plate-tectonic theory, in which the oceanic areas play a major role, greatly accelerated the evolution of modern oceanology. Since 1970, benefiting from scientific programs and the parallel development of microelectronics and computer science, the ocean bottom seismology has become a recognized discipline of geophysics.

The contribution of Ifremer's department of Marine Geosciences, in helping to advance this area of research, has been significant since 1972.

Our first system was designed in 1972 for work in shallow water (up to about 200 m depth) on the continental shelf, and was used to explore the deeper geological structure of the English Channel and the Western Approaches.

The need for refraction studies to explore the deep structure of the margins and ocean-continent transition zones led us to design a deep-sea Ocean Bottom Seismograph (OBS) MK I in 1975, rated to 6 000 metres depth. This system introduced, for the first time, the concept of "isolated seismic sensors". This principle was adopted later on by other instrument designers.

The OBS MK II was constructed in 1978, namely to study interferences between the instrument and the "isolated seismic sensors" as well as to test, under real operating conditions, an instrumental design which makes use of the "long inverted pendulum" concept. A series of four instruments were built, which also incorporated some innovative features in OBS technology, such as high density digital recording (Schlumberger 2000) permitting 130 hours of continuous recording for the instruments.

A specialized instrument, the Ocean Bottom Vertical Seismic Array (OBVSA) was designed and built in 1984 primarily for lithospheric and tomographic investigations where low noise levels and separation of the wavefronts, obtained through the directional characteristics of the array, are important. The array, having multiple seismic channels, is emplaced vertically on the seafloor, up to maximum water depths of 6000 metres.

A new system, the Ocean Bottom Seismic System (OBSS), was designed in August 1990 aiming at the construction of a variety of instruments from basic modules. This concept has been developed in response not only to the need for more and more elaborate seismic observations, but also to meet stringent operational and cost requirements.

## OBSERVATOIRES SISMIQUES SUR LE FOND DE LA MER

Félix Avedik

Département Géosciences Marines, Ifremer Centre de Brest, BP 70,  
29280 Plouzané Cedex, France.

### Introduction

Obtenir une image de plus en plus détaillée et précise de l'intérieur du globe terrestre est l'un des préalables indispensables pour la compréhension de son fonctionnement en tant que système.

Pour préciser la première image obtenue à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle par Wiechert, Gutenberg et d'autres à l'aide d'observations sismologiques faites à terre, les premières expériences pour étendre ces observations au domaine marin ne furent entreprises qu'à la fin des années 30. Pendant ces expériences pionnières, au large des côtes américaines, les capteurs sismiques, les géophones, assurant "l'écoute", ont été positionnés sur le fond à l'aide d'un câble électrique. Ils restaient reliés par ce câble au navire stationnaire en surface, sur lequel les signaux furent enregistrés pendant la durée de l'expérience. Lors de ces expérimentations, les premiers pas vers les instruments automatiques, indépendants de la surface, ont été franchis également.

A la fin des années 50, le niveau du "bruit sismique" de fonds océaniques était toujours très peu connu. Il était généralement admis que ce niveau était inférieur à celui relevé sur les continents. C'est pourquoi, on commençait à considérer le fond des océans comme l'endroit idéal pour l'implantation des observatoires sismiques, plus spécifiquement orientés vers la détection et la localisation des expériences nucléaires. Ce souci a motivé l'essentiel des expériences réalisées pendant les années 1960, lesquelles ont largement contribué à mieux connaître le caractère acoustique et sismique du milieu marin. Cependant, la reconnaissance du fait que le niveau du "bruit de fond" sismique de ce milieu est comparable à celui des continents, a notablement tempéré l'activité, par la suite.

A la fin des années 60, apparaissait la théorie géodynamique de la "tectonique des plaques", mettant en valeur les travaux précurseurs d'Alfred Wegner du début du XX<sup>ème</sup> siècle, concernant la dérive des continents.

Cette théorie est basée sur l'expansion de la croûte océanique à partir des dorsales médio-océaniques et sur la réduction par subduction d'une surface égale, à l'endroit des fosses océaniques (fig. 1). Elle attribuait ainsi au domaine océanique, et pour la première fois dans l'histoire des géosciences, un rôle important dans le fonctionnement du globe terrestre. Cette théorie, par voie de conséquence, a largement contribué à accélérer l'évolution de l'océanologie moderne.

Depuis 1970, cette évolution, allant de pair avec le développement rapide de la microélectronique et de l'informatique, stimule la **séismologie sous-marine**, devenue aujourd'hui une discipline reconnue de la géophysique

### 1. La technique des observations sismiques sur le fond de mer

L'observatoire sismique du fond de la mer, appelé souvent "OBS" (l'abréviation de l'Ocean Bottom Seismograph), est composé d'un **module sismique** et d'un **module marin** (fig. 2).

Les fonctions essentielles du **module sismique** sont la détection et l'enregistrement des signaux sismiques. Il est composé de :

- A. capteurs sismiques tels que les vélocimètres, les accéléromètres, les capteurs de pression et les hydrophones) ;
- B. l'enregistreur sismique servant à la gestion, le conditionnement et le stockage (enregistrement) du signal ;
- C. l'horloge-programmateur interne, dont la marche est synchronisée au départ à une base de temps externe. Son rôle est d'assurer la chronologie des événements enregistrés et le synchronisme de cycles d'enregistrements avec ceux de l'émission sismique (tirs) en surface ;
- D. une alimentation électrique.

Les fonctions du **module marin** sont en premier lieu d'assurer par ses éléments passifs le conditionnement des composants de la station (conteneurs étanches, connecteurs haute pression, etc.). Il doit d'autre part, avec ses éléments actifs, remplacer en quelque sorte l'opérateur humain de la station et accomplir certaines servitudes et automatismes, comme par exemple le nivellement et, éventuellement, la mise en place de capteurs sismiques, le largage de lest, la localisation acoustique de la station et de son repérage en surface. La figure 3 illustre quelques instruments.

Les OBS disposent en général de trois canaux sismiques munis de géophones tri-axiaux, les plus évolués de capteurs additionnels (hydrophones, capteurs de pression, etc.). Les instruments les plus simples en service sont des "Ocean Bottom Hydrophones" (OBH) munis d'un seul hydrophone.

Les modes d'enregistrement de l'ensemble des instruments modernes, au choix, sont :

- enregistrement continu,
- enregistrement cyclique pré-programmé,
- enregistrement limité aux événements sismiques détectés par comparaison de niveau d'amplitude moyen de signaux dans une fenêtre donnée, par exemple,
- ou la combinaison des précédents.

L'enregistrement du signal sismique se situe généralement dans la bande de fréquence de 1 à 30 Hz. Depuis quelques années, l'enregistrement numérique, d'une dynamique de 90 à 120 db et d'une capacité de 10 à 60 Moctets, a remplacé l'enregistrement analogique. Le matériel informatique récent, offrant des capacités allant jusqu'à 1 000 à 2000 Moctets, représente une perspective d'évolution intéressante.

Schématiquement, la **mise en oeuvre** d'un OBS est la suivante : à bord du navire, les fonctions de l'instrument sont contrôlées, son horloge-programmeur synchronisée avec une base de temps. Ensuite, l'OBS est muni d'un lest afin d'assurer sa descente sur le fond de la mer, et largué. Une fois sur le fond, l'instrument est prêt à fonctionner. Pour le remonter à la surface, le lest de retenue est détaché au moyen de systèmes électromécaniques, pyrotechniques ou fonctionnant par électrolyse. Ces systèmes peuvent être commandés par voie acoustique à partir de la surface ou bien par l'horloge interne, initialisant le système de largage de lest après l'écoulement d'un temps pré-programmé.

A la surface, l'OBS est détecté par observation visuelle ou au radar, ou bien par radio-goniométrie au moyen d'un émetteur fixé à l'instrument, puis remonté à bord.

Les différentes séquences opérationnelles sont visualisées par la figure 4.

Le poids (sans lest) et le volume des OBS actuels peuvent varier d'environ 10 kg et de quelques décimètres cubes à 3-4 m<sup>3</sup> et environ 600 kg.

S'agissant d'une méthodologie et d'une instrumentation très spécifiques, le nombre des équipes compétentes dans la construction et la mise en oeuvre opérationnelle des OBS est relativement restreint dans le monde. Elles appartiennent aux pays suivants : Etats-Unis, Grande-Bretagne, Allemagne, URSS, Canada, Japon et la France.

## 2. Les réalisations du Département Géosciences Marines de l'IFREMER

La contribution, depuis 1972, du Département Géosciences Marines de l'IFREMER à l'évolution méthodologique et technologique de l'observation sismique sur le fond de la mer est significative.

A) Le premier système, destiné aux travaux sur le plateau continental par faible profondeur d'eau (< 200 mètres), fut réalisé en 1972 pour l'étude de la structure géologique profonde de la Manche et celle des Approches Occidentales par la sismique réfraction. Outre leur caractère scientifique, ces études servaient également à orienter l'exploration pétrolière marine, entreprise ultérieurement dans la région. Ce système était constitué d'un capteur sismique (géophone ou hydrophone), positionné sur le fond et relié par un câble conducteur à une bouée radio en surface. La bouée servait à transmettre le signal sismique au navire pour l'enregistrement. L'émission radio se situait dans la gamme de 70-80 MHz et 170-175 MHz. La figure 5 montre le schéma du système et le type d'enregistrement obtenu, avec comme source sismique deux canons à air (V = 2 X 6 litres).

B) Les études de sismique réfraction projetées à l'exploration de la structure profonde des marges et celle de zones de transition océan-continent nous ont amenés à réaliser en 1975 l'Ocean Bottom Seismograph-OBS MK I autonome pouvant fonctionner jusqu'aux profondeurs de 6 000 mètres. Avec cet instrument nous avons introduit les premiers le principe de *capteurs sismiques détachés du corps de l'appareil* pour mieux assurer leur couplage au sol. Ce principe a été adopté depuis par la majorité des concepteurs de l'OBS. La figure 6 (en haut) montre l'OBS MK I et son schéma de fonctionnement et illustre (en bas) les enregistrements obtenus avec un canon à air comme source sismique (V = 45 litres)

Nos quatre instruments OBS MKI, munis d'enregistreurs analogiques, ont totalisé 60 enregistrements sur le fond de la mer, avec une efficacité opérationnelle dépassant 90 %. Ils furent utilisés principalement pour l'exploration de la structure profonde des marges continentales de l'Atlantique Nord de 1976 à 1979.

Parmi les résultats obtenus avec ces instruments, la documentation de l'extrême amincissement de la croûte continentale, sous la marge Nord-Est du golfe de Gascogne, est à noter, allant d'une épaisseur d'environ 28 km sous le plateau continental à 3 km dans les domaines océaniques. Les investigations sismiques ultérieurement entreprises, motivées par la reconnaissance de ce phénomène, ont contribué à l'évolution des modèles de marges et à la description du rifting initial des continents.

C) L'environnement morphologique particulièrement accidenté de certaines parties des fonds marins (dorsales, zones de fractures, pentes continentales, par exemple) exigent d'adapter nos instruments et systèmes à leur configuration. Un instrument d'observation sismique sur le fond doit être conçu pour une utilisation "tout terrain" sans qu'il soit nécessaire d'envisager des taux de pertes élevés ou des perturbations inacceptables pour les mesures. Un nouveau concept instrumental, le **système flottant**, tend à répondre à ces préoccupations. Ce concept suit trois principes :

- les composants vitaux de l'instrument sont éloignés du fond de la mer ;
- modularité, permettant, à partir d'éléments standards, la composition de l'instrument adapté aux caractéristiques de l'observation sismique et leur environnement sur le fond ;
- les capteurs sismiques constituent une unité séparée de l'ensemble.

Le système flottant consiste à déplacer du fond de mer à la tranche d'eau les éléments essentiels de l'instrument en ne gardant au contact du sol que les capteurs spécifiques et, évidemment, le lest retenu. L'ensemble est donc un système pendulaire inversé, avec comme point de suspension le lest sur le fond, la masse du pendule, représentée par les composants de l'instrument, se trouvant au-dessus du fond de mer. En cas de courant d'eau, l'ensemble s'incline et se stabilise dans une position d'équilibre, fonction de la vitesse de l'eau, la traînée de l'ensemble et la poussée exercée par la flottabilité. Ce qui peut être gênant pour les observations sismiques, ce sont les oscillations des composants de l'instrument engendrées par les turbulences de l'eau qui, transmises par le lest au sol, engendreraient des perturbations, "du bruit sismique", propre à l'instrument.

L'OBS MKII a été réalisé en 1978, essentiellement pour examiner l'effet des perturbations éventuelles engendrées par le corps de l'instrument sur les capteurs sismiques d'une part, et l'efficacité opérationnelle du concept de "système flottant" suivant lequel cet instrument fut construit, d'autre part.

En conclusion de ces études, il est apparu qu'un instrument conçu suivant le "système flottant" ne perturbe pas les observations d'une manière notable dans la bande de fréquence considérée.

Ces expérimentations ont été conduites en vue de la réalisation ultérieure d'une instrumentation sismique de fond de mer modulaire et polyvalente.

Deux solutions techniques incorporées dans cet instrument représentaient également les innovations dans la technologie de l'instrumentation sismique sur le fond. L'une comprenait l'enregistrement numérique haute densité (enregistreur Schlumberger 2000, 8300 BPI, 3 canaux sismiques + 1 chronologie, 230 Moctets de capacité) assurant à l'instrument 130 heures d'enregistrement en continu. L'autre était la fermeture par dépression de la sphère (650 mm de diamètre) contenant l'électronique, l'enregistreur et l'alimentation, garantissant à celui-ci une étanchéité totale à toutes les classes de pression, jusqu'à 670 bars, ce qui représentait l'utilisation nominale de l'instrument (6 000 mètres).

La figure 7 montre (en haut) l'instrument prêt à être mis à l'eau et son départ du fond, après avoir reçu l'ordre acoustique pour détacher le lest de retenue

Le schéma de l'OBS MK III (figure 8), esquissé en 1980 et 1981, tenait compte de l'expérience opérationnelle obtenue avec les instruments MK I et MK II.

D) Les études de la structure profonde de la croûte terrestre par la sismique réfraction et celles de la tomographie sismique de structures océaniques, qui exige des instruments d'un grand pouvoir de discrimination, nous a amenés à concevoir et à réaliser en 1984, un système sismique doté de **caractéristiques de réception directionnelle**. Ce dispositif, l'Ocean Bottom Vertical Seismic Array (OBVSA) (fig. 9), est composé d'une chaîne d'hydrophones (flûte) de 16 canaux, longue de 375 mètres, positionnés verticalement sur le fond et d'un équipement sismique numérique (PCM - 5800) pour l'enregistrement (120 db dynamique, capacité 60 Moctets). Les transpondeurs acoustiques assurent les fonctions de localisation sur le fond et le largage du lest, permettant la remontée à la surface de l'instrument. La profondeur maximum d'utilisation de l'OBVSA est de 6 000 mètres.

Les résultats opérationnels indiquent que les caractéristiques acoustiques de l'OBVSA permettent la discrimination de différents fronts d'ondes et l'amélioration du rapport signal/bruit par un facteur d'environ quatre, comparé aux instruments classiques. La figure 9 illustre le schéma de l'instrument et ses caractéristiques de réception (courbes d'atténuations de 0 à -40 db en fonction des angles d'incidence de fronts d'ondes, de l'axe de l'instrument à 0° à 360°) ; la figure 10 montre la séparation des ondes et un exemple d'enregistrement réalisé lors de l'étude tomographique de la dorsale de Mohn (Atlantique Nord) en 1988.

### 3. Les perspectives

Quel est l'avenir ? La réponse à cette question est liée à l'évaluation préalable du potentiel d'évolution de différents secteurs d'activités en géosciences intéressés par la technique de l'observation sismique sous-marine, et à l'identification de leur intérêt scientifique, social et économique. De ce point de vue, trois secteurs me paraissent être notables pour la décennie à venir.

**A) La recherche scientifique internationale**, consacrée non seulement à l'étude de la structure du globe terrestre mais aussi à l'investigation des interactions entre ses niveaux internes et externes. Ces programmes, intéressant directement la qualité de l'existence humaine sur notre Terre, s'efforcent de répondre aux problèmes liés aussi bien à l'amélioration et la conservation de l'environnement naturel, qu'à la prise en considération des risques que cet environnement représente (changements climatiques, tremblements de terre, etc...). Concernées par la partie de la surface du globe couverte par les océans, les géosciences marines concentrent leurs efforts, dans le cadre d'un programme international naissant (INTER-RIDGE), pour étudier le fonctionnement de l'expansion des fonds océaniques et le cortège de phénomènes associés, tels que par exemple la circulation hydrothermale et la genèse des métaux. L'un des volets d'importance de ce programme concerne l'exploration sismique de la structure profonde de fonds océaniques et, à ce titre, intéresse directement les observations sismiques sous-marines.

**B) Un autre secteur d'intérêt pour l'instrumentation sismique de fond de mer est représenté par les différents projets concernant l'extension des réseaux d'observations sismologiques au domaine marin.** Ces réseaux de surveillance régionale et locale ont pour vocation essentielle la détection d'une activité sismique d'amplitude relativement faible, soit pour caractériser les risques sismiques d'une région, soit pour apprécier l'ampleur d'une crise (volcanique, par exemple). Leur installation peut avoir un caractère temporaire, le réseau ne pouvant être déployé qu'en cas de nécessité d'une surveillance sismique rapprochée. Ces réseaux locaux ou régionaux, opérant généralement dans la gamme de fréquences de 0,5 Hz à 50 Hz, sont accessibles, de par leurs caractéristiques, aux stations sismiques de fond de mer (OBS).

Au cas où l'enregistrement sismique s'effectue à des fins d'alerte, la transmission du signal sismique perçu sur le fond de mer, ou de certains de ses paramètres significatifs, devient une nécessité. Plusieurs moyens sont ou peuvent être envisagés pour le faire :

- a) câble sous-marin
- b) acoustique
- c) satellite
- d) radio

La transmission de données par câble sous-marin, quoi que ce soit l'un des rares moyens permettant le transfert d'un grand volume d'information, donc la totalité du signal sismique, est considérée comme d'un coût prohibitif. Des études japonaises et américaines sont en cours pour évaluer l'éventualité de réutiliser à ces fins les câbles téléphoniques abandonnés (projet Poseidon) (fig. 11).

La transmission acoustique basse fréquence (environ 500 Hz) utiliserait le "canal Sofar" (tranche d'eau se situant à environ 1000 m de profondeur, caractérisée par des facultés de transmission exceptionnelles) pour transmettre les paramètres essentiels de l'information sismique à terre, à partir d'une bouée sub-surface, collectant les informations des instruments puis en les retransmettant. Le bruit de fond acoustique extrêmement élevé régnant dans le canal Sofar rend la maîtrise de ce procédé difficile (Fig. 12a).

Pour des distances ne dépassant pas 100 km entre le réseau seismographique sur le fond de mer et la terre (ces distances caractérisant la plupart des réseaux locaux), le procédé mettant en oeuvre des moyens acoustiques hautes fréquences (8 - 10 kHz) mériterait d'être examiné. Ce procédé, utilisant les transpondeurs acoustiques classiques, munis de caractéristiques de réception et d'émission radialement directionnelles pour des fonctions de collecteurs d'information et de relais, pourrait être d'une mise en oeuvre simple et relativement peu onéreuse (fig. 12b).

La transmission par satellite nécessite d'abord de faire transiter l'information par la masse d'eau à une bouée émettrice en surface, au moyen d'un câble électrique ou par voie acoustique. La faible cadence actuelle de la transmission satellitaire et la vulnérabilité de la bouée émettrice en surface sont sûrement des facteurs limitatifs de ce procédé, ainsi que les difficultés de son mouillage par grand fond. Parmi ses avantages, il faut noter que certains satellites assurent la transmission de l'information sur l'ensemble de la surface du globe (fig. 13).

Le schéma de transmission directe du signal par radio est pratiquement identique au précédent, les lois de la propagation radio-électrique modulant les distances franchissables par ce procédé. A nouveau, la vulnérabilité de la bouée émettrice en surface en est un facteur limitatif (fig. 13).

C) Un troisième secteur d'utilisation des stations sismiques de fond de mer est représenté par **l'exploration, à des fins économiques et scientifiques, des marges des océans (englobant le plateau continental) et de celles des territoires soumis à la juridiction des Zones Economiques Exclusives.**

Dans le domaine de l'exploration pétrolière, les instruments de fond de mer, grâce à leurs capteurs sismiques "multicomposants", sont susceptibles d'offrir des applications intéressantes.

L'acoustique sous-marine, s'intéressant plus particulièrement à la propagation de l'énergie à très basses fréquences dans la colonne d'eau et dans le substratum, peut représenter également un domaine d'utilisation de l'instrumentation sismique de fond de mer.

En conclusion, trois secteurs d'activité en géosciences marines se révèlent comme potentiellement intéressants pour l'avenir pour les instruments de l'observation sismique de fond de mer :

- **l'exploration sismique de systèmes magmatiques (volcaniques) océaniques**, tels que les dorsales médio-océaniques, réunissant la communauté scientifique dans le cadre de divers programmes internationaux ;
- **l'extension ou la mise en place des réseaux de surveillance sismique** régionale et locale dans le cadre de la lutte contre les conséquences des événements naturels (crise sismique, volcanique, tsunamis...).

- **L'exploration sismique, à des fins économiques et scientifiques, des marges des océans et des Zones Economiques Exclusives**, domaines privilégiés de l'activité pétrolière.

Pour répondre aussi bien aux exigences techniques des observations sismiques sous-marines, que représentent les secteurs d'activité précédemment identifiés, qu'aux obligations opérationnelles et économiques, une nouvelle instrumentation, l'**Ocean Bottom Seismic System (OBSS)**, a été esquissée au Département Géosciences Marines de l'IFREMER en 1990. Cette nouvelle instrumentation, en cours d'élaboration, repose dans ses solutions techniques sur presque deux décennies d'expérience accumulée dans le domaine de l'observation sismique sous-marine, représentant plus de 220 opérations à la mer. Ce schéma instrumental permettra d'assembler, à partir de modules de base, une grande variété d'instruments, adaptés aux besoins spécifiques de différents secteurs d'activité en géosciences marines.

### Remerciements

*Au cours des années, un échange de vues scientifiques et techniques très fructueux s'est développé avec mes nombreux collègues concernés par l'observation sismique sous-marine, menant aussi à la réalisation en commun de plusieurs campagnes à la mer et à l'intercalibration des instruments à Brest, en 1980. Je suis très reconnaissant envers ceux qui m'ont conseillé, encouragé et aidé, tout particulièrement D. Buisine, L. Dorman, D. Heffler, R. Herber, A. Him, Sh. Nagumo, D. Needham, A. Necessian, M. Purdy, V. Renard, W. Weigel, R. Whitmarsh. L'aide technique de R. Conogan, J.P. Le Formal, H. Pellé, L. Potin, J.P. Quéré, J.P. Regnault, J.L. Veinant m'a été très précieuse.*

*Je remercie tout particulièrement les commandants et les équipages des navires océanographiques Le Noroit, Le Suroit, Jean Charcot, Shackleton, Meteor, Polarstern et Sonne, pour leur assistance aux opérations à la mer.*

*Le soutien scientifique et technique offert par le Centre de Brest du CNEXO/IFREMER a été très apprécié.*

### Références sélectionnées

- Arnett, R.A. and Newhouse, T.W. (1965) : Ocean-Bottom Seismograph, Proc. I.E.E.E., 53, 1899-1905.
- Avedik, F. and Renard, V. (1973) : Seismic refraction on continental shelves with detectors on sea-floor, Geophysical Prosp., 21, 220-228.
- Avedik, F., Renard, V., Buisine D. and Cornic, J.Y. (1978) : Ocean Bottom Refraction Seismograph (OBRS), Mar. Geophys. Res., 3, 357.
- Avedik, F. (1986) : Sea-floor seismology, mobile Ocean Bottom Seismic Array (OBVSA) for controlled source experiments. In Ocean Seismo-Acoustics (Tuncay and Berkson, Plenum Publishing Corp., 1986).
- Behrens, J. (1960) : Refraktionsseismische Messungen auf See, Z. Geophys., 26, 162-176.
- Bradner, H. (1964) : Seismic measurements on the ocean bottom, Science, 146, 208-216.
- Ewing, J. and Ewing, M. (1961) : A telemetering Ocean Bottom Seismograph, J. Geophys. Res., 66, 3863-3878.
- Francis, T.G. et al. (1975) : Ocean Bottom Seismograph, Marine Geophys. Res., 2, 195-213.
- Martinai, J. et Turrière, J. (1971) : Une bouée relais automatique légère, Proc. of Colloque Inter. sur l'exploitation des océans (Bordeaux), Th. V, T. 2-07, CNEXO, Paris (1971).
- Purdy, G.M. and Dziewouski (convenors), A.M. Proceedings of a workshop on Broad-Band downhole seismometers in the deep-ocean. Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI), April 1988.
- Rykunov, L.N. and Sedov, V.V. (1967) : An Ocean Bottom Seismograph, Izvestiya. Phys. Solid Earth, 8, 537-541.
- Whitmarsh, R.B. (1970) : An Ocean Bottom pop-up seismic recorder, Marine Geophys. Res., 1, 91-98.
- Whitmarsh, R.B., et Lilwall, R.C. (1983) : Ocean Bottom Seismographs, in : Structure and development of the Greenland-Scotland Ridge. Bott, Saxov, Talwani and Thiede, ed., Plenum Publishing Corp.

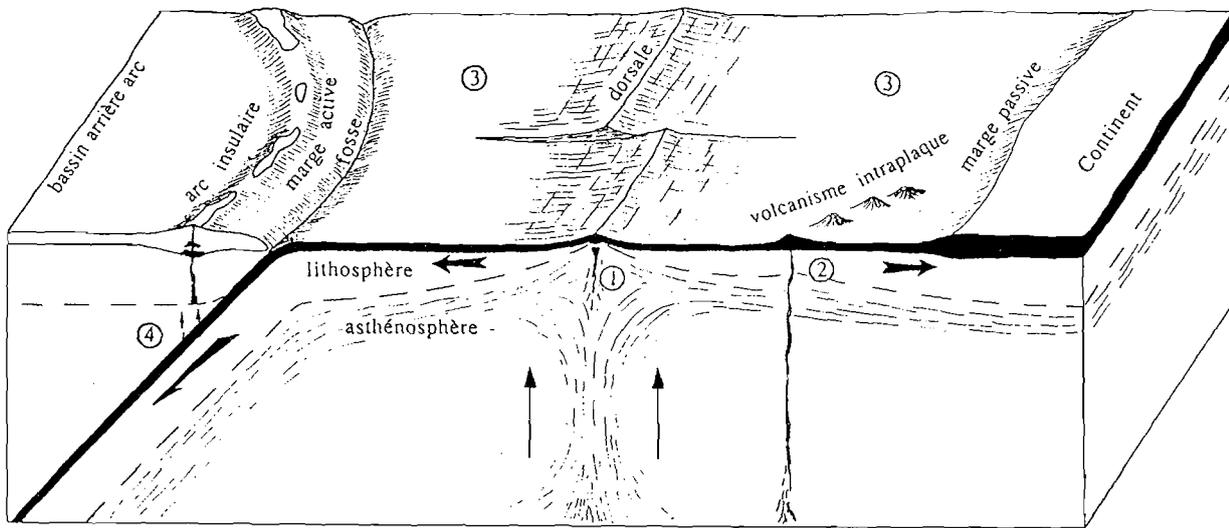


Schéma récapitulatif du fonctionnement des océans.

1. Accrétion (écartement des plaques océaniques, dorsale, magmatisme tholéïitique).
2. Volcanisme intraplaque (point chaud, magmatisme alcalin).
3. Sédimentation océanique.
4. Subduction (convergence des plaques, sismicité, magmatisme calcoalcalin).

Figure 1

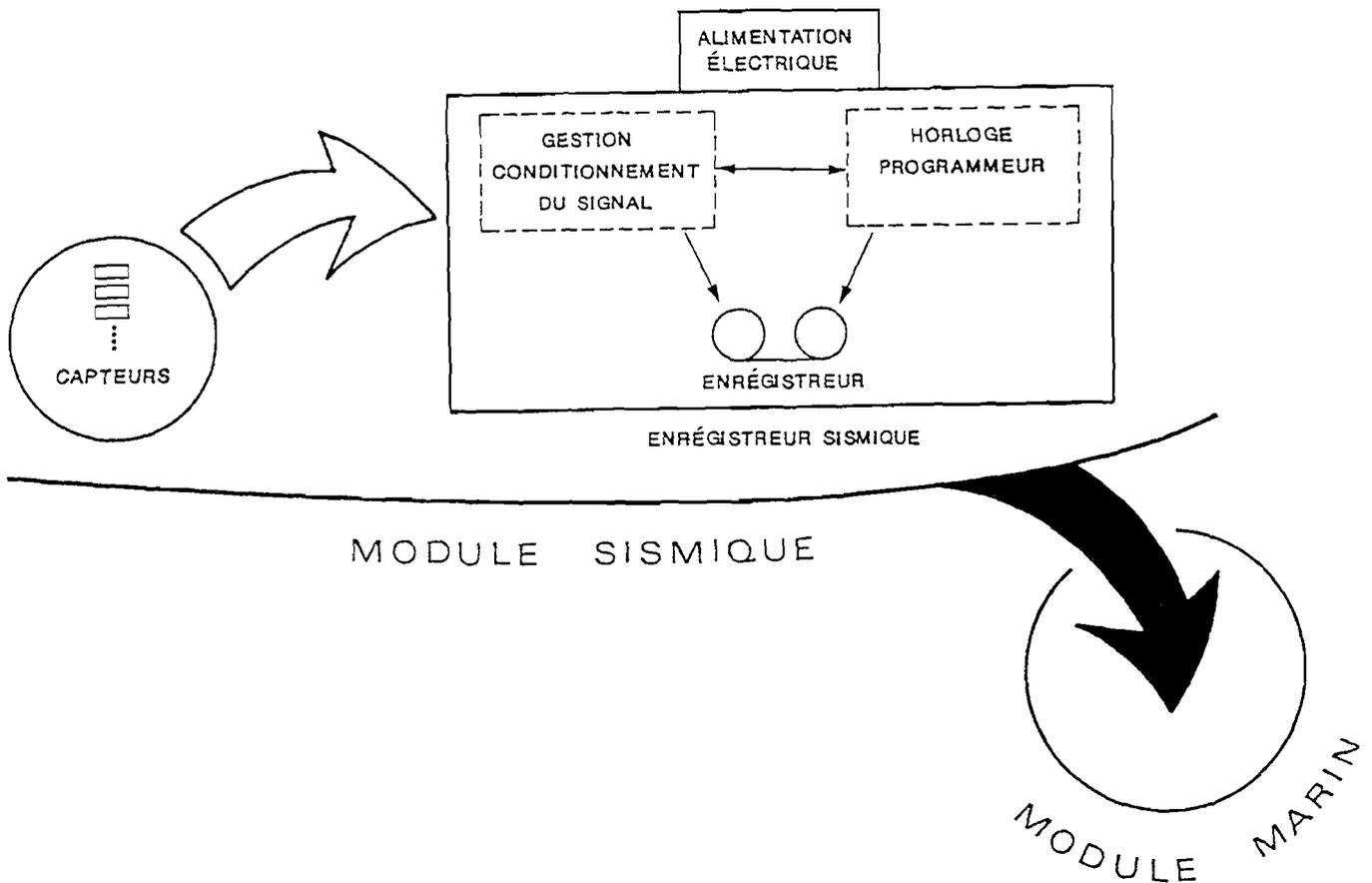


Figure 2

Figure 3

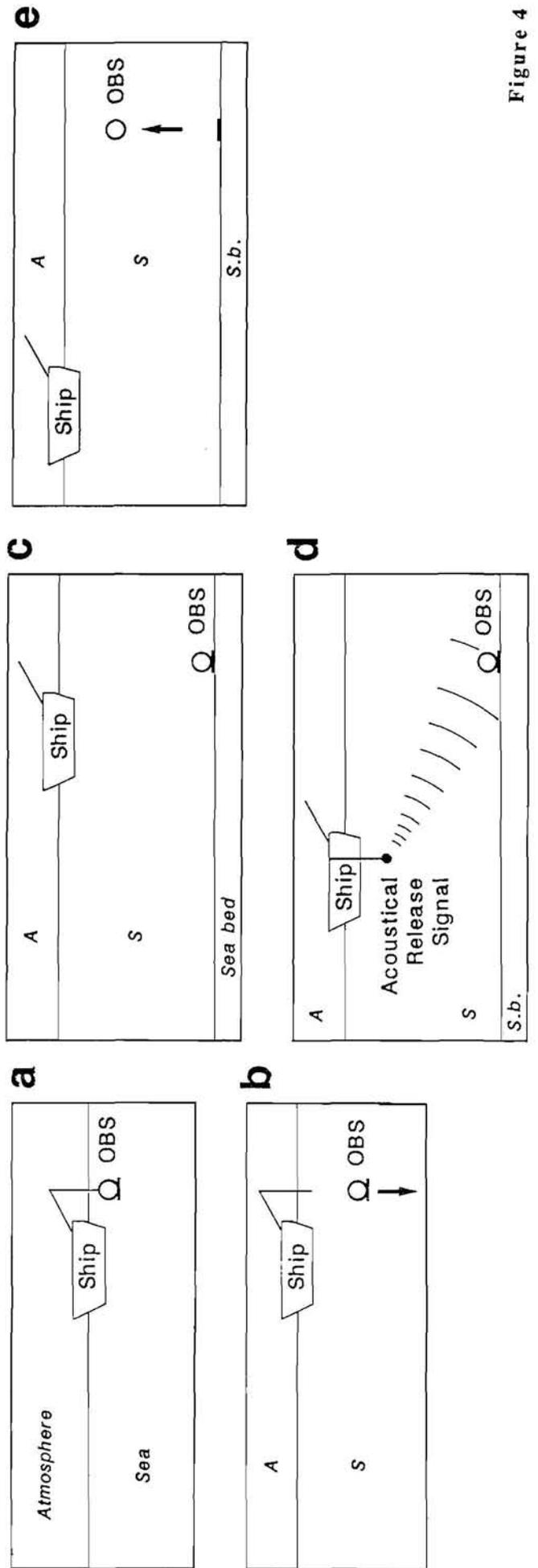
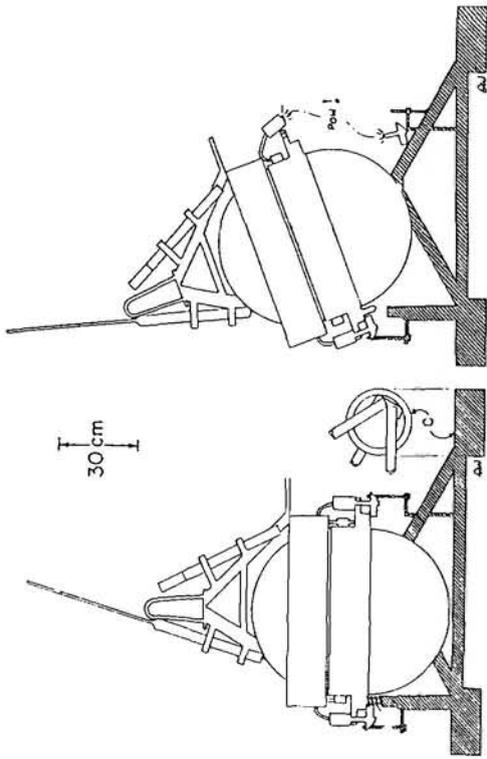
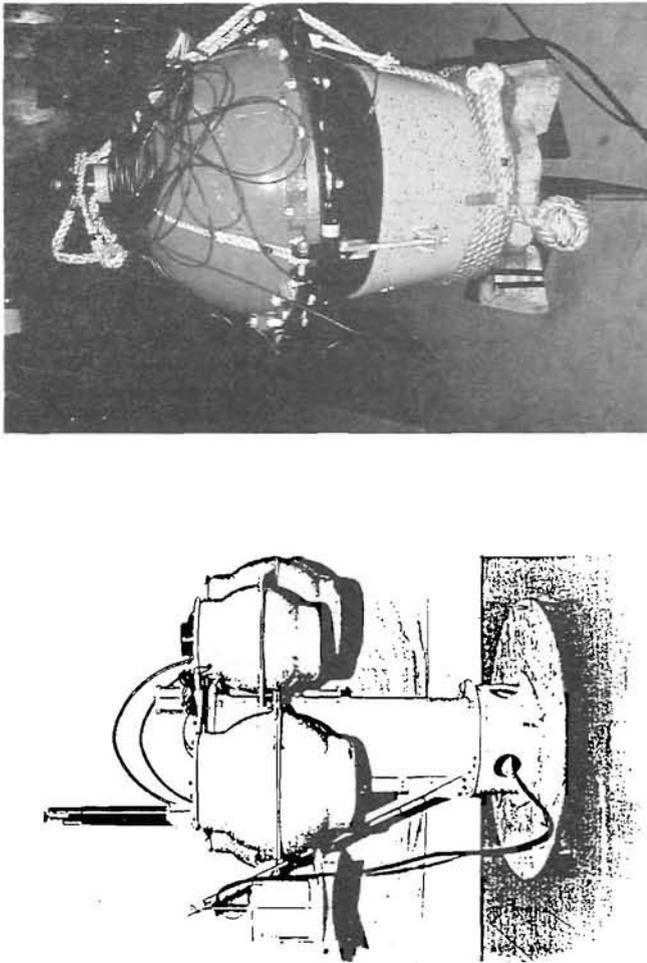


Figure 4

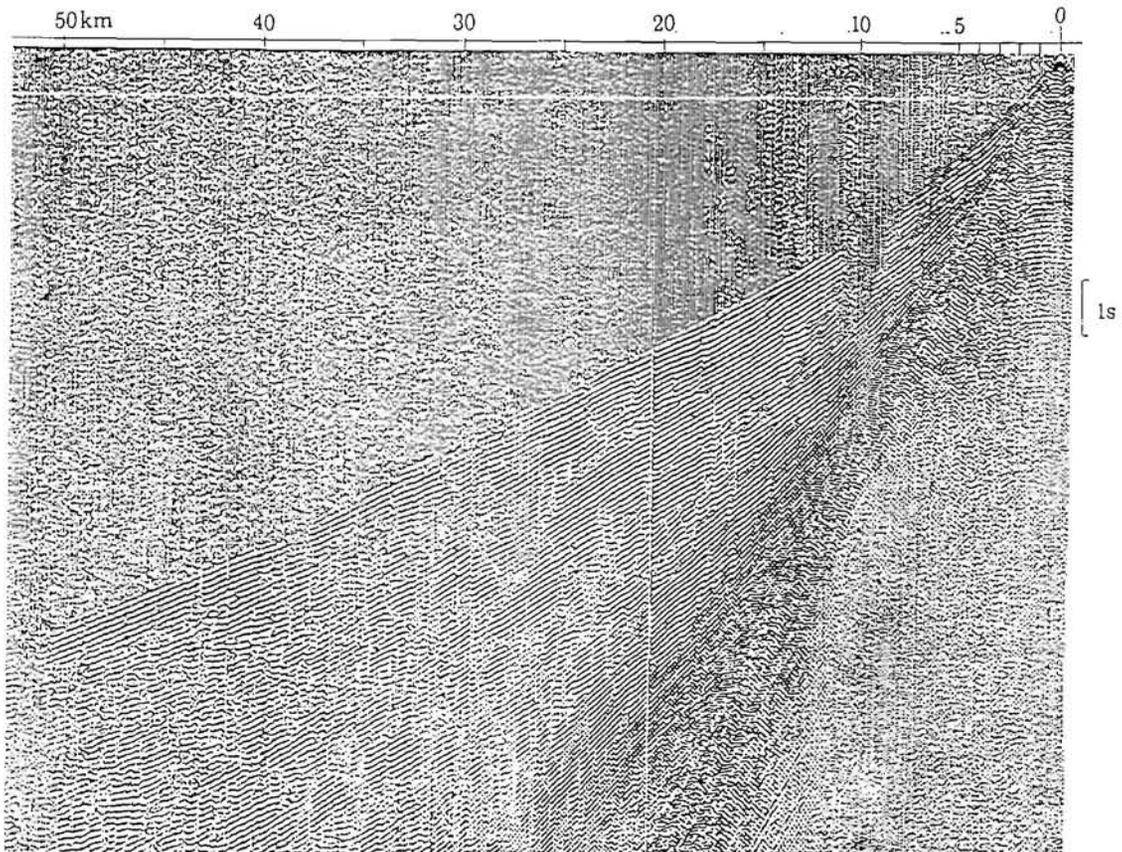
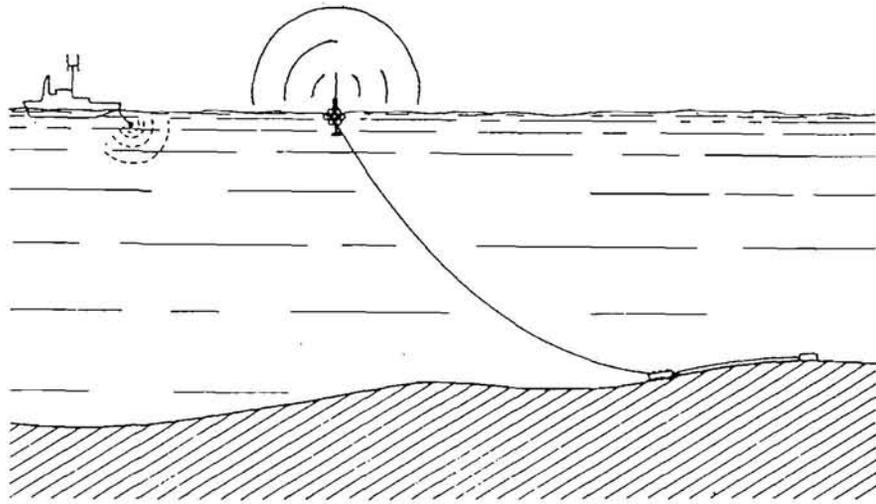


Figure 5

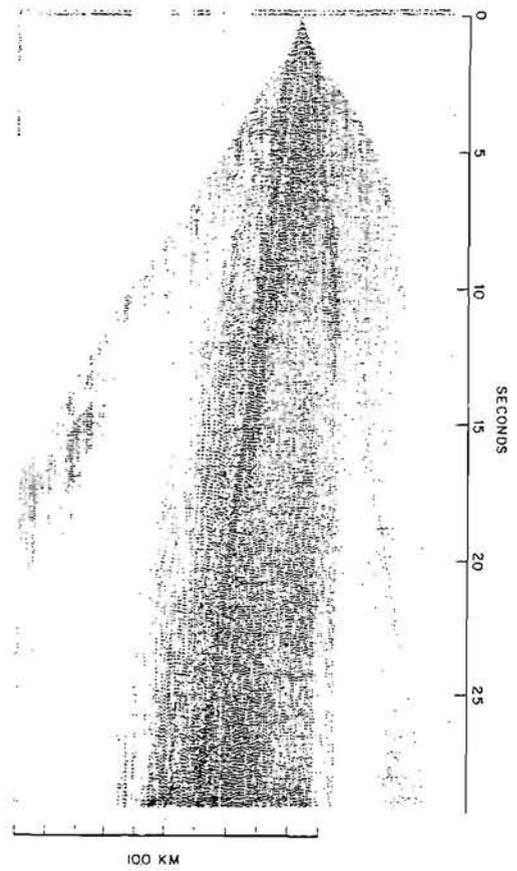
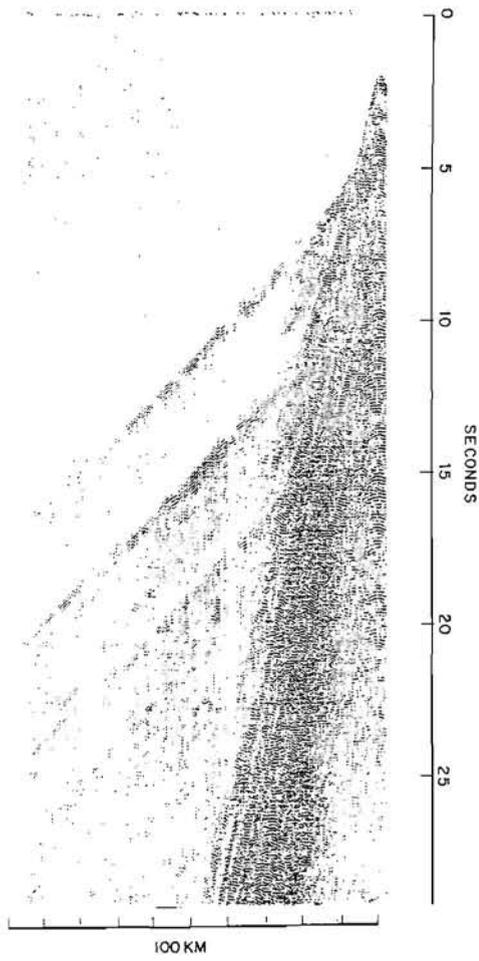
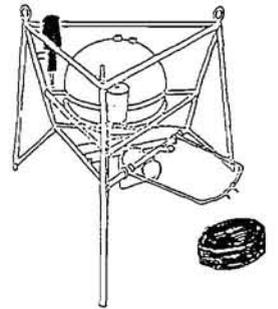
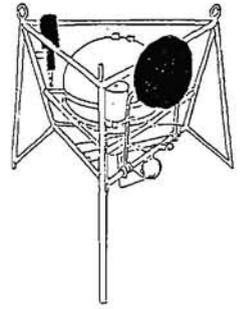
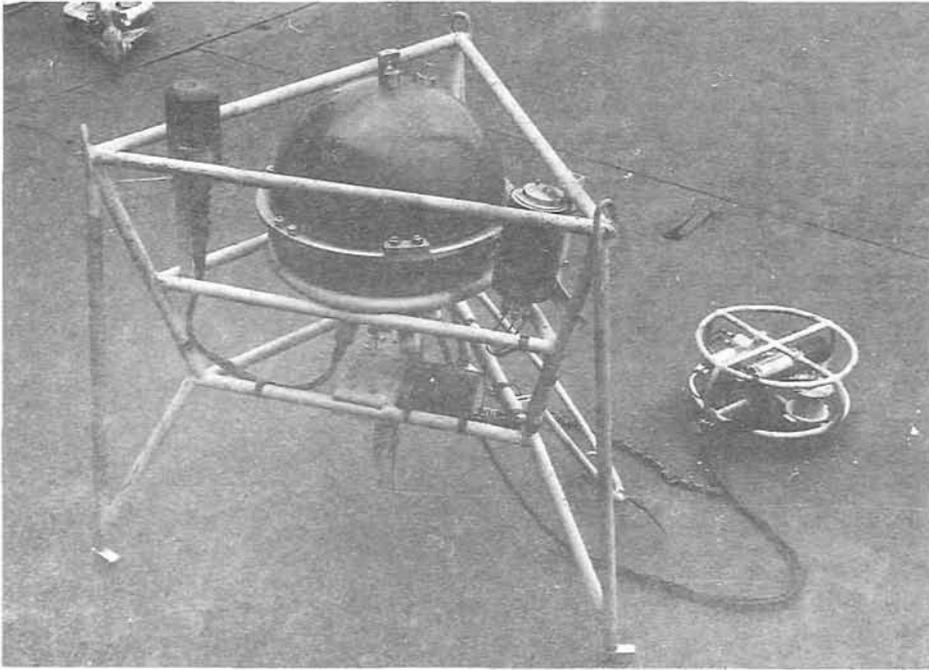


Figure 6

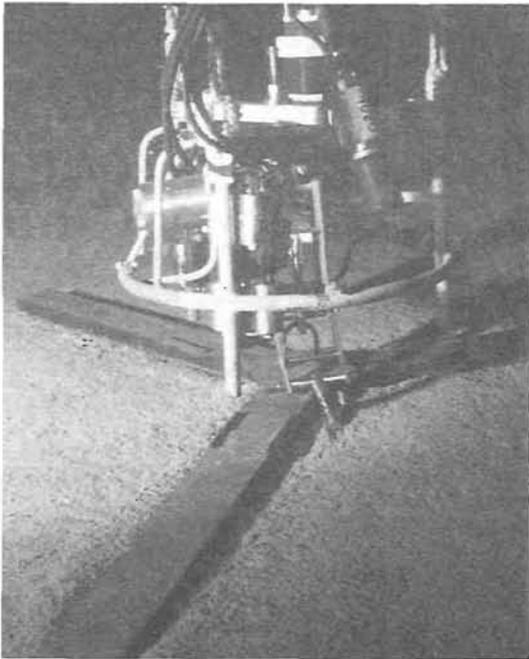
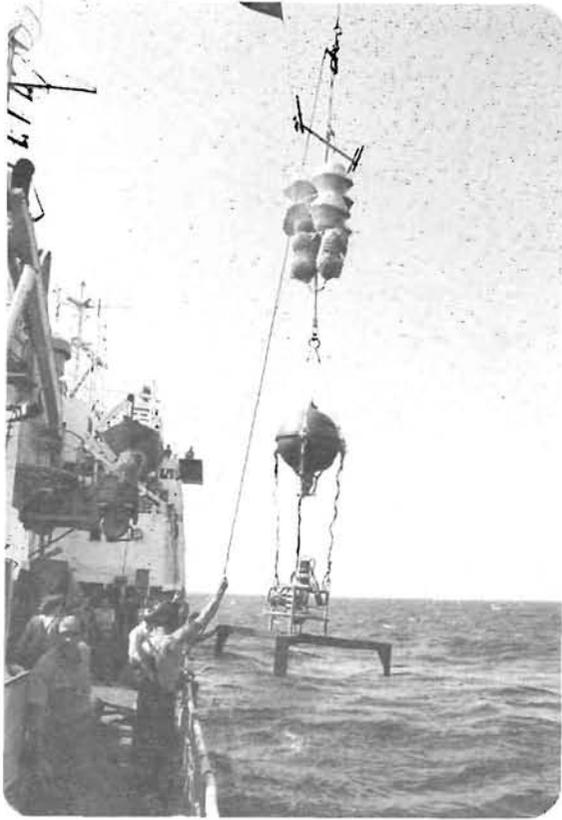
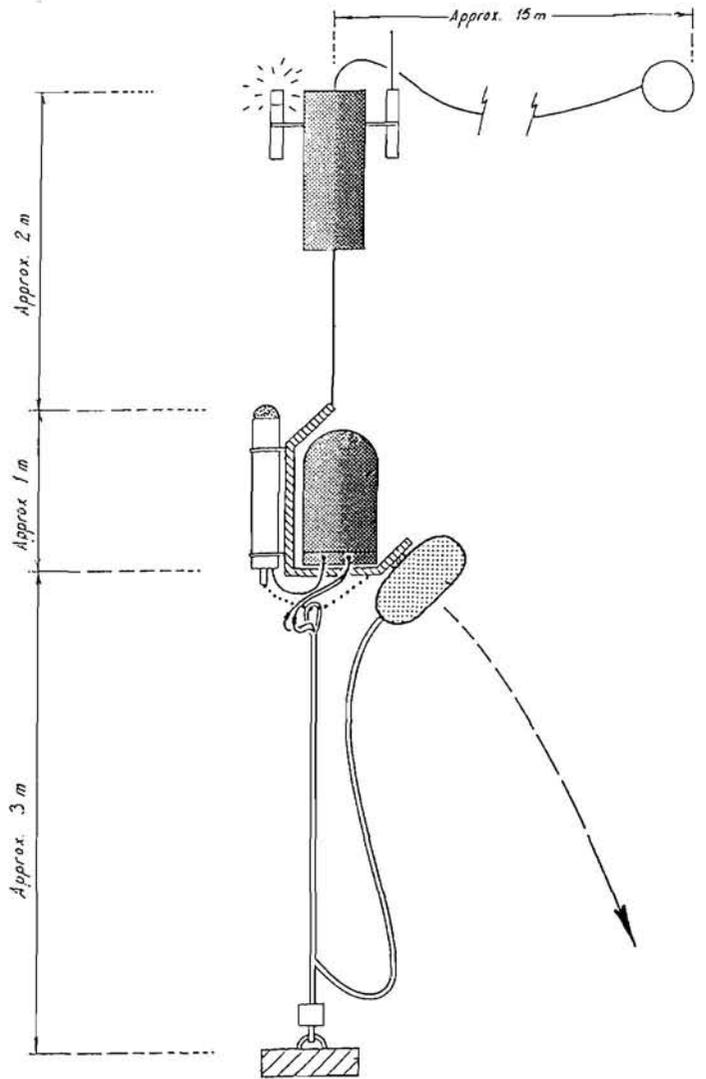


Figure 7



General Layout of the MARK-III OBS

Figure 8

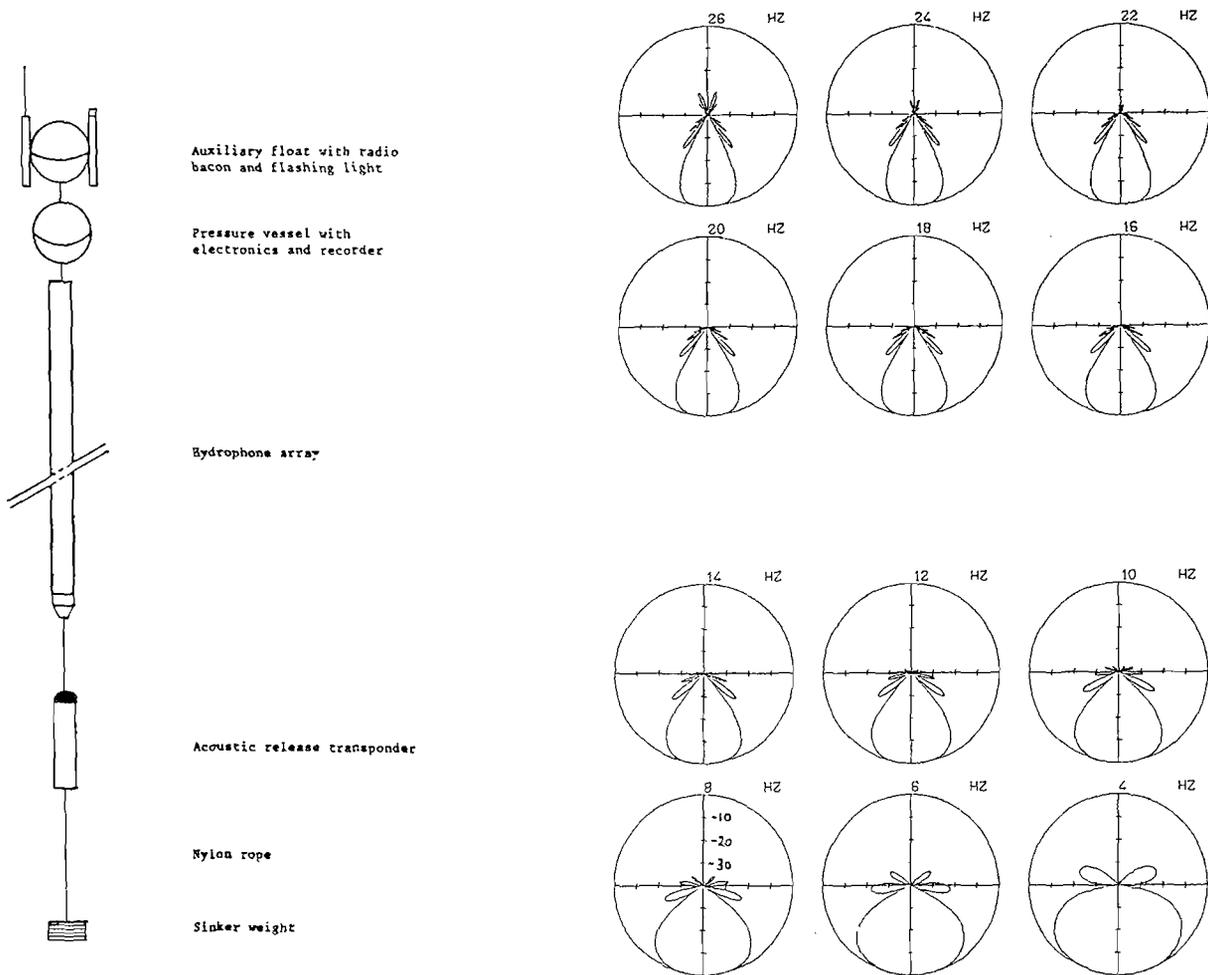
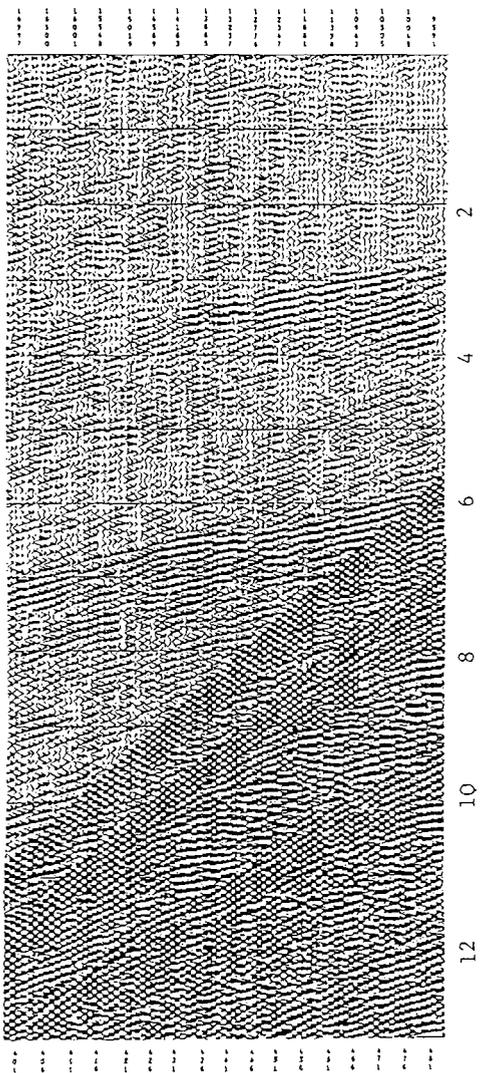
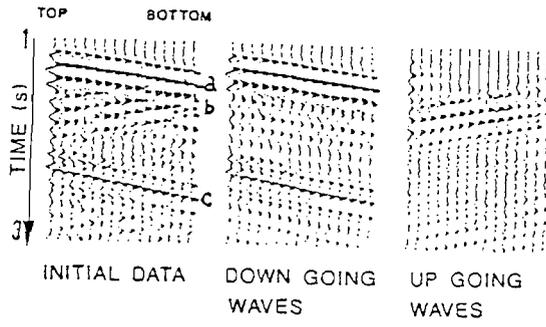
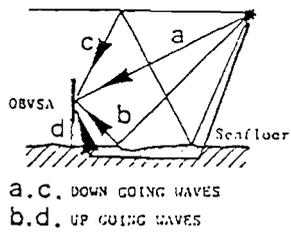
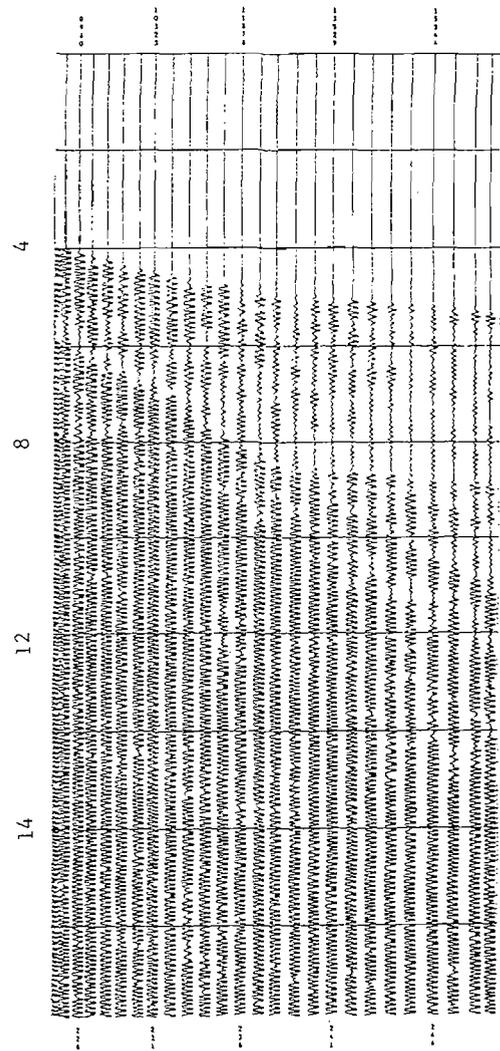


Figure 9

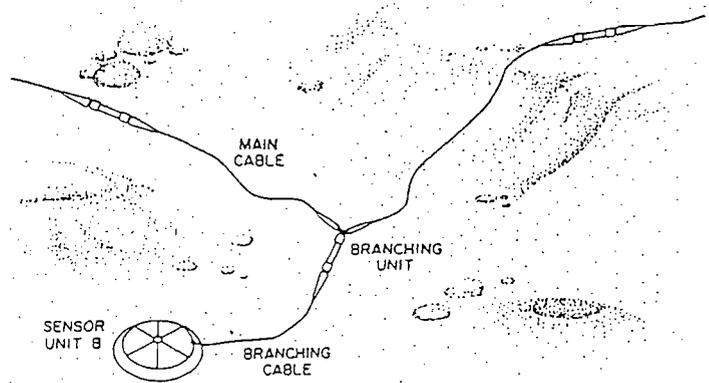
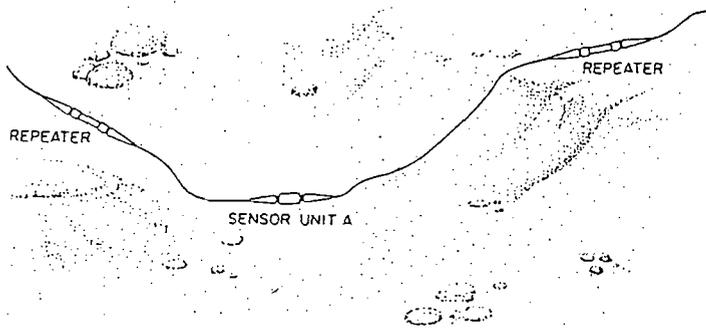
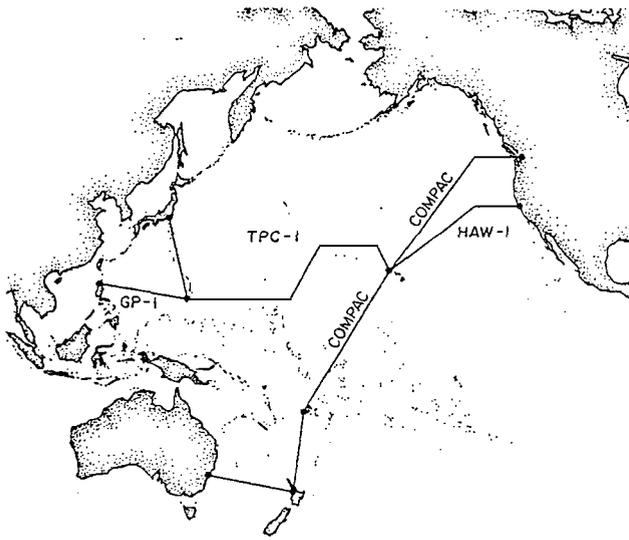


OBH



OBVSA

Figure 10



From "Ocean Bottom Geoscience  
Observatories"  
Sh. Nagumo and D.A. Walker  
(EOS, June 27, 1989).

Figure 11

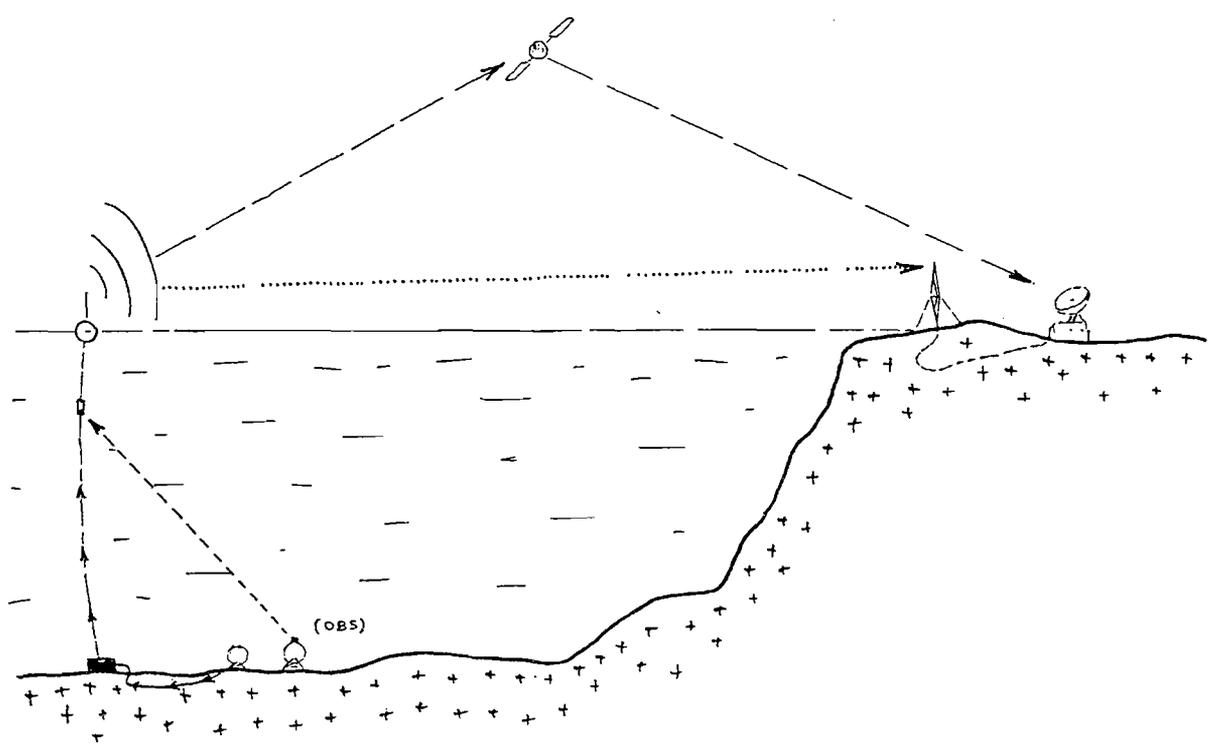
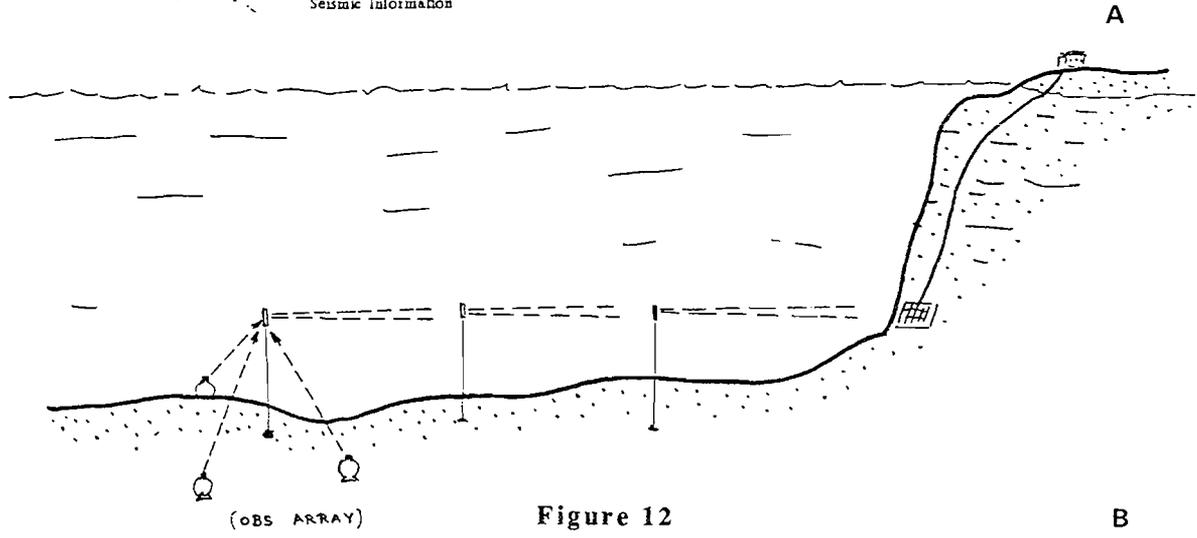
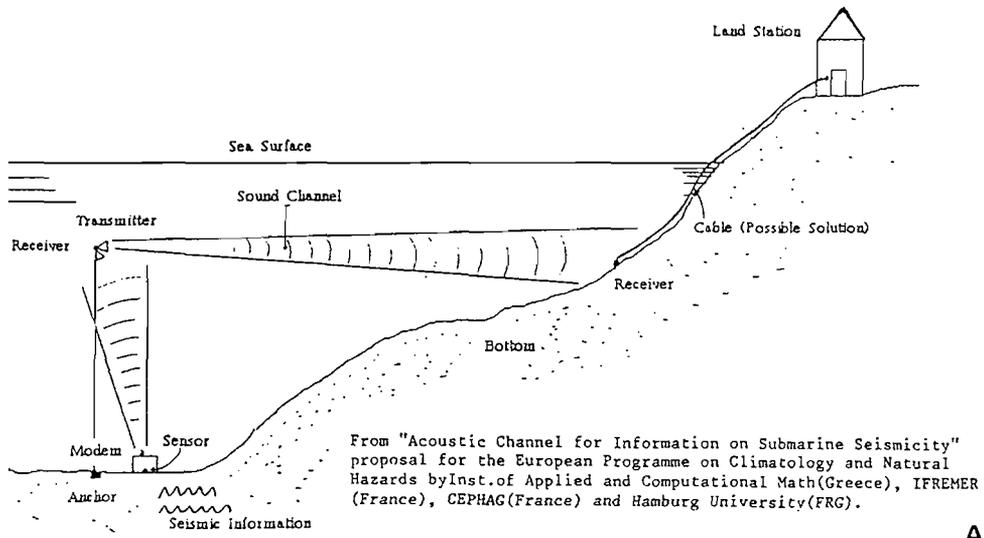


Figure 13