

Déploiement d'un réseau de sismographes sous-marins et terrestres en domaine Ligure (Méditerranée) : campagne SISBALIG 1

Jacques DÉVERCHÈRE, Nicole BÉTHOUX, Yann HELLO, Rémy LOUAT et Claudio EVA

Résumé — Nous présentons les résultats d'une première expérience d'utilisation conjointe de stations sismologiques sous-marines (OBS) et terrestres pour l'étude de la sismicité de la mer Ligure. Durant cette campagne, un réseau de 11 stations temporaires, dont 4 sous-marines, a été déployé. On a pu ainsi préciser les conditions expérimentales nécessaires au bon déroulement d'une telle étude dans une zone à sismicité modérée. Les données des OBS ont amélioré les localisations et les solutions focales des événements régionaux enregistrés pendant cette période; elles ont permis en outre de donner quelques indices d'une forte atténuation de l'énergie sismique à travers la pente continentale et le domaine océanique. Ce résultat doit faire l'objet d'une étude plus détaillée.

An ocean-bottom and land seismological array in the Ligurian zone (Mediterranean Sea): SISBALIG 1 Cruise

Abstract — 4 sea-bottom seismometers (OBS) and 7 land seismological stations were deployed in order to study the seismicity of the Ligurian sea. This preliminary survey allowed us to clarify the experimental requirements to fulfil in the context of a low seismicity area. Location and focal solutions of regional events have been improved by the OBS data. Furthermore, a strong attenuation of seismic energy is suspected through the continental slope: the use of OBS to analyze the attenuation by continental margin and peculiar structures of the oceanic crust and sediments should be very fruitful in the future.

Abridged English Version — EXPERIMENT. — Temporary land and sea-bottom seismic networks are known to be fruitful in studies of marine areas with poor azimuthal coverage ([1], [2], [6]). As a first experiment, we deployed 4 ocean-bottom seismographs (OBS) and 7 land seismological stations from June 11, 1990 to July 4, 1990 in the Ligurian basin and along the Riviera coast (Fig. 1), where great historical earthquakes occurred ([3], [4]). The 4 OBS we used were designed and built by the University of Texas Institute for Geophysics and by ORSTOM [6]. 3 geophones (2 horizontal and 1 vertical component with natural frequency of 4.5 Hz) are confined inside a sphere of 43 cm of diameter, connected to a ballast load which is released by a preset timer 3 weeks after the deployment of the stations (Fig. 2). A trigger algorithm (STA/LTA) causes the digitalized seismic signal to be stored in memory (EPROM). The "true" dynamic recording range of ground velocity is 100 dB (gain ranging) and the chosen sampling frequency is 40 Hz. Since the low frequencies were cut-off, only short-range distance earthquakes may be recorded. The temporary land stations were 4 Sprengnether analog stations (vertical seismometers of natural frequency 1 Hz), 2 GEOTRAS stations (3 components of natural frequency 2 Hz and digital recordings) and a GEOTECH analogic station (3 components of natural frequency 1 Hz). They complemented the permanent seismological stations of the region. Figure 1 displays the location of these different networks.

RESULTS. — This first survey has allowed us to clarify the experimental requirements to fulfil for further studies of this area of low seismic activity ([15], [17]) and high geological complexity [5]. The threshold used as trigger condition appeared to fit well the many factors influencing the background noise level ([7] to [10]) which caused about 90% of OBS

Note présentée par Jean AUBOUIN.

activations. Roughly two thirds of magnetic tapes were left empty: this result will allow us in the future to use an optimal recording time of about one minute per event. All the earthquakes and shots which occurred in a distance range of 200 km away from the marine network and detected by the land seismographs were recorded by at least one OBS: this observation demonstrates the high sensitivity of these ocean-bottom seismographs. The regional seismic activity was especially low during the experiment: nevertheless, fifteen events were located using both land and marine seismographs. We accurately located a low magnitude local earthquake (*Fig. 3*) and constrained its focal depth at around 17 km thanks to the OBS data (*Table and Fig. 1*). Eighteen other local earthquakes were recorded by the OBS but not localized. These results show that the OBS data may not only be useful to analyze the Ligurian sea seismicity but also to study the whole Ligurian and Provençal region by improving the coverage on poorly constrained azimuths. We determine 6 focal solutions that are discussed from a tectonic point of view. They depict different tectonic settings that are consistent with the regional mean state of stress known by land studies ([13] to [20]). We show the potential improvement in accuracy of focal mechanisms to be expected from a marine seismological network. Another prominent result of this first experiment is that all OBS recorded T-waves from sea shots, but OBS 2 and 3 located in the basin did not record the regional events, unlike the others OBS close to the slope (*Fig. 1*). We proposed three explanations to this phenomenon: 1. bad sea-floor coupling; 2. diffracting effect by Messinian salt domes and walls known to be numerous in this area [11]; and/or 3. strong attenuation of seismic energy through the continental slope and the adjacent oceanic zone [12]. In the frame of the regional seismic risk analysis, a more thorough study is required in a further step to resolve this problem.

INTRODUCTION. — Il existe un effort croissant de la communauté internationale visant à compléter les réseaux sismologiques terrestres par des sismographes sous-marins dans des zones sismiques où la couverture terrestre est insuffisante ([1], [2]). Tel est le cas de la mer Ligure, qui est le siège d'une sismicité significative donnant lieu à des tremblements de terre majeurs comme ceux de 1887 [3] ou 1963 [4]. Or cette sismicité est difficile à étudier, d'une part à cause de la mauvaise répartition azimutale et du relatif éloignement des stations terrestres permanentes (*fig. 1*), d'autre part en raison de la grande complexité géologique de la région, marquée par la présence d'un domaine océanique de type bassin marginal dans le système alpin [5]. Dans une telle zone, l'utilisation de stations sous-marines peut donc apporter une contribution essentielle dans la perspective de : 1. contraindre avec précision la position des foyers sismiques, notamment en profondeur; 2. évaluer l'activité microsismique permanente non enregistrable par les seules stations à terre trop lointaines; 3. s'affranchir des problèmes de propagation liés au passage croûte océanique-croûte continentale; 4. décrire l'état présent des contraintes dans le bassin et sur ses marges, en complément d'autres informations géophysiques. Afin de préciser les conditions expérimentales nécessaires au bon déroulement d'une telle étude, une expérience de reconnaissance nommée SISBALIG 1 a été menée du 11 juin au 4 juillet 1990. Elle a consisté en l'immersion de quatre sismographes sous-marins en mer Ligure à l'aide du *N/O Catherine-Laurence* et en l'installation d'un réseau de sept stations temporaires près de la côte, en France et en Italie (*fig. 1*). Nous avons utilisé par ailleurs les données provenant des 48 stations permanentes régionales appartenant aux réseaux L.D.G./C.E.A., I.G.G., I.P.G.S. et SISMALP (¹).

MATERIEL ET METHODES. — Les stations sismologiques sous-marines (Ocean Bottom Seismometers, ou OBS) utilisées lors de la campagne SISBALIG 1 ont été développées par l'UTIG (University of Texas Institute for Geophysics) et l'ORSTOM [6]. Chaque station est maintenue par un système de largage sur un châssis métallique qui sert de lest et assure le couplage avec le fond marin (*fig. 2*). Après une période d'immersion préprogrammée, la sphère se libère automatiquement de son lest et remonte par sa propre flottabilité.

L'électronique constituant la station est placée à l'intérieur d'une sphère en verre de 43 cm de diamètre pouvant atteindre des profondeurs de 6 700 m. Équipée de flashes et de deux balises radio HF surmontées de deux drapeaux fluorescents (*fig. 2*), elle est de jour comme de nuit facilement repérable en surface malgré sa petite taille grâce à un récepteur goniométrique. Les capteurs sont des géophones de fréquence propre 4,5 Hz montés sur une plate-forme stabilisée destinée à compenser le pendage du terrain. Le signal est acheminé à travers un filtre passe-bas (fréquence de coupure réglée sur 15 Hz) jusqu'à la carte de conversion analogique-digitale. La fréquence d'échantillonnage choisie est de 40 Hz et la dynamique réelle (obtenue par étages en enregistrant sur 16 bits) de 100 dB. L'algorithme de détection utilisé est du type STA/LTA (rapport ici fixé à 8 entre une amplitude significative choisie et l'amplitude du bruit de fond). Tous ces paramètres réglables sont programmés en mémoire (EPROM) et donc susceptibles d'être modifiés. Les données sont stockées sur une cartouche magnétique de 5 Mectects par blocs de 4 K. La longueur maximale d'enregistrement est réglable en nombre de blocs (chaque déclenchement provoque l'acquisition d'un bloc au minimum). Compte tenu du pas d'échantillonnage choisi pour cette campagne, chaque station était capable d'enregistrer en 3 composantes 625 événements sur une plage de 34 secondes chacun. L'ensemble de ces paramètres a été fixé de façon à privilégier l'enregistrement de séismes de faible magnitude très proches (quelques dizaines de km) et de séismes régionaux (jusqu'à 200 km). Par contre, la bande passante choisie pour les géophones ne permet pas l'enregistrement des télé-séismes.

RÉSULTATS. — 1. *Activation des OBS et estimation du bruit de fond.* — La variation du bruit de fond est un des paramètres les plus importants et délicats à évaluer lors de la mise en place d'un réseau d'OBS : en effet, le rapport signal/bruit est souvent fortement dégradé par différents facteurs tels que courants sur le fond, réponse du sédiment superficiel, conditions météorologiques à la surface, bruit biologique, passages de navires, dans une bande de fréquence inférieure à 10 Hz ([7], [8], [9]). Nous avons constaté que ce bruit de fond est effectivement important en mer Ligure : il a été à l'origine d'environ 90 % des activations des OBS, taux fréquemment observé dans des domaines marins à sismicité modérée. Le nombre moyen de déclenchements par station s'est avéré être de 200 environ sur les 625 possibles. On pourra donc envisager à l'avenir de rallonger la durée potentielle des enregistrements jusqu'à une minute, ce qui sera capital pour mener à bien l'étude des phénomènes d'atténuation. Le seuil de déclenchement choisi (déterminé par le rapport STA/LTA) s'est révélé être bien adapté par rapport au bruit de fond relevé durant notre période d'observation.

2. *Sismicité enregistrée.* — Le tableau présente la liste des 15 événements détectés simultanément par les réseaux terrestre et sous-marin et qui ont pu être correctement localisés (erreur horizontale < 2 km, erreur verticale < 5 km). Tous les séismes régionaux situés à moins de 200 km du réseau ont été détectés par au moins un OBS. Ces événements proviennent de la région de Digne, d'Italie, de l'arrière-pays niçois et du

TABLEAU

Événements détectés par au moins un OBS et solutions focales obtenues.
Events detected by at least one OBS and obtained focal solutions.

N°	Date	Heure	Latitude	Longitude	Profondeur	Magnitude	Plan 1	Plan 2
1 . . .	13/06	10 : 01	43°26'N	6°48'E	0	1,5	—	—
2 . . .	13/06	10 : 27	43°25'N	6°11'E	0	Tir	—	—
3 . . .	13/06	15 : 08	43°51'N	7°45'E	0	1,6	—	—
4 . . .	18/06	16 : 50	43°31'N	6°42'E	0	Tir	—	—
5 . . .	19/06	01 : 18	43°54'N	10°03'E	3	2,8	265°, 60°N	159°, 71°S
6 . . .	23/06	10 : 32	44°18'N	7°13'E	4	2,3	325°, 71°N	088°, 36°S
7 . . .	24/06	15 : 25	43°01'N	6°40'E	0	Tir	—	—
8 . . .	24/06	15 : 27	43°01'N	6°40'E	0	Tir	—	—
9 . . .	24/06	16 : 01	43°01'N	6°40'E	0	Tir	—	—
10 . . .	25/06	06 : 36	43°13'N	7°43'E	2	1,9	—	—
11 . . .	27/06	07 : 30	43°36'N	7°38'E	17	1,6	123°, 46°S	229°, 44°N
12 . . .	29/06	01 : 19	44°11'N	6°22'E	0	3,1	309°, 86°N	053°, 80°S
13 . . .	29/06	08 : 55	44°11'N	6°22'E	1	2,8	118°, 83°N	018°, 64°E
14 . . .	01/07	09 : 21	44°12'N	6°19'E	1	2,7	—	—
15 . . .	02/07	18 : 42	43°56'N	7°41'E	2	2,7	190°, 63°N	303°, 55°E

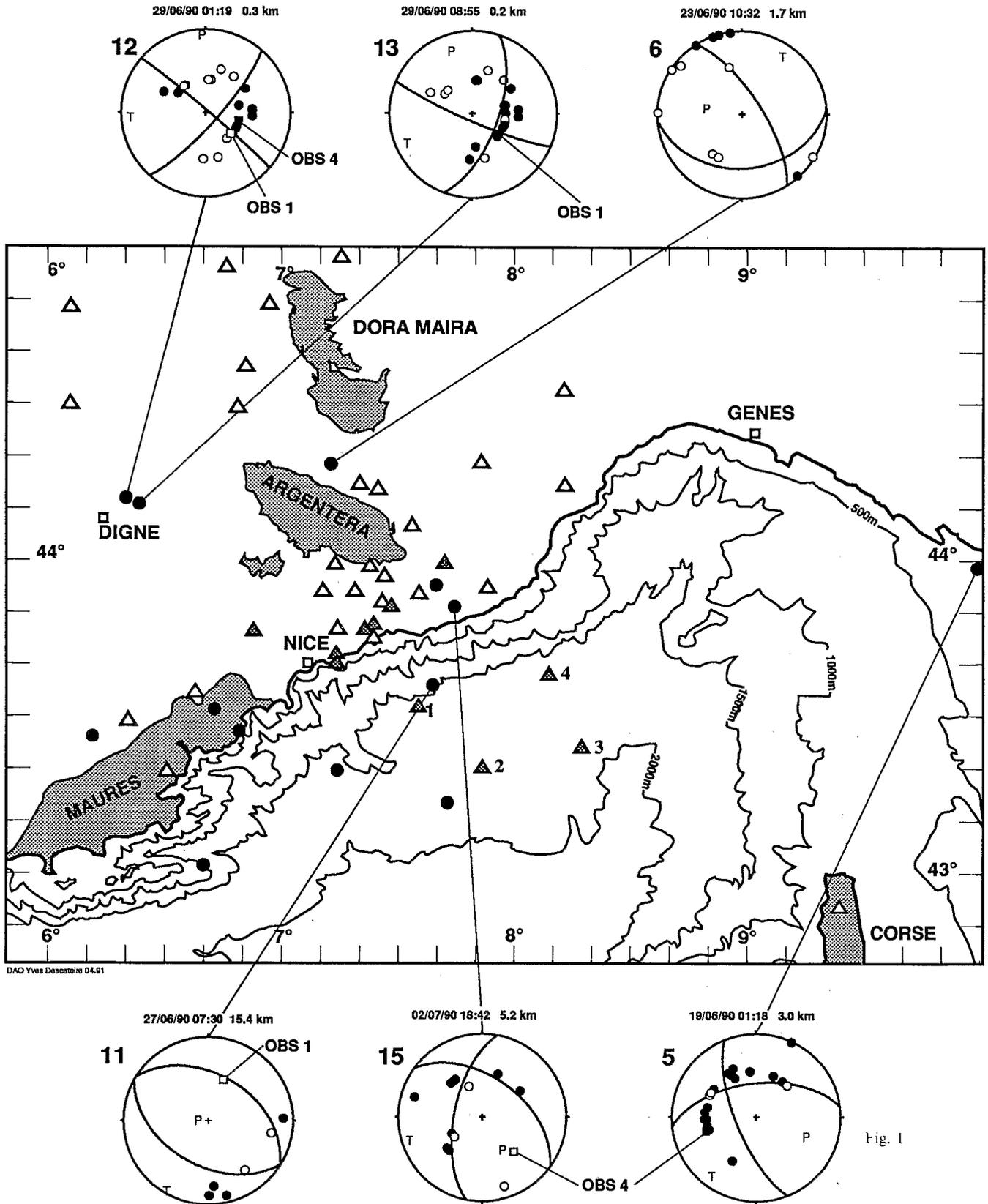
bassin Ligure (*fig. 1*). Malheureusement, l'activité sismique régionale a été faible pendant la période d'enregistrement en comparaison de celle habituellement relevée par le réseau permanent. La localisation de deux séismes locaux de faible magnitude n'a été rendue possible que grâce à l'information apportée par un des OBS. La figure 3 reproduit l'enregistrement (composante horizontale) d'un de ces séismes situé à environ 10 km de l'OBS 1. Cette proximité a permis de bien contraindre la profondeur du foyer, estimée à 17 ± 5 km, valeur sensiblement plus élevée que celle habituellement trouvée sur la pente continentale pour les séismes localisés avec le réseau permanent. Par ailleurs, 18 micro-séismes tectoniques ont été bien identifiés lors du dépouillement des bandes digitales des OBS, mais n'ont pas pu être localisés. Un réseau plus dense d'OBS devrait probablement permettre de localiser ce type d'événements auxquels nous n'avons pour l'instant pas accès par le réseau permanent.

3. *Atténuation des ondes sismiques.* — Cinq des événements localisés représentent des tirs (tableau) : dans le contexte de cette première étude, ils sont importants car révélant

EXPLICATIONS DE LA PLANCHE I

Fig. 1. — Carte du réseau sismologique utilisé (triangles), des épicentres (cercles noirs) et des six mécanismes au foyer déterminés lors de la campagne SISBALIG 1 dans la région de la mer Ligurienne. Les triangles ombrés sont les stations temporaires (les OBS sont numérotés de 1 à 4). Sur les sphères focales sont indiquées les polarités en compression (noires) et en dilatation (blanches), les polarités lues aux OBS (carrés), et les axes de pression (P) et de tension (T); on a reporté le numéro (tableau), la date, l'heure et la profondeur des six événements correspondants. Les massifs cristallins sont en ombré.

Fig. 1. — *Map of the seismological network (triangles), the epicenters (black circles) and the six focal solutions obtained during SISBALIG 1 experiment in the Ligurian Sea area.* Dark triangles are temporary seismographs (OBS are numbers 1 to 4). On focal mechanisms, dark (resp. white) circles are compressional (resp. dilatational) first motions, squares are OBS first motions, and P and T are pressure and tensions axes respectively; the number (Table), date, origin time and depth of the six corresponding events are indicated. Shaded areas are crystalline massifs.



DAO Yves Descatoire D4.91

Fig. 1

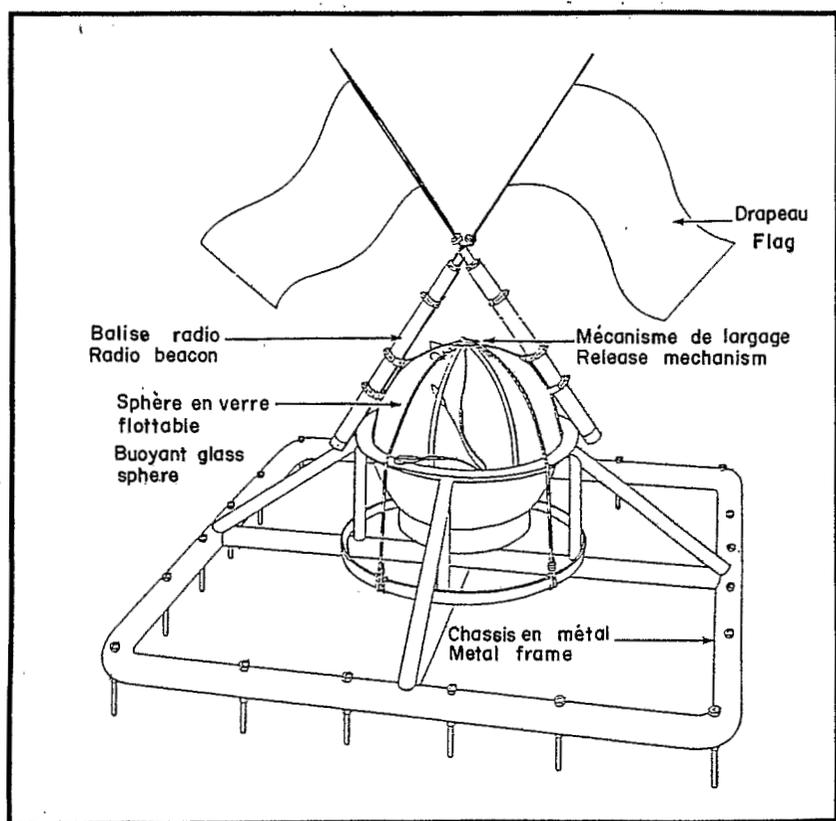


Fig. 2. — Schéma d'un sismographe sous-marin (OBS) type utilisé et de son système de lest (châssis).
 Fig. 2. — Schematic view of the ocean bottom seismograph (OBS) model used and its ballast load (iron frame).

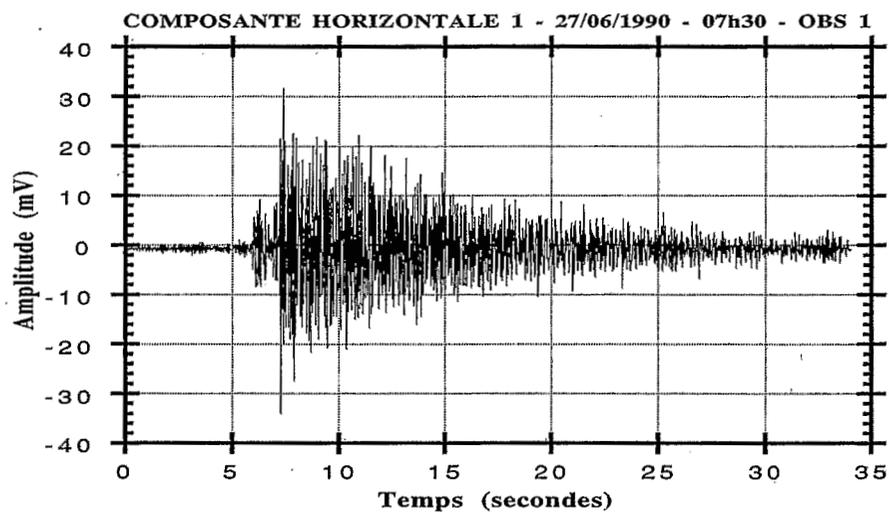


Fig. 3. — Signal sismique enregistré numériquement à la station sous-marine OBS 1 sur une des composantes horizontales le 27 juin 1990 à 7 h 30 (séisme n° 11, voir tableau et fig. 1).
 Fig. 3. — Numerical seismic signal obtained at OBS 1 on one of the horizontal components (earthquake of June 27th, 1990, numbered 11 on Table and Fig. 1).

la grande sensibilité des OBS. Les ondes T [10] générées par les tirs en mer ont notamment bien activé les quatre stations sous-marines. Il est important de remarquer que les OBS 2 et 3 situés sur le glaciais, quoique ayant bien fonctionné puisque activés par les tirs, n'ont enregistré aucun des séismes régionaux, contrairement aux deux OBS (1 et 4) placés plus près de la côte, en pied de pente (*fig. 1*). Étant donné la distance relative entre les stations sous-marines et les séismes régionaux, plusieurs explications peuvent rendre compte de ce phénomène : 1. un mauvais couplage sur le fond des OBS 2 et 3 : les sédiments superficiels meubles, gorgés d'eau, peuvent influencer localement leur réponse; 2. un effet diffractant des nombreux dômes et murs de sel perçants bien connus dans la zone des OBS 2 et 3 [11]; 3. l'atténuation provoquée par le passage de la croûte continentale à la croûte océanique [12] qui provoquerait une extinction de l'énergie émise vers le bassin. Cette première expérience ne nous permet pas de trancher entre ces trois hypothèses, mais présente au moins l'intérêt de clairement poser le problème de l'atténuation. Dans le cadre de l'étude du risque sismique dans la région azurée, il sera important d'évaluer précisément ce phénomène.

4. *Mécanismes au foyer* (*fig. 1*). — *Séisme n° 5* (La Spezia, Italie) : cet événement, bien contraint par le réseau local italien, est situé exactement sur le prolongement en mer de la grande faille normale de La Spezia à vergence SO [13]. Le mécanisme indique une faible composante décrochante sénestre cohérente avec le style tectonique des Apennins internes.

— *Séisme n° 6* (Nord Argentera) : situé au sud-est de la crise sismique de janvier 1989 de Haute-Ubaye [14] où l'on trouve des mouvements de type décrochant-extensif de la zone externe du Briançonnais, il appartient au secteur très sismique de Cuneo où sont relevés de nombreux mécanismes à jeu normal-décrochant. Il s'inscrit bien dans le mouvement tectonique général dextre orienté N 110-130° [15].

— *Séisme n° 11* (mer Ligure) : contraint essentiellement par les stations temporaires (OBS 1), ce mécanisme à jeu normal, quoique présentant un nombre insuffisant de polarités, permet de mesurer l'importance que peut jouer un réseau sous-marin dans l'étude des séismes de faible magnitude de ce secteur. Il témoignerait d'une composante d'extension NE-SO relevée à terre un peu plus au Nord (région de San Remo, voir le séisme n° 15). L'axe de tension T, orienté N 220°, est cependant compatible avec le champ de contraintes déduit des solutions focales de séismes récents dans le bassin ([15], [16]), et pourrait donc exprimer la transition entre le régime compressif du domaine océanique et le régime décrochant de l'arrière-pays.

— *Séismes nos 12 et 13* (région de Digne) : peu de mécanismes au foyer ont été déterminés dans cette zone ([17], [18]). Ces deux mécanismes décrochants correspondent au mouvement sénestre relevé sur la faille de la Durance mais sont situés un peu plus au NE. Bien qu'il soit difficile de choisir entre les deux familles de plans nodaux, ces solutions focales sont en très bon accord avec les études microtectoniques qui démontrent l'existence d'une trajectoire de contrainte horizontale maximale orientée à peu près N-S au Pliocène-actuel ([18], [19]).

— *Séisme n° 15* (San Remo, Italie) : les quelques mécanismes déterminés dans cette zone témoignent de décrochements dextres sur des linéaments NO-SE comme celui de Saorge-Taggia, avec une composante en extension ([15], [20]). Nous retrouvons le même comportement avec ce mécanisme dont la qualité est déterminée par notre réseau local (et notamment l'OBS 4).

CONCLUSION. — L'apport de réseaux temporaires de sismographes sous-marins, maintenant bien maîtrisés technologiquement, est déterminant dans les études de microsismicité. La campagne SISBALIG 1 menée en mer Ligure a permis de confirmer l'intérêt d'un déploiement d'OBS entre le continent et la Corse, à la fois pour l'observation de la sismicité et pour l'étude de la propagation des ondes sismiques à travers la marge. Le problème de l'atténuation de l'énergie pourrait notamment s'avérer comme étant fondamental dans la perspective de l'évaluation du risque sismique régional. Par ailleurs il est probable qu'un réseau dense d'OBS puisse permettre une détermination plus précise de la profondeur des foyers, qui est peut-être plus grande que celle supposée jusqu'à maintenant. Nos résultats montrent qu'une amélioration sensible de la connaissance du comportement sismotectonique à la fois régional et local peut être obtenue à l'aide d'un tel réseau, notamment grâce à une meilleure couverture azimutale et une détection accrue des microséismes affectant la marge.

Une future campagne sismologique dans la région devrait déployer un réseau plus dense dans une zone un peu plus large et pendant une période de temps la plus longue possible; elle devra également prendre en compte les paramètres d'enregistrement maintenant mieux définis.

(¹) L.D.G./C.E.A. : Laboratoire de Détection et de Géophysique, C.E.A., Bruyères-le-Châtel. I.G.G. : Institut de Géophysique de Gênes, Italie. I.P.G.S. : Institut de Physique du Globe, Strasbourg. SISMALP : Laboratoire de Géophysique interne et Tectonophysique, Grenoble.

Nous remercions Jean-Pierre Réhault (U.B.O.) qui est à l'origine du projet d'étude, l'équipage du *N/O Catherine-Laurence*, et Éric Calais et Bruno Feignier qui ont participé à la campagne en mer.

Contribution n° 572 de l'U.R.A. 718 du C.N.R.S.-G.E.M.C.O.

Note remise le 27 mai 1991, acceptée après révision le 10 septembre 1991.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] C. D. LINDHOLM et P. C. MERROW, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, n° 4, 1990, p. 1014-1025.
- [2] S. L. SOLOVIEV, I. P. KUZIN, S. A. KOVACHEV, M. FERRI, I. GUERRA et G. LUONGO, *Mar. Geol.*, 94, 1990, p. 131-146.
- [3] G. CAPPONI, C. EVA et F. MERLANTI, *Atti Ac. Ligure Sci. Lett.*, XXXVII, 1981, p. 1-35.
- [4] D. MCKENZIE, *Nature*, 226, 1970, p. 239-243.
- [5] J.-P. RÉHAULT, G. BOILLOT et A. MAUFFRET, *Mar. Geol.*, 55, 1984, p. 447-477.
- [6] C. FROHLICH, R. LOUAT et Y. NAKAMURA, *Mar. Geophys. Res.*, 12, 1990, p. 253-267.
- [7] G. V. LATHAM et A. A. NOWROOZI, *J. Geophys. Res.*, 12, 1968, p. 3945-3956.
- [8] F. K. DUENNEBIER, G. BLACKINGTON et G. H. SUTTON, *Mar. Geophys. Res.*, 5, 1981, p. 109-115.
- [9] A. TRÉHU, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, n° 4, 1985, p. 1195-1204.
- [10] Y. CANSI et N. BÉTHOUX, *J. Geophys. Res.*, 90, 1985, p. 5459-5465.
- [11] Ch. LE CANN, *Thèse de Doctorat*, Université de Bretagne occidentale, Brest, 1987, 296 p.
- [12] J. REGAN et D. G. HARKRIDER, *Geophys. J. Int.*, 98, 1989, p. 107-130.
- [13] F.-C. WEZEL, *Mem. Soc. Geol. It.*, 24, 1982, p. 531-568.
- [14] F. GUYOTON, J. FRÉCHET et F. THOUVENOT, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 312, série II, 1990, p. 985-991.
- [15] N. BÉTHOUX, M. CATTANEO, P.-Y. DELPECH, C. EVA et J.-P. RÉHAULT, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 307, série II, 1988, p. 71-77.
- [16] J.-F. RITZ, P. HOANG-TRONG, S. REBAI, H. PHILIP et G. HERQUEL, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 311, série II, 1990, p. 1505-1513.
- [17] M. NICOLAS, J.-P. SANTOIRE et P.-Y. DELPECH, *Tectonophysics*, 179, 1990, p. 27-53.
- [18] Ph. COMBES, *Thèse 3^e cycle*, Université Louis-Pasteur, Strasbourg, 1984, 182 p.
- [19] P. LABAUME, J.-F. RITZ et H. PHILIP, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 308, série II, 1989, p. 1653-1660.
- [20] P. HOANG-TRONG, H. HAESSLER, J.-M. HOLL et Y. LEGROS, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 304, série II, 1987, p. 419-424.

J. D. : Laboratoire de Géodynamique sous-marine, Observatoire océanologique,
B.P. n° 48, 06230 Villefranche-sur-Mer;

N. B. : Centre scientifique de Monaco, 16, boulevard de Suisse, 98000 Monaco;

Y. H. et R. L. : Antenne ORSTOM, Observatoire océanologique, B.P. n° 48, 06230 Villefranche-sur-Mer;

C. E. : Institut de Géophysique de Gênes, 345 Corso Europa, 16142 Gênes.