

**LE SEA-BEAM, SONDEUR A MULTI-FAISCEAUX  
DU N/O « JEAN CHARCOT »  
DESCRIPTION, ÉVALUATION ET PREMIERS RÉSULTATS**

par Vincent RENARD  
et Jean-Paul ALLENOU

Centre Océanologique de Bretagne, Brest

---

Contribution N° 603 du Département Scientifique.

**RÉSUMÉ**

- En 1976, le CNEXO a fait l'acquisition d'un sondeur bathymétrique à 16 faisceaux étroits, le Sea-Beam, fabriqué par la Société General Instrument Corporation, Harris Division, Westwood, Massachusetts.

Ce sondeur a été installé et testé au printemps 1977 sur le N/O *Jean Charcot*. Contrairement aux sondeurs classiques qui ne fournissent qu'une ligne de sonde unique, ce nouveau sondeur permet de couvrir, en un seul passage du navire, un couloir dont la largeur égale les 3/4 de la profondeur (4 500 m par des fonds de 6 000 m) [1]. Les données obtenues sont traitées en temps réel par un mini-ordinateur grâce à un logiciel élaboré qui fournit sur une table traçante des lignes de contour bathymétriques à intervalle et à échelle choisis par l'utilisateur. Les données sont également enregistrées sur bande magnétique pour traitement ultérieur.

L'article décrit les caractéristiques principales du Sea-Beam. Il présente les résultats de quatre semaines de sorties d'essai et d'évaluation du système, en avril et mai 1977. Il analyse enfin ses possibilités en matière de cartographie et d'analyse structurale, illustrées par les résultats des premières campagnes. -

**INTRODUCTION**

Le sondage des fonds océaniques n'a démarré de façon systématique que vers les années 30 lorsque le sondeur acoustique a remplacé l'usage du fil à plomb. Bien que perfectionné pendant et après la seconde guerre mon-

diale, le sondeur acoustique n'a plus fait de grands progrès depuis et est resté limité à la mesure d'une sonde unique. Cette sonde unique, acquise à des cadences élevées (2 secondes en moyenne) correspond au premier écho reçu, pour la majorité des sondeurs, dans un cône d'ouverture large (30 à 60 degrés) non stabilisé ou pour certains sondeurs plus perfectionnés mais peu répandus dans un cône étroit de quelques degrés stabilisé par rapport au tangage et au roulis du navire. La précision de la sonde obtenue étant fonction de l'angle d'ouverture, seuls les sondeurs à faisceaux étroits peuvent prétendre à obtenir des relevés de détail. Cependant, le temps requis pour effectuer un relevé bathymétrique avec ce type de sondeur est très élevé, car il faut effectuer de nombreuses routes parallèles distantes entre elles au plus de la largeur de la zone éclairée sur le fond par le sondeur (quelques centaines de mètres par grand fond pour les faisceaux étroits).

Une nouvelle étape vient d'être franchie dans le domaine du sondage marin grâce au développement d'un sondeur à faisceaux étroits multiples qui en plus de la sonde verticale fournissent plusieurs sondes transversalement au navire [2]. Lors du déplacement de celui-ci, les fonds océaniques sont ainsi balayés sur un couloir dont la largeur dépend du nombre et de l'ouverture des faisceaux. Les sondes acquises lors du passage du navire sont digitalisées et contourées en temps réel sous forme de lignes de niveau. Ainsi se déroulent sous les yeux du personnel embarqué le relief des fonds

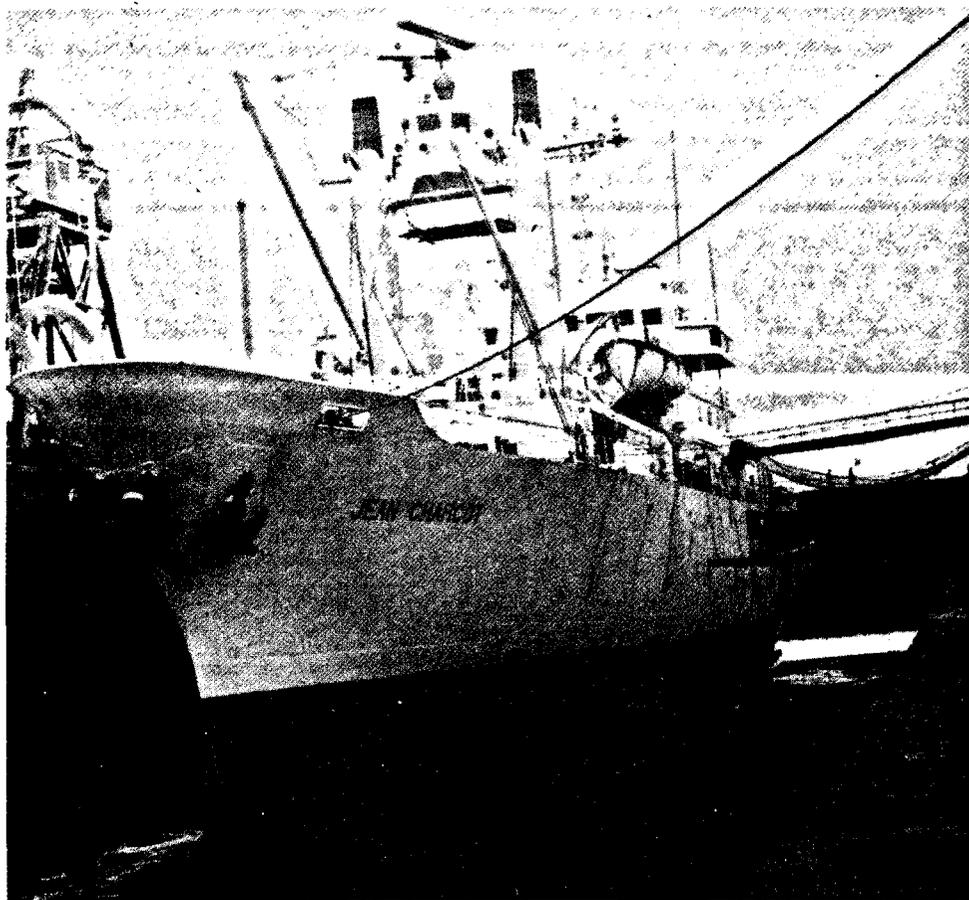


FIG. 1. — Le N.O. *Jean Charcot* en cale sèche pour l'installation des transducteurs sur coque, Brest, janvier 1977.

marins avec ses pentes et ses directions, premiers éléments d'une interprétation structurale. Cette nouvelle génération de sondeurs permettra aux océanographes d'avancer à pas de géant dans l'étude et la compréhension des structures des fonds océaniques. Le gain de temps fourni par un tel système est proportionnel aux nombres de faisceaux et à leur angle d'ouverture. Pour le Sea-Beam, sondeur à 16 faisceaux de  $2^{\circ} \frac{2}{3}$  chacun, le gain de temps par rapport à un système monofaisceau est supérieur à 10.

Conscient des avantages qu'un tel système procurerait aux recherches marines, le CNEXO a décidé d'équiper le navire océanographique *Jean Charcot* d'un tel système. Depuis mai 1977, le N.O. *Jean Charcot* (fig. 1) est le premier navire au monde équipé d'un Sea-Beam construit par la firme américaine General Instrument Corporation.

### PRINCIPE DE CRÉATION DES FAISCEAUX

Sous la coque du navire sont installés deux groupes de transducteurs. D'une part, les projecteurs servant à l'émission, d'autre part, les hydrophones servant à la réception.

#### Emission

Les projecteurs se présentent sous forme de blocs rectangulaires (fig. 2). Chacun des 20 blocs contient 4 éléments magnéto-strictifs excités en parallèle. Ces 20 blocs constituent l'ensemble actif d'émission. Ils sont placés dans un dôme caréné de 6 mètres de long fixé longitudinalement au navire. Chaque bloc est excité séparément. Par contrôle de la puissance et de la phase de la fréquence d'émission l'on obtient un diagramme d'émis-



FIG. 2. — Les projecteurs du Sea-Beam pendant le montage sur coque.

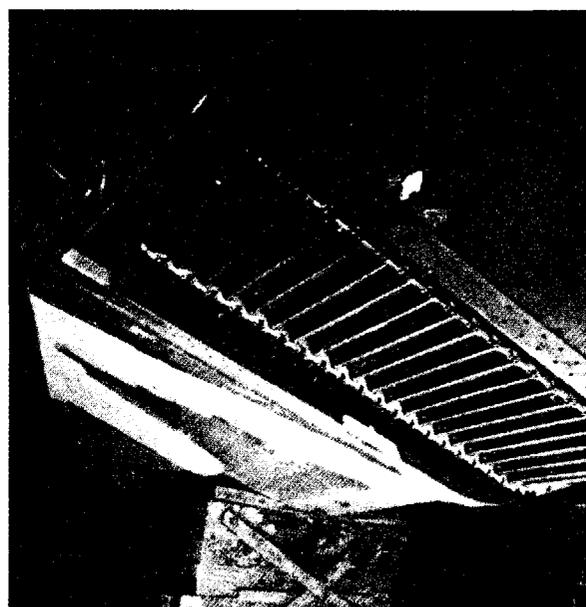


FIG. 3. — Les hydrophones du Sea-Beam pendant le montage sur coque.

sion illustré sur la figure 4 A. La zone éclairée sur le fond marin à l'émission correspond à la base d'une pyramide ayant le navire pour sommet et dont la longueur correspond à un angle d'ouverture au sommet de  $60^\circ$  et la largeur à un angle de  $2^\circ \frac{2}{3}$ . Le plan d'émission, transverse à l'axe longitudinal du navire, est stabilisé électroniquement et demeure vertical indépendamment du tangage (limite supérieure  $10^\circ$ ).

### Réception

Chaque hydrophone se présente sous forme d'un barreau constitué d'éléments piézo-électriques et de masselottes d'adaptation, le barreau étant recouvert d'une gaine caoutchoutée. L'ensemble de réception est constitué par 40 hydrophones (fig. 3). Ceux-ci sont disposés dans un dôme caréné de 4 mètres de long disposé transversalement au navire. Les 16 faisceaux sont obtenus par sommation vectorielle des signaux reçus par ces hydrophones. La figure 4 B représente les 16 faisceaux ainsi obtenus. Sur le fond marin ces faisceaux déterminent 16 surfaces rectangulaires dont la longueur parallèle à l'axe du navire correspond à un angle d'ouverture au sommet de  $20^\circ$  et la largeur à un angle de  $2^\circ \frac{2}{3}$ . Cet ensemble n'est pas stabilisé mais roule et tangue avec le navire.

### Composition émission-réception

La figure 4 C illustre la création des faisceaux dérivant de la composition des figures d'émission (4 A) et de réception (4 B). L'énergie acoustique reçue provient de 16 zones « carrées » dont le côté est défini par les diagrammes d'émission et de réception ( $2^\circ \frac{2}{3}$  d'ouverture) et par la profondeur. Ces 16 « carrés » sont situés dans un plan vertical perpendiculaire à l'axe longitudinal du navire grâce à la stabilisation de l'émission. Cepen-

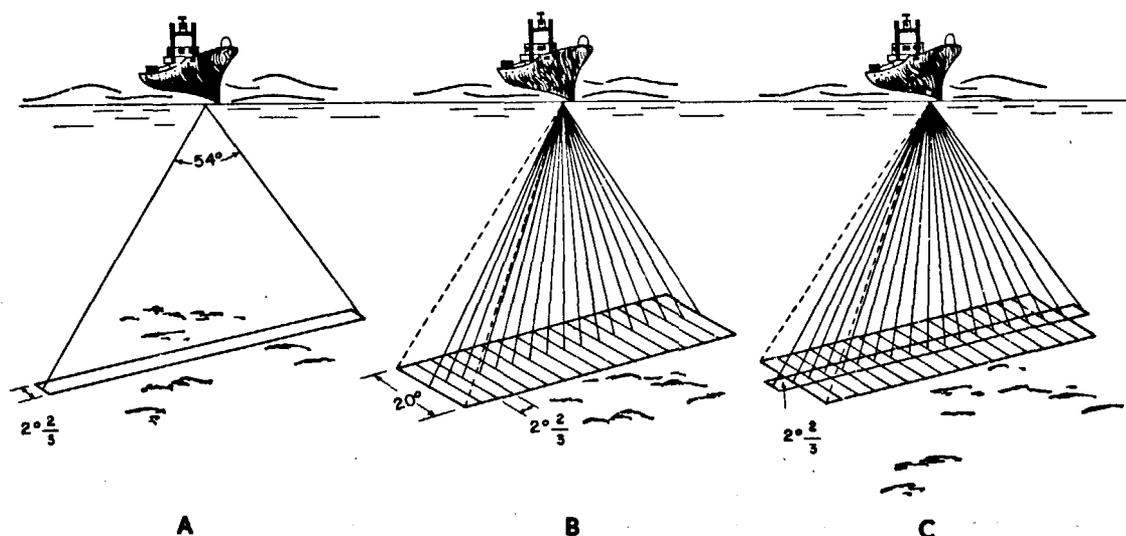


FIG. 4. — Schéma de fonctionnement des faisceaux du Sea-Beam. A, Zone éclairée à l'émission ; B, Zone couverte à la réception ; C, Zone couverte par la composition émission-réception.

dant leur position transversale varie avec le roulis et n'est obtenue qu'après réception des signaux par un système qui calcule pour chaque faisceau son angle et sa distance sur le fond par rapport à l'aplomb du navire. Le cœur de ce système est un gyroscope vertical de référence.

### STRUCTURE GÉNÉRALE DU SEA-BEAM

Sans entrer dans les détails qui sont exposés dans une note spéciale [3], une description générale de la structure du Sea-Beam, des modes de fonctionnement et des documents de sortie est donnée ci-après.

Le Sea-Beam découle de l'intégration de deux ensembles : d'une part le NBES (narrow beam echo sounder) qui fournit les sondes sous forme de signaux analogiques à partir de 16 faisceaux acoustiques, et d'autre part l'Echo Processor qui traite ces 16 faisceaux par voie digitale à partir d'un mini-ordinateur. Le schéma d'ensemble de l'équipement est donné en figure 5. L'ensemble, mis à part les transducteurs de coque, est installé dans un local spécial du navire. Les figures 6 et 7 donnent une vue d'ensemble de l'installation.

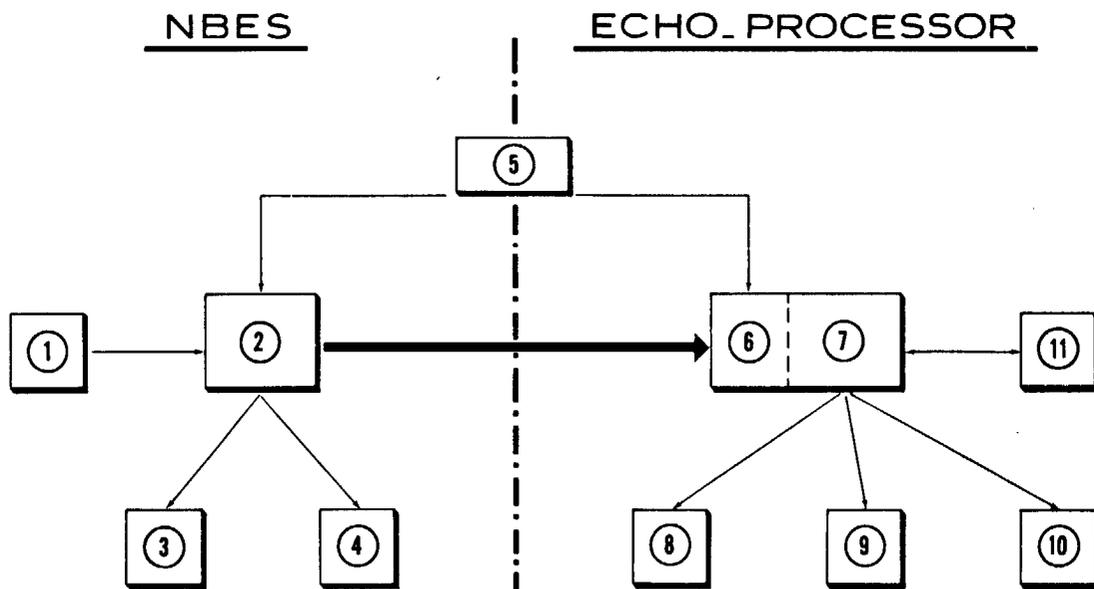


FIG. 5. — Structure générale du Sea-Beam illustrant l'organisation bicéphale avec d'un côté le NBES et de l'autre l'Echo Processor : 1, transducteur de coque ; 2, baie électronique du NBES ; 3, enregistrement analogique du faisceau vertical ; 4, affichage digital de la profondeur ; 5, référence de verticalité ; 6, interface entre baie électronique et mini-ordinateur ; 7, mini-ordinateur NOVA 800 ; 8, écran cathodique pour visualisation du profil bathymétrique transverse ; 9, enregistrement magnétique des sondes en fonction du temps ; 10, traceur de courbes bathymétriques ; 11, téléscripneur de contrôle du système.

Les divers composants sont illustrés sur les figures 6 et 7.

#### NBES

Le sondeur NBES assure les fonctions suivantes :

- excitation des transducteurs de puissance ;
- amplification des signaux relevés sur les transducteurs de réception et formation des 16 faisceaux ;

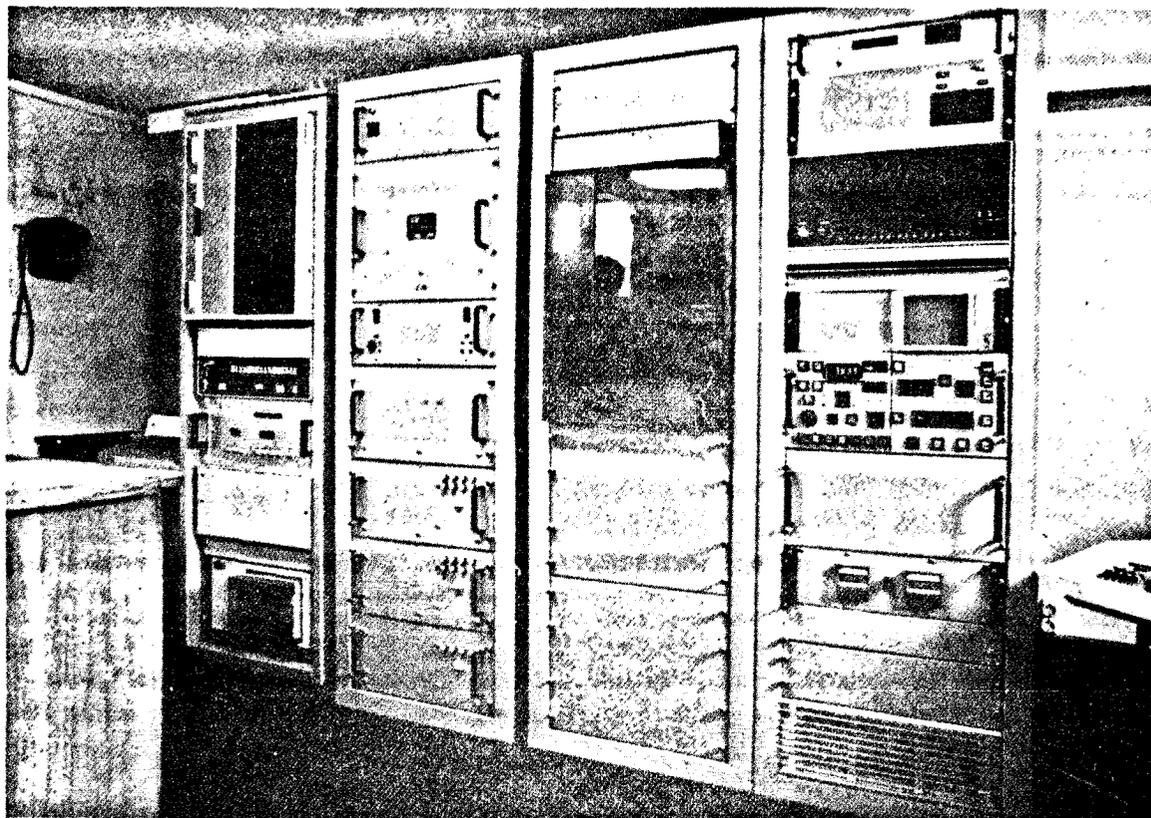


FIG. 6. — Ensemble électronique du Sea-Beam : à gauche la baie électronique, au centre l'enregistreur magnétique, à droite le mini-ordinateur, les contrôles et l'écran de visualisation.

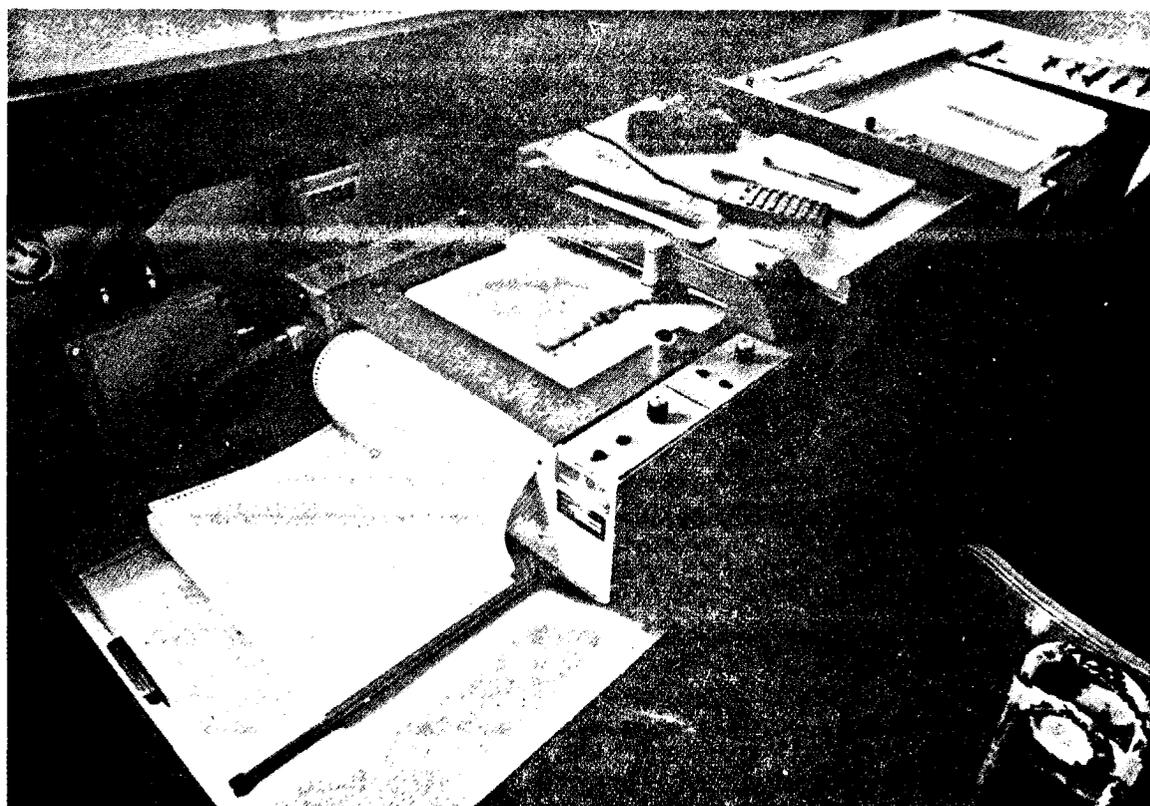


FIG. 7. — Traceur de courbes et enregistreur analogique du faisceau vertical dans le local Sea-Beam.

- digitalisation câblée (hardware) du faisceau vertical ;
- mise en forme des signaux destinés à l'Echo Processor et à l'enregistrement analogique ;
- correction électro-mécanique du roulis.

Le NBES a deux modes principaux de fonctionnement :

— Autonome (Group Ping ou Periodic) : dans ce mode l'Echo Processor est déconnecté et le NBES peut être utilisé comme un sondeur à faisceau étroit classique. Le fonctionnement en Group Ping autorise une récurrence d'émission élevée par programmation via l'enregistreur graphique UGR (Universal Graphic Recorder) des cycles d'émission et de réception. Une cadence moyenne d'émission de 2 secondes peut être obtenue pour toutes profondeurs en utilisant le programme à huit cycles ERREREER (E pour émission, R pour réception) avec un cycle de base d'une seconde. Dans le mode périodique, par contre, c'est le NBES qui programme l'émission en fonction de la fenêtre de profondeur affichée par l'opérateur. La cadence d'émission est fixée par le temps nécessaire pour que le son parcoure la profondeur maximale de la fenêtre.

— Sous contrôle de l'Echo Processor. Dans ce mode de fonctionnement l'ensemble, dont le NBES, est piloté par le mini-ordinateur ; le rôle du NBES reste identique, mais la récurrence d'émission ne peut dépasser le temps de trajet dans l'eau correspondant à deux fois la profondeur additionné du temps de traitement informatique des signaux (moins d'une seconde). La figure 8 illustre l'enregistrement analogique du faisceau ver-

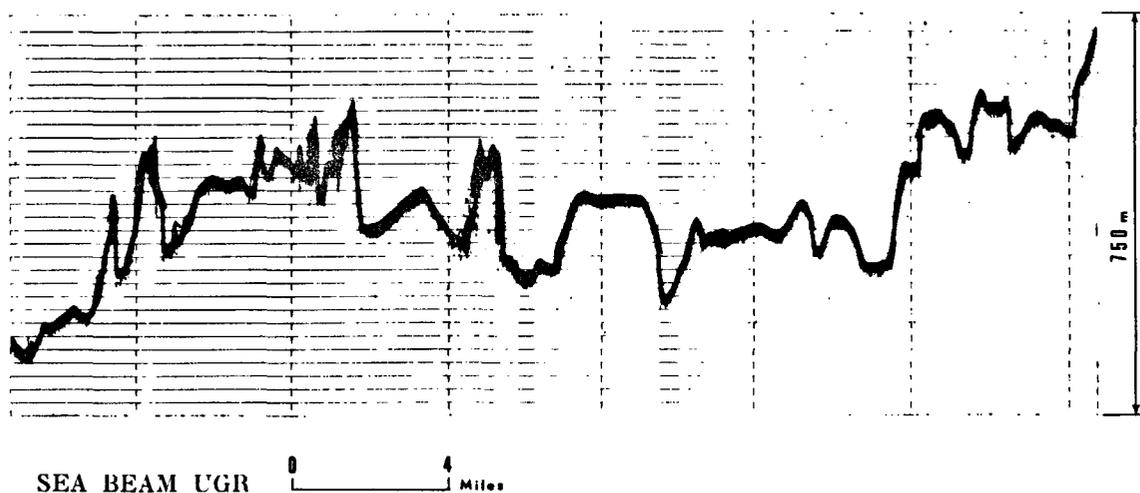


FIG. 8. — Exemple d'enregistrement analogique du faisceau vertical obtenu en mode automatique (récurrence moyenne de 6 secondes).

tical obtenu sur l'UGR. La profondeur est déterminée grâce aux lignes d'échelle à un multiple de 750 mètres près (durée de cycle d'une seconde). Les faisceaux obliques peuvent également être enregistrés analogiquement, le choix étant fait par bouton poussoir sur la console du NBES (fig. 9). La profondeur correspondant au faisceau vertical est de plus digitalisée par hardware (sauf en mode Group Ping) et affichée sur tubes lumineux

par le NBES. Cette information est délivrée sur la face avant du panneau de contrôle du NBES (fig. 9), et recopiée dans le laboratoire scientifique.

La figure 9 représente le panneau de contrôle du NBES (partie gauche) et comprend :

- contrôle de l'émission et de la durée d'impulsion ;

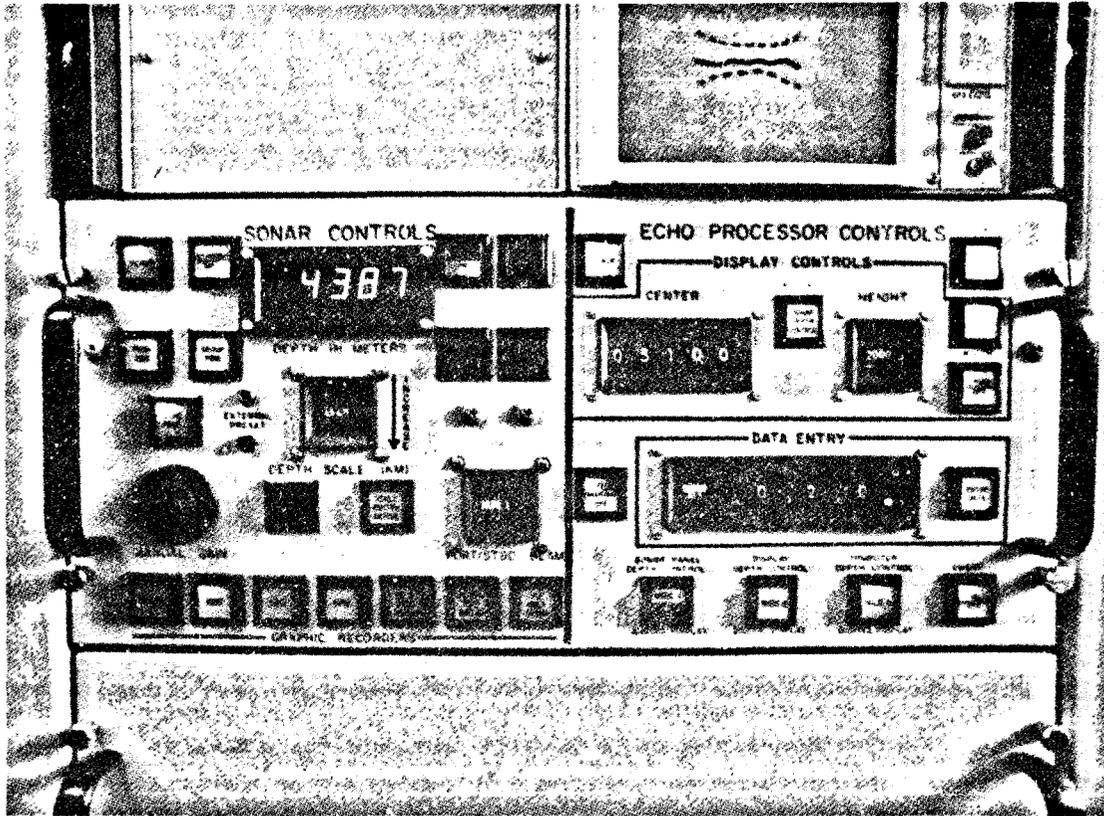


FIG. 9. — Panneau de contrôle du Sea-Beam : à gauche le contrôle du NBES, à droite celui de l'Echo Processor, en haut à droite l'écran de visualisation du profil bathymétrique transverse, en pointillé les portes de réception.

- contrôle du mode de fonctionnement ;
- contrôle de la récurrence d'émission en mode autonome ;
- affichage de la profondeur ;
- choix du faisceau envoyé sur l'UGR.

### Echo Processor

L'Echo Processor assure les fonctions suivantes :

- traitement numérique des signaux reçus sur les hydrophones et détermination des profondeurs et de la distance transverse au navire des 16 faisceaux ;
- contrôle de l'enregistrement digital sur bande magnétique ;
- supervision de la table traçante ;
- tracé sur écran cathodique du profil bathymétrique transversal au navire.

L'Echo Processor possède trois modes de fonctionnement : En mode 1, il n'apparaît sur l'écran cathodique qu'une image non traitée des 16 faisceaux. Ce mode est utilisé au départ d'un relevé pour permettre d'initialiser

divers paramètres et pour faire certaines mesures (bruit, signal réverbéré...); en mode 2, les portes de réception des signaux sont contrôlées manuellement; en mode 3, le contrôle des portes est assuré par le système de façon automatique.

Le mode 3 est le mode normal d'utilisation, le mode 2 étant utilisé pour l'initialisation ou en cas de perte d'échos.

La partie droite de la figure 9 montre les contrôles de l'Echo Processor : la partie supérieure (*display control*) concerne la visualisation du profil transversal sur l'écran cathodique; la partie médiane (*data entry*) permet l'entrée dans le système de divers paramètres, principalement le cap initial du navire, sa vitesse, l'échelle du tracé, l'intervalle de contour, etc.).

En mode 2, sur l'écran cathodique apparaît à chaque cycle d'émission la coupe bathymétrique du fond transversale au navire interpolée à partir de valeurs digitalisées des 16 faisceaux (fig. 9). Le profil reste affiché jusqu'à l'interrogation suivante. En mode 3 les portes de réception sont également visibles (fig. 9).

Deux types d'information sont enregistrés sur la bande magnétique Sea-Beam :

— Caractéristiques du profil : n° de mission; n° de profil; jour du relevé; commentaires.

— Données obtenues à chaque interrogation : heure, minutes, secondes; cap du navire; profondeurs correspondant aux 16 faisceaux; distances transverses correspondantes.

La figure 13 est un exemple de document que fournit le traceur de courbes. La bathymétrie du couloir éclairé acoustiquement apparaît sous forme de lignes de contour. L'intervalle des lignes de contour ainsi que l'échelle du tracé sont choisis par l'utilisateur et peuvent être modifiés à tout moment. Le sens des pentes est indiqué par des petits traits bordant une ligne de contour sur deux et dirigés vers la pente descendante. Les cotes des lignes de contour qui franchissent l'axe central du tracé sont indiquées au bas du tracé et repérées sur l'axe central par un petit trait. L'heure, le cap ainsi que l'intervalle de contour apparaissent régulièrement dans la partie supérieure du tracé ainsi qu'à tout changement d'un de ces paramètres par l'utilisateur.

Un téléscripneur sert de périphérique à l'ordinateur et permet d'entrer divers paramètres d'initialisation et de surveiller le bon fonctionnement du système.

## ÉVALUATION DES PERFORMANCES

En vue d'évaluer les performances du Sea-Beam, une série d'essais à la mer a été menée du 12 avril au 18 mai 1977. Afin d'éliminer les erreurs dues au positionnement dans l'évaluation du système, un système de navigation acoustique qui permet une précision relative de positionnement du navire de quelques mètres [4] a été mis en œuvre. Les zones d'essais se situent dans le golfe de Gascogne et sont représentées sur la figure 10. Le choix de ces zones a été dicté principalement par des considérations de proximité du

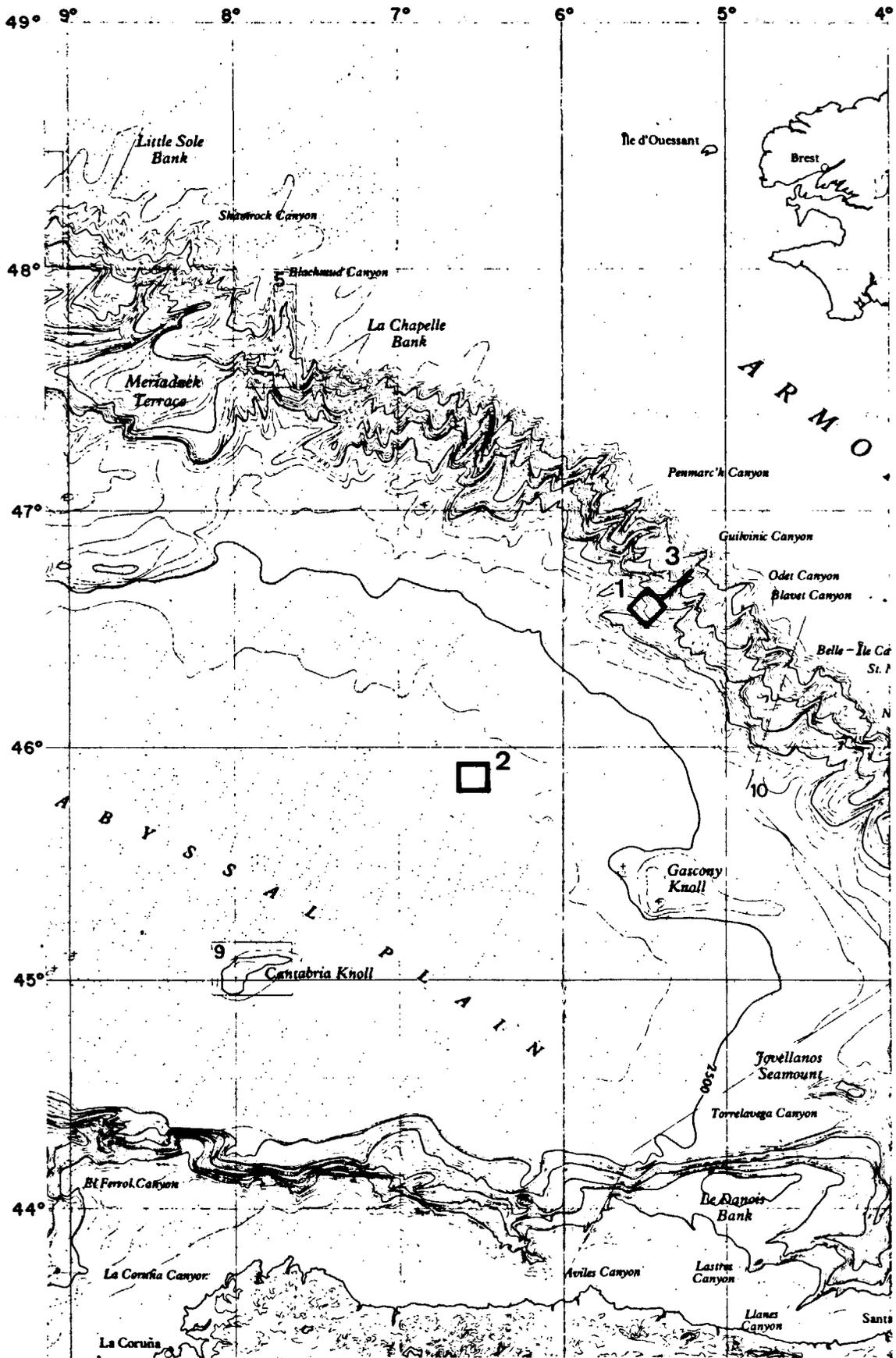


FIG. 10. — Plan de position des zones d'essais du Sea-Beam sur la marge continentale armoricaine : 1, Zone de pente ; 2, Zone plate ; 3, Canyon de Guilvinec. ▽

port d'attache du navire, Brest. De ce choix il découle qu'il n'a pas été possible de tester les limites d'utilisation du système du point de vue de la profondeur, la limite annoncée par le constructeur étant de 12 000 mètres. Il n'aura pas permis non plus de tester le système sur des fonds non couverts de sédiments, comme les dorsales océaniques.

La première zone a été choisie en domaine abyssal (pentes inférieures à 1 : 1 000, profondeur 4 750 mètres). Cette zone a été choisie surtout pour tester la précision ultime des différents faisceaux, leur stabilité et les divers modes de fonctionnement du Sea-Beam (NBES et Echo Processor). Une seconde zone a été choisie sur la pente continentale atlantique (pente allant de 10 à 40 %) par des fonds de 2 500 à 3 700 mètres. Cette zone a été choisie pour tester l'effet de la pente et des structures sur la précision des différents faisceaux. Afin de permettre cette évaluation, une carte bathymétrique de la zone de pente a été dressée en grand détail à partir du faisceau vertical seul avec un espacement des lignes de sondes de 150 mètres. Ces lignes de sondes ont été suivies en direction Nord-Sud à la vitesse de 6 nœuds avec la navigation acoustique pour contrôle. L'intervalle de contour de cette carte est de 20 mètres et l'échelle du document original est le 1/10 000 (fig. 11).

La durée des essais a permis d'effectuer plusieurs sorties avec des états de mer très différents et d'étudier l'effet de ceux-ci sur la qualité des mesures.

### Analyse qualitative

#### *Zone abyssale*

Les premiers essais en plaine abyssale ont fourni des documents que résumant bien les figures 12 (A, B) pour lesquels des intervalles de contour différents ont été choisis (2, 5, 10 mètres). Une inspection rapide de ces documents montre que la résolution du système se situe entre 10 et 15 mètres. En effet, les contours observés ne reflètent pas la topographie du fond qui est parfaitement plat (moins d'un pour mille) mais intègrent de nombreux effets. Tout d'abord les mouvements verticaux de plate-forme (inférieurs à 2 mètres dans le cas présent). Ensuite la précision relative des différents faisceaux qui se dégrade à mesure qu'ils sont plus éloignés de l'axe du navire. Finalement des erreurs systématiques auxquelles correspond par exemple la zone creuse située parallèlement et en-dessous de la ligne médiane de la figure 12 A. L'origine de ces erreurs sera étudiée plus loin et certaines solutions seront apportées pour atténuer leur effet.

#### *Zone de pente*

En vue de comparer les documents contourés en temps réel par le Sea-Beam à la carte bathymétrique établie à partir du faisceau vertical seul (fig. 11), plusieurs montages ont été réalisés comme suit. Les documents de sortie du Sea-Beam (fig. 13) ont été découpés le long de leur ligne médiane (qui représente l'axe du navire), et ces demi-couloirs ont été alignés le long du tracé des routes correspondantes obtenues par la navigation acoustique. Les bandes Sea-Beam ont été alignées en faisant coïncider les repères d'heure qui y sont indiqués avec l'heure correspondante sur le

tracé des routes. Le calage n'a pu être obtenu qu'en un point pour chaque profil car la vitesse utilisée pour le plot Sea-Beam ne correspondait pas exactement avec la vitesse du navire par rapport au fond. En dehors de ce point unique de calage (choisi vers le milieu de chaque profil) il apparaît un décalage par rapport à la position vraie d'autant plus important que la vitesse introduite dans le Sea-Beam s'écarte de la vitesse fond. Il en résulte que les décalages que l'on observe sur les montages sont plus imputables à la navigation qu'à la précision du Sea-Beam, d'où leur valeur purement qualitative.

La figure 14 montre l'assemblage obtenu par alignement et superposition des tracés temps réel du Sea-Beam sur des routes parallèles espacées de 300 mètres représentées en pointillé. Pour les deux routes extrêmes la largeur totale du document original a été maintenue. La figure 15 représente le même assemblage pour des routes espacées de 1 200 mètres. Ce dernier assemblage illustre bien la diminution progressive de la largeur du couloir

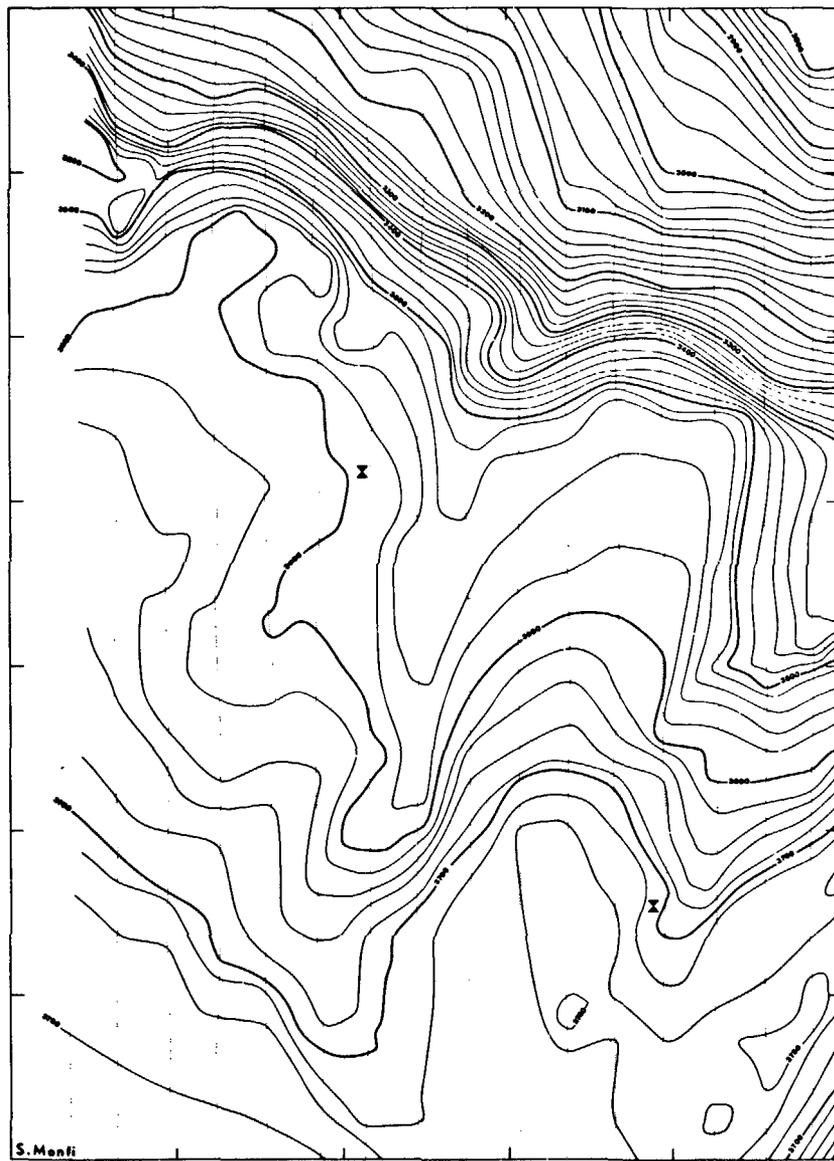


FIG. 11. — Carte bathymétrique de la zone de pente (1 sur figure 10) dressée à partir du faisceau vertical seul avec un espacement entre routes de 150 mètres avec contrôle par balises acoustiques. Une route sur deux figurée. Espacement entre traits du cadre 1 000 mètres.

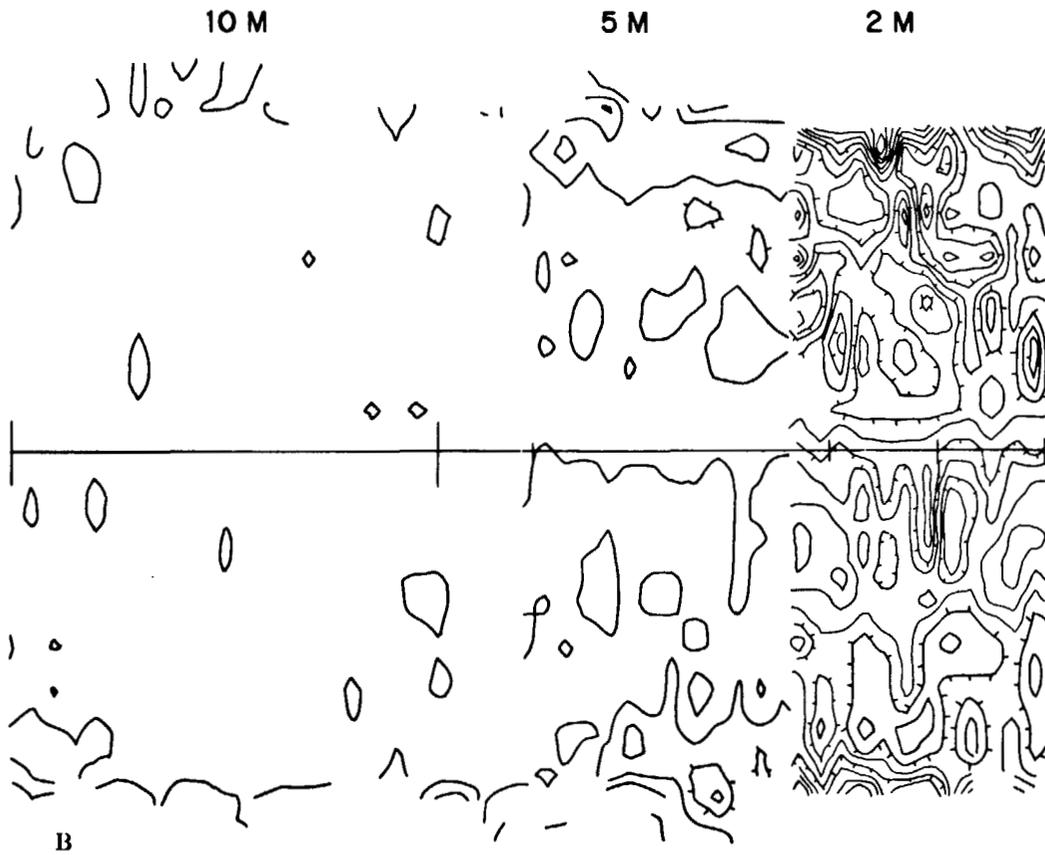
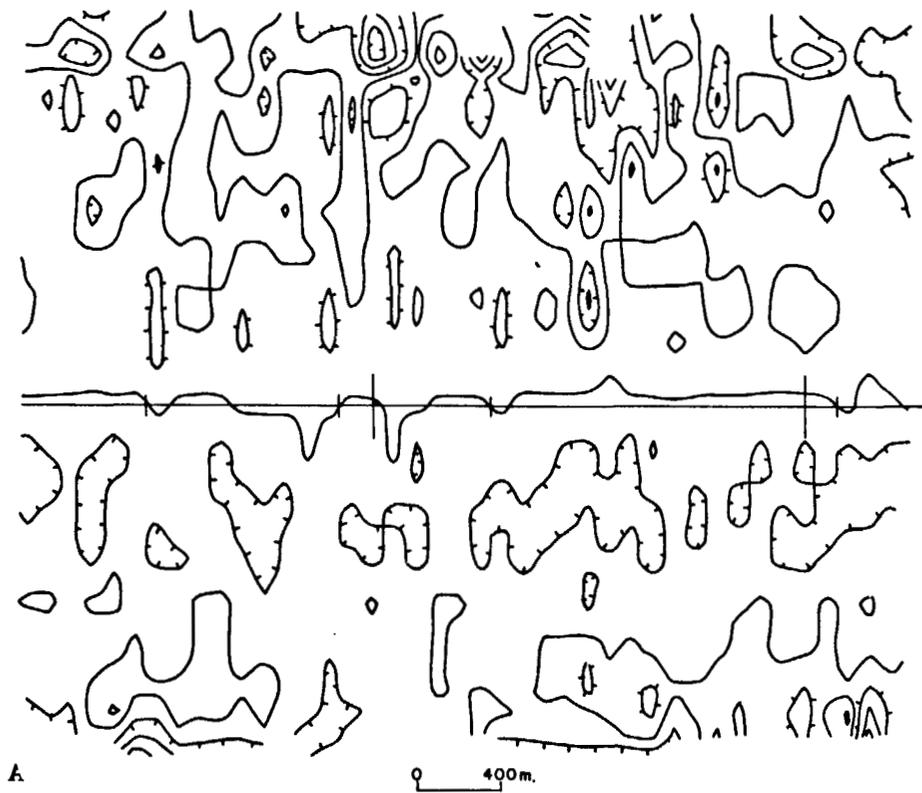


FIG. 12. — Figure obtenue à partir de la sortie en temps réel de contours bathymétriques en zone abyssale pour différents intervalles de contour ; 5 m (fig. 12 A) ; 2 m, 5 m et 10 m (figure 12 B). Echelle originale 1 : 20 000.

570

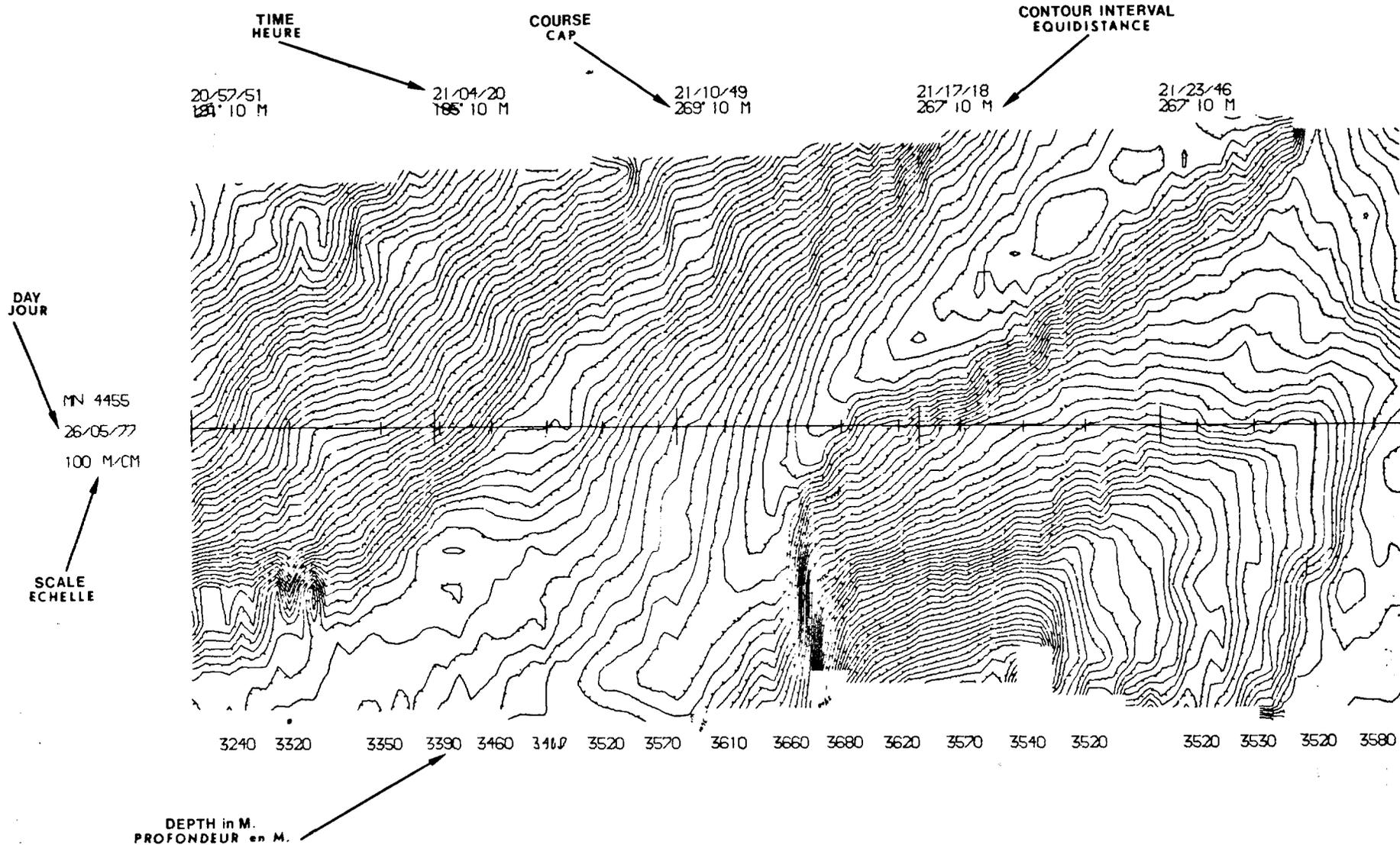


FIG. 13. — Reproduction du document sorti en temps réel par le Sea-Beam sur le traceur de courbes. Marge continentale armoricaine. Intervalle de contour 10 m, échelle originale 1 : 10 000.

survolé en fonction de la diminution de la profondeur. La comparaison de ces assemblages avec la carte obtenue à partir du faisceau vertical seul (fig. 11) démontre de façon qualitative les points suivants :

— Tous les assemblages reproduisent les traits structuraux majeurs de la zone, à savoir dans la partie supérieure l'escarpement WNW-ESE, l'éperon N-S au centre, et dans le coin droit inférieur l'amorce d'un canyon sous-marin NE-SW. Les erreurs dues à l'introduction d'une vitesse estimée et non d'une vitesse fond se font sentir d'autant plus que l'on s'éloigne du point central de calage des bandes Sea-Beam sur le tracé de la navigation. Dans le cas présent, la vitesse estimée était déduite de la navigation acoustique et différait donc peu de la vitesse fond. Seules les variations de la vitesse fond n'ont pu être introduites dans le Sea-Beam. Dans d'autres circonstances lorsque la vitesse estimée sera recopiée à partir d'un loch, par exemple, la différence avec la vitesse fond sera beaucoup plus grande et la juxtaposition des documents temps réel deviendra plus difficile. Ces considérations nous ont amené à résoudre rapidement le problème de l'intégration directe de la navigation avec le Sea-Beam. Une solution pour la navigation océanique intégrant le navigateur par satellite avec un loch doppler par filtrage de Kalman est à l'étude [5], [6].

— La dégradation en précision des faisceaux obliques par rapport aux faisceaux centraux est peu marquée quel que soit l'éloignement du faisceau. La totalité du couloir survolé est donc cartographiée avec une précision voisine et l'on gagne peu à recouvrir de façon importante les zones survolées. Cette quasi constance de précision du Sea-Beam sur toute la largeur du couloir est remarquable et constitue un atout majeur du système.

— La carte bathymétrique dressée avec le faisceau vertical seul (fig. 11) est plus plaisante à l'œil grâce au lissage effectué par la main du cartographe. Cependant des traits structuraux mineurs ont été éliminés par ce lissage. Par exemple, le long de l'escarpement WNW-ESE des variations locales de pente et surtout une série d'orientations E-W visibles sur tous les documents Sea-Beam ont disparu de la figure 11. Ces détails qui ont leur importance pour l'interprétation structurale sont bien visibles en haut du second couloir à partir de la gauche sur la figure 15. Une fonction de lissage est disponible dans le logiciel du Sea-Beam mais n'a pas été utilisée car elle amène à supprimer également des traits structuraux mineurs. Elle est surtout utile en zone plate où elle remplace des lignes de contour trop cassées par des courbes plus harmonieuses.

— La comparaison des montages 14 et 15 avec des profils parcourus en E-W dans la même zone montre que la précision est indépendante du cap du navire.

### Analyse quantitative

#### NBES — Zone plate

##### FAISCEAU VERTICAL

La précision du faisceau vertical a été déterminée sur un relevé de deux heures. La comparaison entre l'enregistrement graphique et le digita-

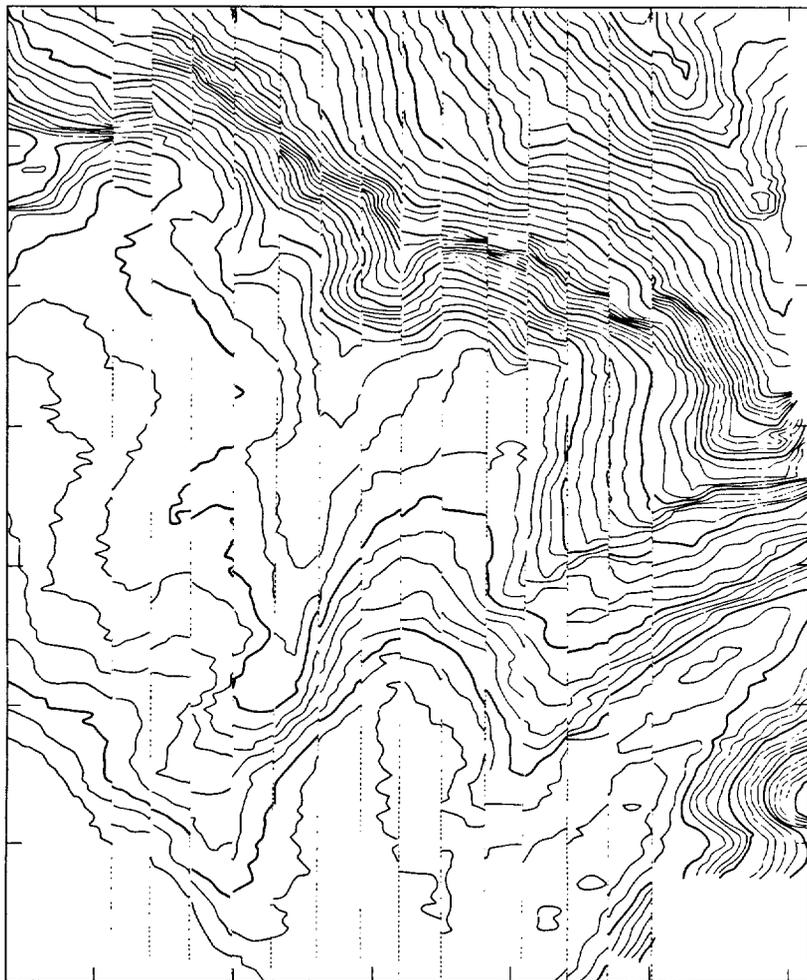


FIG. 14. — Assemblage fait à partir de demi-couloirs survolés et contourés par le Sea-Beam le long de routes N-S (en pointillé) espacés de 300 mètres avec recalage en un point sur le tracé des routes établi par la navigation acoustique. Zone de pente : 1 sur fig. 10.

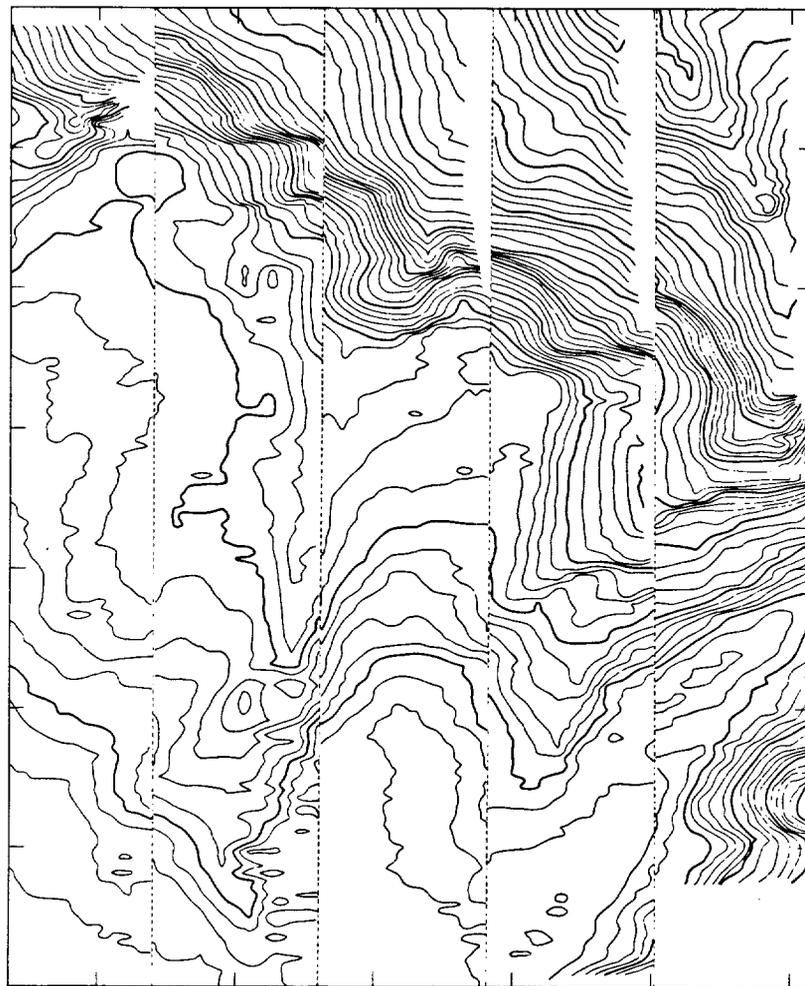


FIG. 15. — Assemblage fait à partir de demi-couloirs survolés et contourés par le Sea-Beam le long de routes N-S (en pointillé) espacés de 1 200 mètres avec recalage en un point sur le tracé des routes établi par la navigation acoustique. Zone de pente : 1 sur fig. 10.

liseur câblé donne un écart quadratique moyen (EQM) de 0,20 mètre. Les mesures de stabilité, comparaison de deux séries de mesures espacées dans le temps, ont été gênées par la présence d'un effet de marée important (4 mètres d'amplitude) qui a été mis en évidence par la comparaison de mesures répétées au cours de plusieurs jours avec la Station Marégraphique de La Rochelle. La déviation standard d'une série de mesures est de l'ordre de 0,65 mètre (par fonds de 4 750 mètres dans la zone d'essais) sans variation notable d'une série à l'autre, après correction de cet effet de marée.

#### FAISCEAU OBLIQUE

La comparaison entre des valeurs discrètes déduites graphiquement de l'enregistreur analogique UGR de chaque faisceau oblique et le faisceau vertical pris pour référence donne les écarts de la table 1.

Table 1

Faisceau	2		3		4		5		6		7	
	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T
Ecart (m)	0	9	-3	-1	-6	15	-7	10	-9	16	-16	-7

Les écarts sont importants et supérieurs à ceux obtenus par l'Echo Processor ainsi qu'il sera montré plus loin.

#### *Echo Processor. — Zone plate*

#### FAISCEAU VERTICAL

La précision donnée sous forme d'EQM entre les valeurs du NBES et celles du digitaliseur software est de 1,62 mètre. Il faut noter cependant que la déviation standard obtenue sur le digitaliseur NBES est très nettement inférieure (0,4 mètre) à celle obtenue par l'Echo Processor (1,67 mètre) comme l'indique la figure 16. L'origine de cet écart est discutée plus loin.

#### FAISCEAUX OBLIQUES

En vue de mesurer la précision des faisceaux obliques, on a utilisé un programme qui donne pour chaque faisceau la moyenne des lectures ainsi que l'EQM en prenant comme référence la profondeur moyenne verticale. Les moyennes ont été faites sur 400 mesures. Les résultats sont donnés dans la table 2 et illustrés sur la figure 17 A et B.

Table 2

Faisceau	1		2		3		4		5		6		7	
	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T
Ecart Moyen	4,0	-2,0	0,0	-2,5	0,0	-1,0	0,5	0,5	2,0	2,0	0,5	2,0	3,5	0,5
EQM	4,5	4,2	5,1	4,6	5,5	5,2	6,9	6,2	8,4	6,1	6,8	6,6	7,7	8,4

*Interprétation*

La figure 17 A montre que l'EQM varie peu avec chaque faisceau alors qu'une erreur croissant linéairement avec l'angle du faisceau était prévue. Les valeurs trouvées pour les faisceaux les plus obliques (4-5-6-7) sont très faibles. Pour le faisceau 6, par exemple, l'on peut calculer que l'écart trouvé incluant toutes les sources d'erreurs possibles (mauvais calage des bases, défaut de verticalité des transducteurs, imprécision du traitement, ...) correspond à un décalage angulaire d'un quart de degré. Par contre, les valeurs proches du faisceau vertical (1, 2, 3) ne sont pas aussi bonnes que prévues. Les raisons de ces anomalies sont discutées plus loin. La figure 17 B donne les écarts moyens ou erreurs systématiques pour chacun des faisceaux. Celles-ci restent faibles sur tous les faisceaux à l'exception du faisceau 1 babord (4 mètres) et dans une moindre mesure des faisceaux 1 et 2 tribord. Une correction systématique a été introduite pour annuler ces décalages et améliorer ainsi la précision des faisceaux centraux en attendant de trouver la cause de ces décalages. La figure 17 C illustre un phénomène curieux

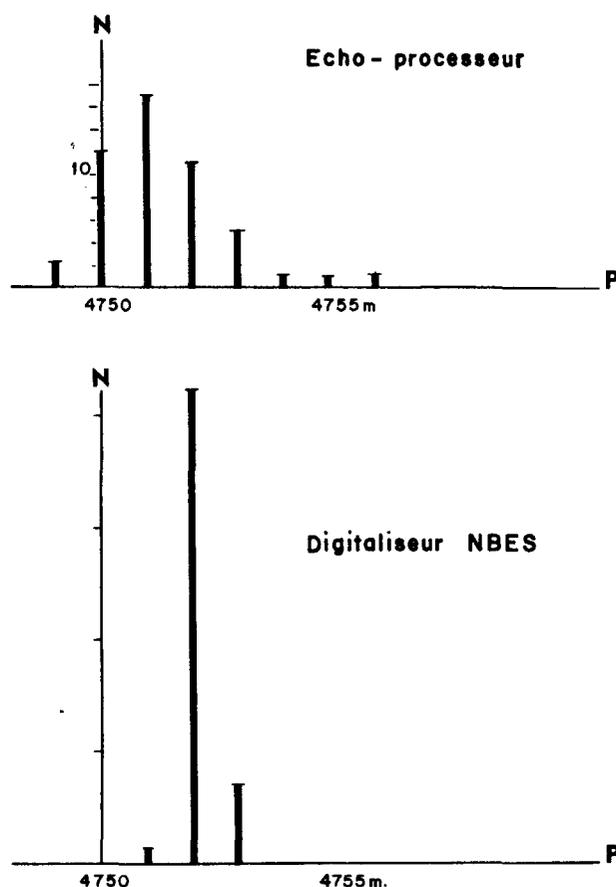


FIG. 16. — Comparaison entre la digitalisation hard du NBES et soft de l'Echo Processor du faisceau vertical. Histogrammes du nombre d'interrogations en fonction de la profondeur obtenue.

observé sur toutes les mesures faites en zone plate. Les deux courbes se rapportent à la même route parcourue une seconde fois à cap inverse. Si l'EQM des faisceaux centraux est peu affecté par le cap du navire, il n'en est pas ainsi des faisceaux extérieurs. L'on a pu mesurer pour une incidence

SEA-BEAM, SONDEUR MULTI-FAISCEAUX

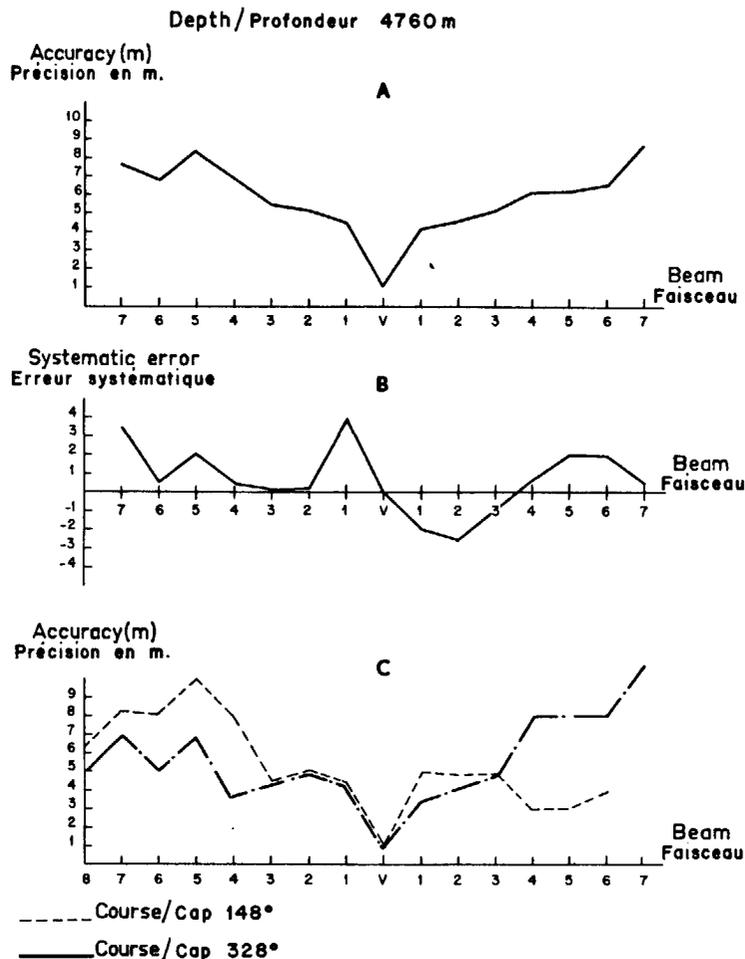


FIG. 17. — Résultats de précision en zone plate : A, Ecart quadratique moyen des différents faisceaux ; B, Erreur systématique des différents faisceaux ; C, Précision (EQM) en fonction du cap.

donnée des faisceaux une variation importante (— 10 dB) du coefficient de réverbération du fond selon le gisement des faisceaux. La diminution de l'énergie reçue diminue la précision des résultats et il en résulte des variations d'EQM de plusieurs mètres. Les routes suivies étaient parallèles à la pente du glacis continental et il n'est pas exclu que l'effet observé soit dû à la structure des sédiments superficiels ou à l'effet de courants (ripple-marks).

La figure 18 donne la répartition des valeurs obtenues sur 35 interrogations effectuées au cap 148°. L'on aperçoit clairement l'asymétrie dans la distribution des sondes entre les faisceaux babord et tribord. Cette figure 18 montre également que si l'on ne considère que des valeurs discrètes (et non des moyennes ou des EQM) les écarts par rapport au faisceau vertical peuvent atteindre plus de  $\pm 10$  mètres même pour les faisceaux proches du vertical, ce qui est également illustré par la Table 1. L'on voit donc que le traitement par l'Echo Processor d'un grand nombre de données (en moyenne une interrogation toutes les 6 secondes) crée un filtrage statistique des valeurs les plus aberrantes et augmente ainsi la précision du système. Il s'ensuit que sur de fortes variations de pente, il y aura intérêt à ralentir la vitesse du navire pour bénéficier de ce traitement statistique des données et garder une précision élevée. La figure 12 illustre l'effet de ces variations sur

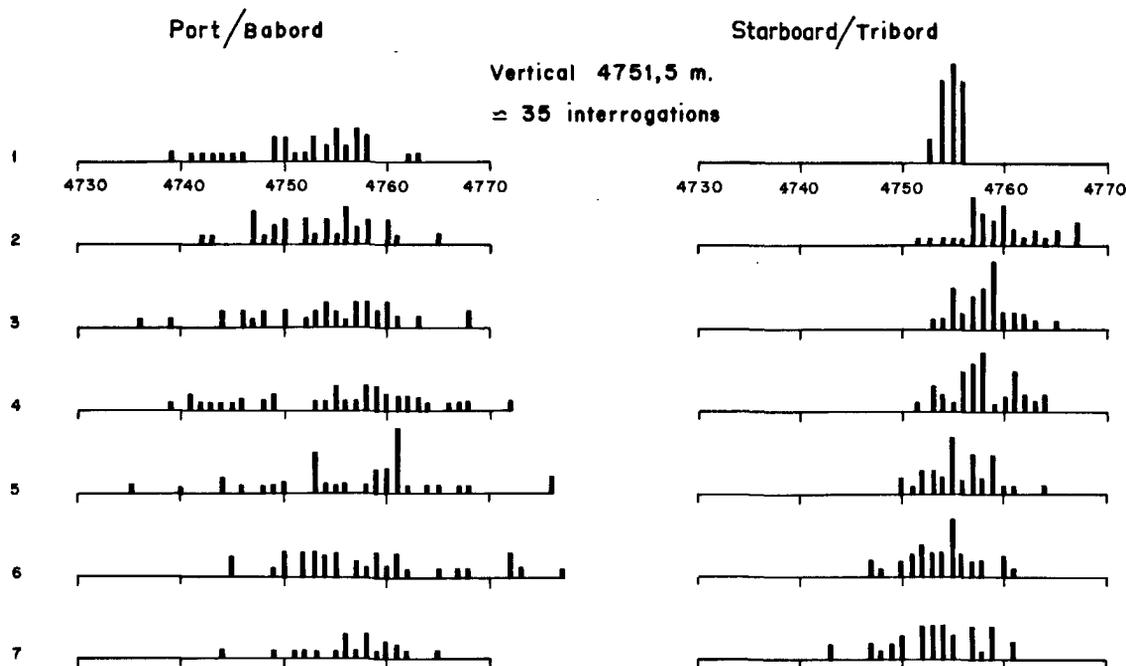


FIG. 18. — Répartition des profondeurs obtenues en zone plate sur 35 interrogations pour les différents faisceaux.

les contours bathymétriques fournis par le Sea-Beam. La variance plus élevée des faisceaux babord au cap 148° engendre une figure plus bruitée. L'erreur systématique sur les faisceaux 1 babord et tribord est responsable du creux observé tout le long de la route sur tribord et de la partie légèrement surélevée sur babord.

*Inclinaison*

En vue de mettre en évidence d'éventuelles erreurs de stabilisation une inclinaison de 5° a été donnée au navire par ballastage. Cette inclinaison a permis d'obtenir des faisceaux d'ordre supérieur sur babord (8, 9) au détriment de faisceaux tribord (7, 8). Les EQM résultants sont donnés dans le tableau 3.

Table 3

Faisceau	1		2		3		4		5		6		7		8		9	
	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T
EQM	3,2	6,7	7,8	5,0	8,1	6,0	6,1	6,4	5,9	7,1	7,3	7,1	6,1	...	7,5	...	10,7	...

Ainsi que l'indiquent les résultats très voisins des valeurs précédentes, aucune erreur de stabilisation n'est mise en évidence.

*NBES. — Zone de pente*

Quatre lignes (2 N-S espacées de 1 000 mètres et 2 E-W également espacées de 1 000 mètres) ont été parcourues à la vitesse de 4 nœuds sous contrôle de la navigation acoustique. Une comparaison quantitative des

données des faisceaux obliques avec la carte bathymétrique de référence (fig. 11) étant assez laborieuse, seules trois de ces lignes ont été dépouillées. Elles ont été choisies sur des pentes moyennes de 0-15 % pour lesquelles GIC s'engageait contractuellement à garantir certaines performances. Les valeurs brutes, différences entre les faisceaux obliques et la sonde verticale prise au même endroit sur la carte bathymétrique, sont présentées graphiquement sur la figure 19, pour les trois profils. Les EQM correspondants sont illustrés figure 20. Les graphiques des figures 19 et 20 donnent des indications sur la précision en zone de pente, pente moyenne de 10 % avec des maxima locaux allant à 40 %.

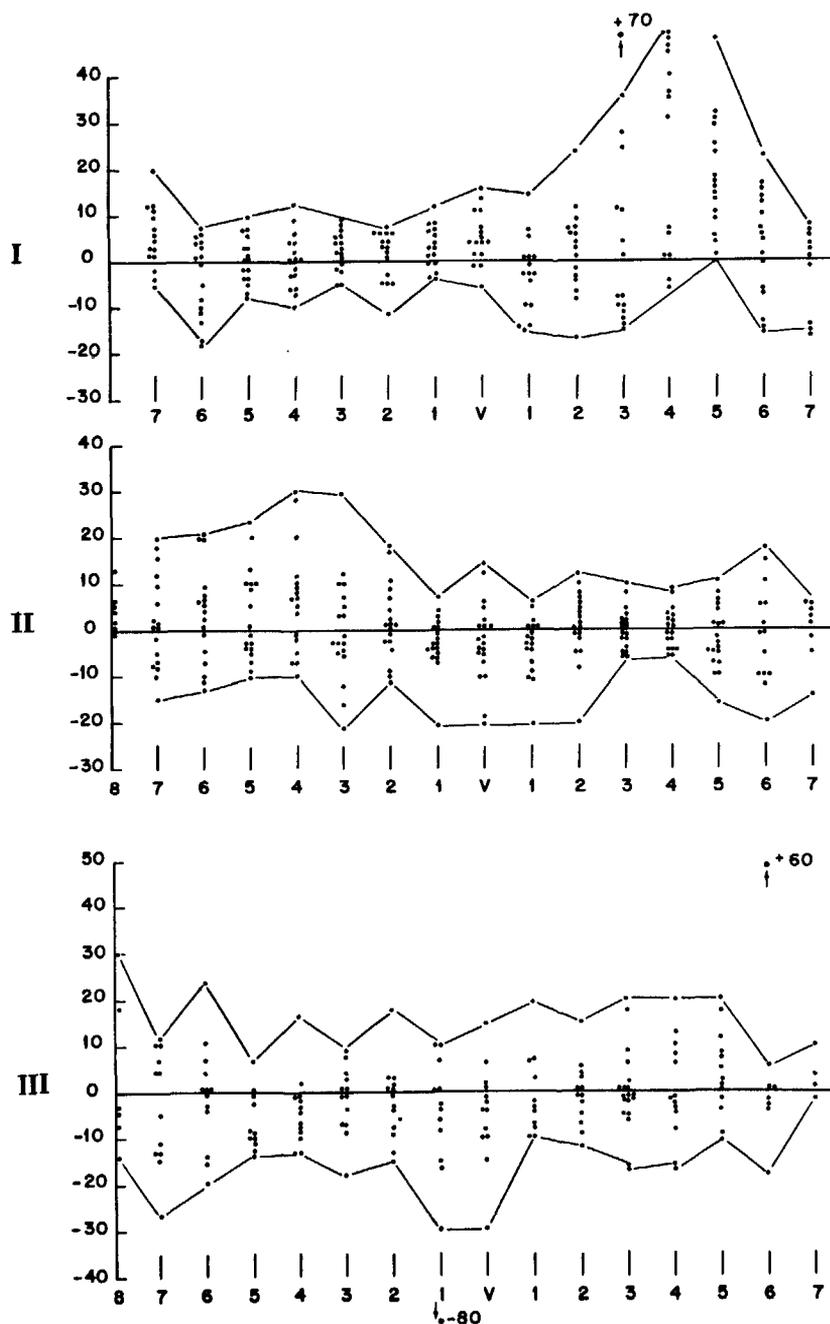


FIG. 19. — Zone de pente : écarts en mètres entre faisceaux obliques et vertical sur trois profils I, II et III.

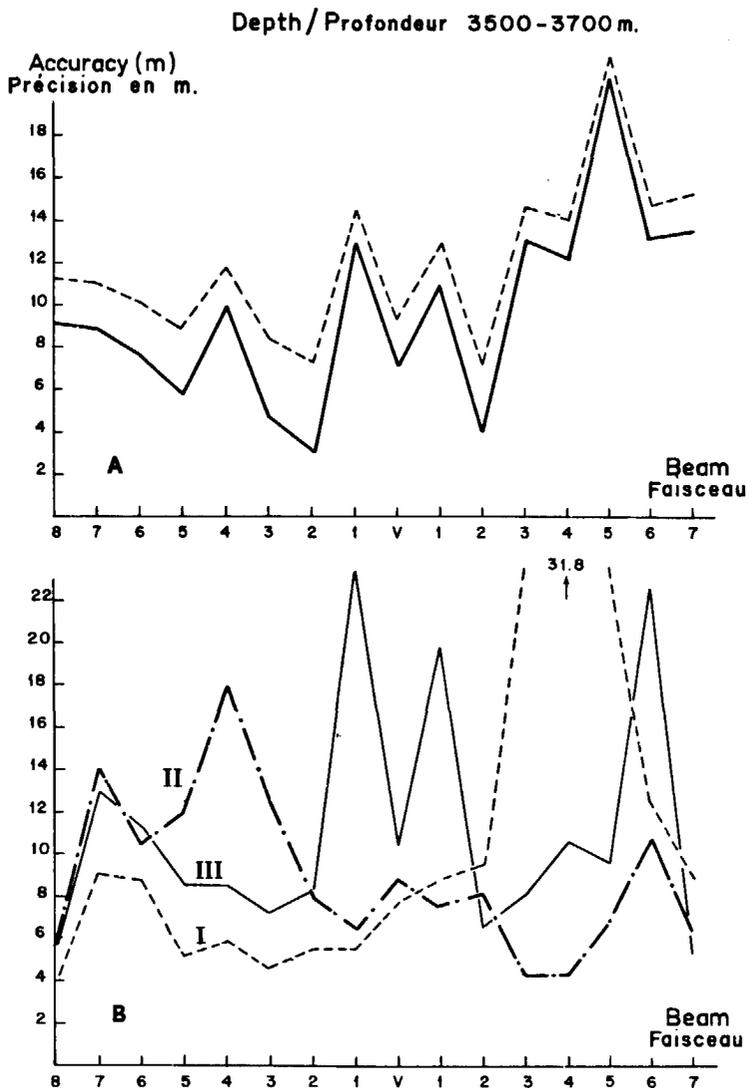


FIG. 20. — Zone de pente : A, EQM des différents faisceaux corrigé de la variance du faisceau vertical pour les trois profils I, II et III ; B, EQM pour chacun des trois profils séparément.

La courbe A de la figure 20 donne en pointillé l'EQM entre la carte et les faisceaux obliques et en trait fort le même écart corrigé de la variance du faisceau vertical pour les trois profils réunis. Les constatations suivantes peuvent être faites : la précision moyenne sur tous les faisceaux est de l'ordre de 10 à 15 mètres. Cependant la répartition est beaucoup moins homogène que sur fond plat ; les faisceaux 3, 4 et 5 tribord donnent des écarts très forts sur le parcours I comme l'indiquent les figures 19 I et 20 B. Une analyse détaillée montre que ces écarts apparaissent lorsque le fond a des formes particulières. Ainsi pour élucider les anomalies observées sur les faisceaux 3, 4, 5 de la ligne I, sept cycles d'interrogation choisis dans des conditions précises ont été dépouillés en détail. Pour ces 7 interrogations le tableau 4 donne les écarts entre les faisceaux obliques et le vertical ainsi que les pentes calculées à partir des contours Sea-Beam. L'on retrouve sur le faisceau 4 un EQM élevé (28 m). Les valeurs les plus élevées apparaissent lorsque la pente est la plus forte (cas 4 et 7).

Table 4

Interrogations	Écart entre la carte et la valeur donnée par le SEA-BEAM							
	N° du faisceau babord							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1 7 %	+14 20 %	-2 5 %	-20 10 %	+4 15 %	21 10 %	2 10 %	9 10 %
2	+1	+15	1	-19 10 %	+15 18 %	9 10 %	3 20 %	8 15 %
3	+5	+2	-1	+47 12 %	+12	6	-6	-7
4	-4	-12	23	+31 40 %	+24	17	-7	-10
5	-6	+5	16	+3 10 %	+6	11	-16	3
6	9	10	16	+5 8 %	+2	1	-5	0
7	0	-15	0	+42 40 %	+37	5	-17	-

Si l'on enlève les cas les plus défavorables, l'EQM retombe à 18 mètres. Il demeure cependant qu'en dehors des pentes fortes, les écarts restent élevés (cas 1, 2, 3) alors que sur les autres profils II et III ou en d'autres points du même profil ce phénomène n'apparaît pas. En fait ces écarts élevés se situent tous au sommet de l'éperon arrondi de direction N-S. Cette morphologie particulière est telle que les temps d'arrivée des faisceaux 1-2-3-4 sont quasi groupés. De plus la réflexion spéculaire reste assez proche du faisceau 4. Les variations très fortes qui sont observées sont probablement dues à ce concours de circonstances assez peu fréquent ainsi qu'à la difficulté d'éliminer la réflexion spéculaire liée aux lobes secondaires. Il faut aussi souligner que le mode de fonctionnement utilisé pendant ces mesures qui résultait en une cadence d'interrogation moitié de la cadence normale n'aura pas permis un fonctionnement optimum des portes de réception.

La figure 21 illustre bien le problème créé par la forte différence de niveau entre l'énergie spéculaire et l'énergie réverbérée. La figure montre les contours Sea-Beam obtenus sur deux routes parallèles intersectant un canyon sous-marin. Sur la route supérieure aucun problème n'apparaît malgré des pentes atteignant 100 %. Sur la route inférieure, cependant, la présence d'une ride B parallèle à la route du navire crée des mauvaises arrivées au-delà de cette ride ainsi que le montre la figure. L'analyse du phénomène montre que la ride a pour effet d'avancer dans le temps les arrivées des faisceaux obliques à tel point que leur temps de parcours

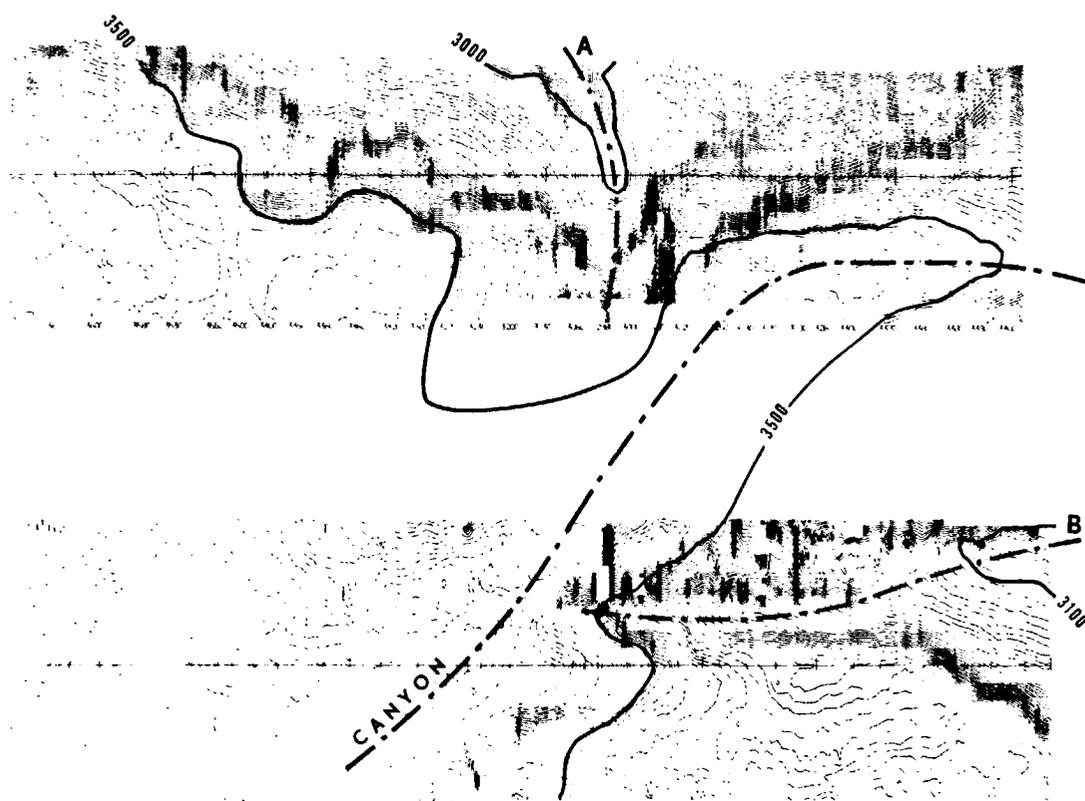


FIG. 21. — Contours obtenus sur deux routes parallèles intersectant un canyon. La présence d'une ride B provoque des erreurs au-delà de cette ride sur la route inférieure.

croise, puis devance, celui du faisceau vertical à forte énergie réfléchi, le recroise ensuite pour enfin le dépasser pour les faisceaux les plus obliques. Il en résulte que les faisceaux obliques ne peuvent pas distinguer cette forte énergie réfléchi reçue dans leurs lobes secondaires de la faible énergie réverbérée dans leur lobe principal et que le système littéralement mélange les faisceaux. La situation est cependant assez exceptionnelle et n'a pu être découverte qu'après une étude d'une grande quantité de documents.

*Comparaison avec faisceau large*

La figure 22 illustre le profil bathymétrique obtenu le long de la route inférieure de la figure 21, avec un système à mono-faisceau large (45°). La présence d'un canyon ne peut être déduite de cet enregistrement. Les pentes sont très atténuées et les échos multiples ne permettent pas de déterminer précisément la sonde à l'aplomb du navire. Le profil ne fournit aucune

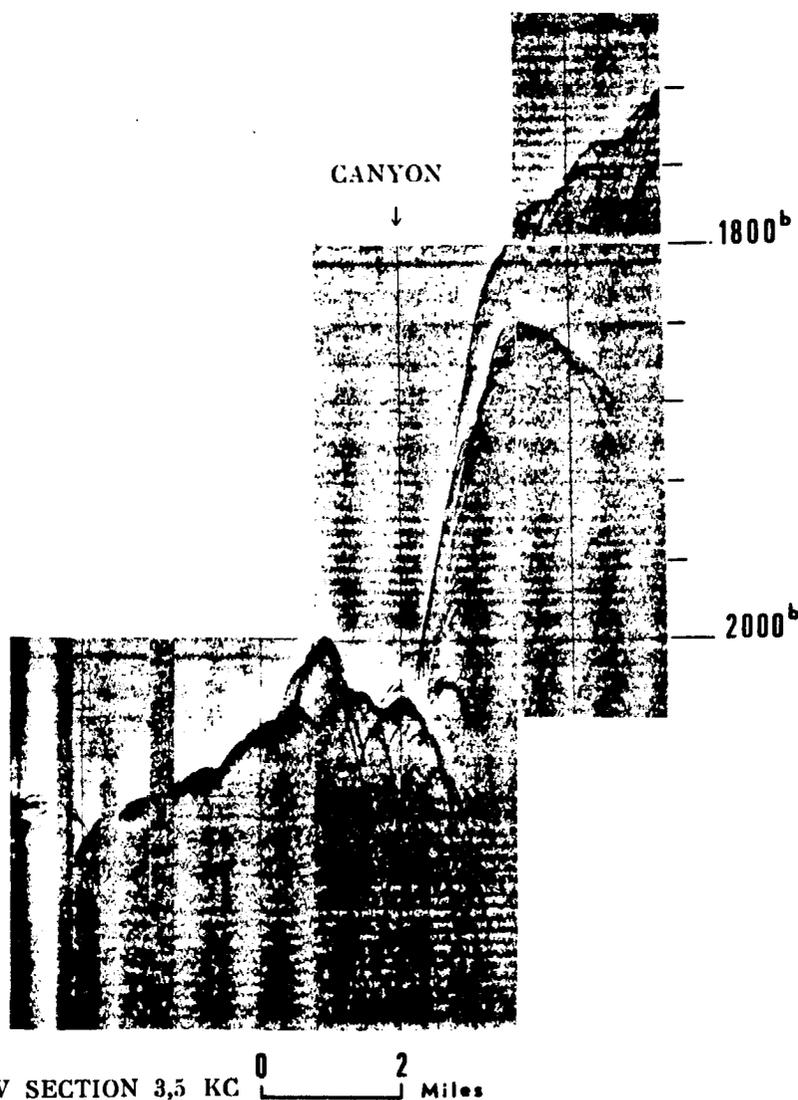


FIG. 22. — Profil du canyon le long de la route inférieure de la figure 21 avec un système à faisceau large (45°).

indication sur l'orientation du canyon contrairement à la figure 21. La comparaison de ces deux figures 21 et 22 illustre de façon très éloquente les avantages du Sea-Beam.

### *Petits fonds*

Bien que le Sea-Beam soit mal adapté pour travaux par petits fonds, quelques essais ont été effectués sur le plateau continental armoricain ainsi que dans la fosse d'Ouessant. Il en découle que deux situations peuvent se présenter :

1°) Lorsque le coefficient de réverbération est élevé par rapport à celui de réflexion, on obtient une bonne précision de l'ordre de 0,5 m EQM. Tel est le cas du relevé dans la fosse d'Ouessant dont la figure 23 montre quelques contours.

2°) Lorsque le coefficient de réverbération devient faible devant celui de réflexion, la séparation des lobes secondaires devient difficile et la précision n'est plus que de 2 à 3 mètres EQM, ce qui est insuffisant pour les relevés détaillés sur le plateau. Cette faible précision provient de la longueur d'impulsion à l'émission trop importante (7 ms), et du pas d'échantillonnage trop important (3,3 ms) lors de la digitalisation des échos.

De plus, par petits fonds la largeur du couloir survolé devient faible et il devient impératif de disposer d'une navigation de haute précision. La société GIC commercialise un système à multi-faisceaux mieux adapté que le Sea-Beam pour travaux par petits fonds, le Bo'sun [7].

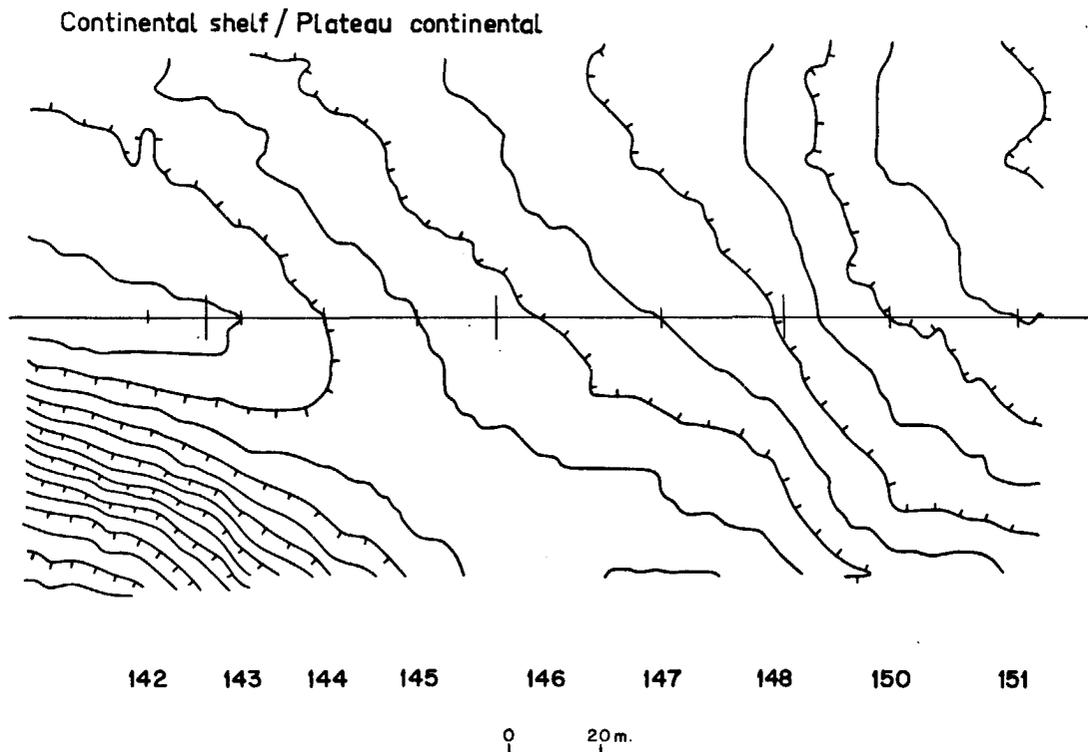


FIG. 23. — Figure obtenue à partir de lignes de niveau tracées en temps réel par le traceur de courbes sur le plateau continental, fosse d'Ouessant ; intervalle de contour 1 mètre ; échelle originale 1 : 1 000.

*Influence de la vitesse*

Les essais se sont déroulés à différentes vitesses du navire allant de l'arrêt à la vitesse maximum (13,8 nœuds). Un relevé dans la zone plate effectué à 13,3 nœuds donne les EQM de la table 5.

Table 5

Faisceau	1		2		3		4		5		6		7		8	
	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T
EQM	4,5	5,4	7,1	4,1	5,4	5,1	5,0	5,1	5,0	8,9	6,3	7,1	6,3	9,1	7,1	8,6

La vitesse ne semble pas avoir d'influence directe sur la précision du système. L'augmentation du bruit hydrodynamique reste faible devant le bruit ambiant. D'autre part, la diminution du nombre de données à cycle d'émission constant en fonction de la distance suite à une augmentation de la vitesse ne se traduit pas par une détérioration sensible des lignes de contour obtenues. Par grand fond (6 000 m) à 10 nœuds la distance parcourue entre deux interrogations est inférieure à 50 mètres, ce qui reste encore bien inférieur à la distance entre les faisceaux du Sea-Beam (environ 300 m par 6 000 mètres). Ainsi, la densité des données le long de la route du navire sera toujours supérieure à la densité latérale même aux vitesses maxima. Ceci reste valable quelle que soit la profondeur, puisque à profondeur moindre, la cadence d'interrogation augmente proportionnellement.

*Influence de l'état de la mer*

L'état de la mer est un facteur déterminant dans le bon fonctionnement du Sea-Beam. L'élément critique semble être l'apparition de bulles d'air qui masquent les transducteurs d'émission et de réception. Ces bulles d'air apparaissent lorsque le navire déjauge de façon importante, ce qui se produit plus facilement face à la lame qu'en fuite. Face à la lame, l'état de mer limite de travail est environ mer quatre, tandis qu'en fuite les conditions de travail sont acceptables jusqu'à mer six. Le masque d'air sous les transducteurs d'émission empêche l'énergie d'être transmise et dès lors la détection s'effectue sur le bruit ambiant, ce qui donne des valeurs aberrantes. Par contre, si le masquage n'est que partiel, l'énergie reçue n'est plus directionnelle, ce qui donne également des valeurs fausses. Le test sur l'énergie reçue pour éliminer les valeurs aberrantes n'est dès lors valable que lorsque aucune énergie n'est émise. Par contre, lorsque l'énergie reçue n'est plus directive, seul un contrôle de la cohérence des résultats pourrait améliorer les résultats. Ce contrôle n'existe pas dans le système actuel.

*Grande profondeur*

Le système est donné pour des profondeurs allant jusqu'à 12 000 mètres. La profondeur maximale d'utilisation a été 7 600 mètres (fosse de la Romanche) sans relever aucune anomalie de fonctionnement.

## RÉSULTATS TECHNIQUES

## Directivité des transducteurs

*Emission*

Le principe de mesure adopté a été le suivant : un hydrophone positionné par un transpondeur relais en liaison avec un champ de balises acoustiques [2] est descendu en profondeur par l'intermédiaire d'un câble conducteur. Le navire est manœuvré de telle manière que l'hydrophone décrive un arc de cercle dans le plan vertical longitudinal du navire. Le signal reçu est amplifié et transmis au navire. Le diagramme d'émission mesuré est donné figure 24. Les observations suivantes peuvent être faites : 1° La directivité du lobe principal calculée à 3 dB d'atténuation est de 2,9° contre 2,66° annoncé par le constructeur. L'écart est donc faible compte tenu des imprécisions du relevé ; 2° Les lobes secondaires sont plus forts de 4 à 5 dB par rapport aux valeurs annoncées. C'est ainsi qu'aux angles de 4°, 8°, 22° on relève des atténuations de 23 dB environ ; 3° Le lobe image relevé entre 54° et 58° possède une atténuation assez faible de 10 dB.

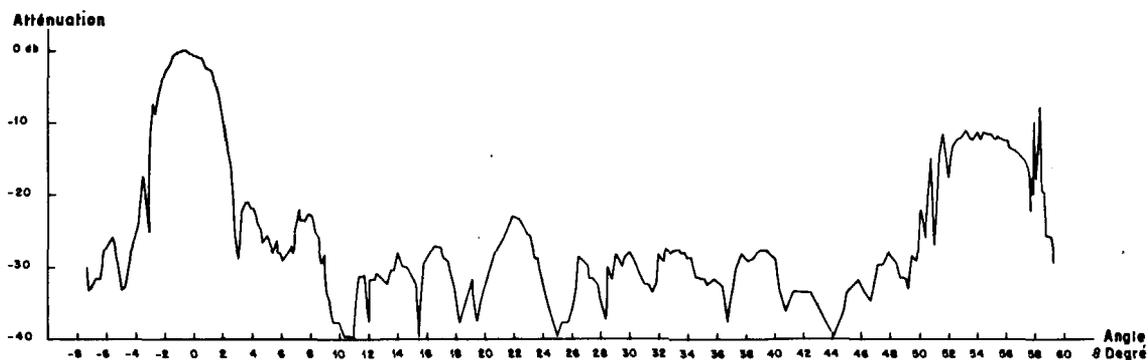


FIG. 24. — Diagramme d'émission du Sea-Beam, atténuation en fonction de l'angle.

*Réception*

Le principe de la mesure a été le suivant : un pinger émettant à la fréquence exacte du Sea-Beam (12 157 Hz) est descendu à une profondeur de 2 000 mètres et positionné par un transpondeur relais en liaison avec un champ de balises acoustiques. Le navire est manœuvré de telle façon à faire décrire au pinger un arc de cercle dans un plan transversal, intersectant ainsi chaque faisceau de réception. Les mesures ont été faites non pas sur les faisceaux directs car cela aurait nécessité un roulis nul mais sur les faisceaux « stabilisés » du récepteur NBES. Les résultats pour le faisceau vertical sont donnés sur la figure 25. La directivité obtenue est légèrement moins bonne qu'à l'émission (3,4°) ; par contre, les lobes secondaires sont mieux atténués (— 28 dB). Un seul faisceau oblique a été mesuré (faisceau 4) et les résultats sont donnés sur la figure 26. La directivité est de 3,4°. Une dissymétrie apparaît dans la forme du lobe principal qui peut être attribuée à la forme en V du transducteur de réception (fig. 3). Les lobes secondaires sont faibles.

*Niveau d'émission*

Le niveau d'émission mesuré, ramené à un mètre est de 130,1 dB.

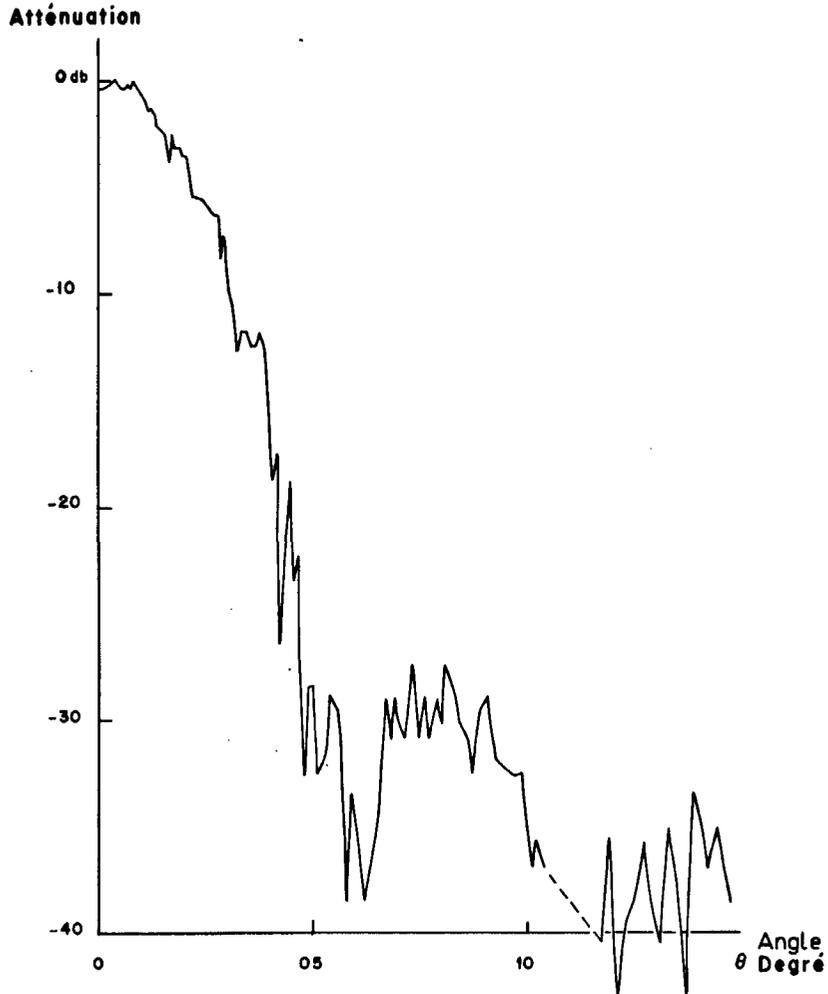


FIG. 25. — Diagramme de réception du faisceau vertical, atténuation en fonction de l'angle.

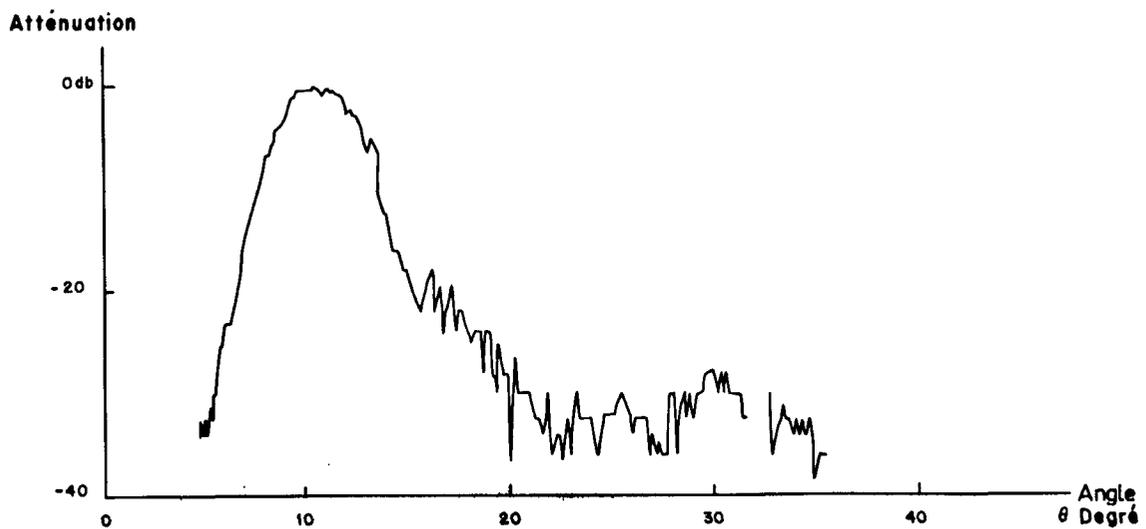


FIG. 26. — Diagramme de réception du faisceau 4, atténuation en fonction de l'angle.

## ÉVALUATION DU SYSTÈME

Les essais et mesures obtenus avec le Sea-Beam ont confirmé la validité des techniques retenues par le constructeur. Les résultats sont en tous points supérieurs à ceux escomptés au départ. Quelques critiques peuvent cependant être faites.

**Hardware**

La figure 16 montre la supériorité du digitaliseur hard par rapport à la solution soft. L'on peut dès lors penser qu'une certaine amélioration est possible, entre autres en ce qui concerne la dynamique du système et le pas de digitalisation.

*Dynamique*

Le digitaliseur analogique-digital possède une certaine dynamique. Il doit être placé dans les meilleures conditions de fonctionnement, ce qui est assuré par le TVG (gain variable en fonction du temps). Le gain doit être assez fort pour digitaliser avec précision l'énergie faible réverbérée, pas trop fort pour éviter la saturation sur l'énergie spéculaire. La dynamique actuelle est de 72 dB et semble insuffisante ; l'obligation de respecter la non-saturation entraîne une perte de précision sur la digitalisation de l'énergie réverbérée. Ce point semble être l'un des plus critiques du système.

*Pas de digitalisation*

Le pas de digitalisation de chaque voie est de 3,3 ms. Ce pas est un peu faible et crée un bruit équivalent à une profondeur de 1 à 2 mètres (fig. 16).

**Software**

Le cœur du Sea-Beam est son logiciel qui permet d'exploiter au mieux les signaux délivrés par le NBES. L'un des points les plus délicats du traitement semble être la détection et l'élimination des lobes latéraux car l'énergie spéculaire est souvent très forte devant l'énergie réverbérée. Pour un faisceau donné la méthode utilisée semble efficace lorsque les deux énergies sont bien séparées dans le temps. Dans le cas contraire, c'est-à-dire soit par petits fonds, soit dans certains contextes morphologiques comme ceux rencontrés dans la table 4 et la figure 21, la séparation est mal effectuée et entraîne des erreurs appréciables.

**Documents de sortie**

Les essais du Sea-Beam ont démontré le grand intérêt des documents obtenus sur le traceur de courbes. Deux améliorations en augmenteraient la qualité. Tout d'abord, la vitesse du navire est, dans la version actuelle,

introduite manuellement et ne peut dès lors refléter qu'une vitesse moyenne estimée. Un couplage direct de la vitesse du navire au système permettrait d'en suivre toutes les variations quelle qu'en soit l'origine. Cette vitesse dérivée d'un loch serait cependant différente de la vitesse fond et l'échelle du tracé sera incorrecte dans le sens longitudinal du navire. L'adjonction d'un système de navigation intégrée est souhaitable car il fournirait une information vitesse plus proche de la vitesse fond que le loch. Ensuite une intégration directe de la navigation avec le Sea-Beam permettrait de sortir les contours bathymétriques le long de la route estimée du navire directement sur projection en coordonnées géographiques [8].

Pour pallier le manque de navigation précise, le maintien d'un chevauchement d'un couloir survolé sur l'autre et le suivi de quelques routes croisées permettent d'assembler les cartes bathymétriques à la manière d'une mosaïque, à partir des contours temps réel.

L'erreur de positionnement longitudinal due à l'introduction d'une vitesse différente de la vitesse fond résulte en une déformation longitudinale des contours bathymétriques. Cette déformation n'est cependant jamais très importante (inférieure à 10 %). Les pentes ainsi que les orientations des structures survolées lues sur le document Sea-Beam ne s'éloignent donc que peu de la réalité. Dans le contournage en temps réel actuel, les sondes sont rapportées perpendiculairement à la ligne médiane du plotter. Cette ligne médiane diffère de la route vraie du navire de deux façons : 1° Le cap instantané du navire dû au louvoyage du navire ; 2° La dérive du navire, différence entre route « gyro » et route vraie. Ces déviations avec la route vraie du navire font que le contournage subira des distorsions d'autant plus gênantes que les déviations sont importantes (présence de forts courants de surface et de vent assez fort). Seul un contournage utilisant l'orientation exacte du navire au moment de l'émission Sea-Beam par rapport à la route-fond calculée à partir des points satellites ou autre système de navigation intégrée, pourra éliminer ces distorsions.

Dans l'état actuel des choses, ce contournage ne pourra se faire qu'en temps différé. Les contours temps réel sont donc d'une précision assez variable fonction des paramètres influençant la navigation (état de la mer, force du vent, courants). L'obtention d'un contournage temps réel couplé à un système de navigation intégrée est à l'étude chez GIC. Une autre limitation du contournage temps réel provient de la méthode même adoptée pour ce contournage. Le contournage est fait à partir des valeurs interpolées aux intersections d'une grille régulière de pas de 0,5 cm. Le nombre de valeurs de sonde utilisé pour cette interpolation variera donc en fonction de l'échelle choisie, et de la vitesse du navire. Ce pas constant de grille force donc l'utilisateur à travailler à l'échelle la plus grande possible, en vue d'éviter un filtrage des données et d'utiliser de ce fait la plage maximum du traceur de courbes. L'échelle du 1 : 25 000 semble bien convenir au-delà de 4 000 mètres sans perte d'information notable due au contournage. Le 1 : 10 000 est mieux adapté aux profondeurs supérieures à 2 000 mètres, le 1 : 5 000 au-delà de 500 mètres et le 1 : 1 000 sur le plateau continental. D'un point de vue pratique, ces échelles sont trop grandes et amènent l'utilisateur à réduire ces documents en vue d'assemblage en mosaïque, en attendant le rejeu des données en temps différé.

## UTILISATION DU SEA-BEAM

Le Sea-Beam offre de nouvelles perspectives dans le domaine du relevé bathymétrique tant pour les études de reconnaissance que pour les relevés systématiques de cartographie. L'avantage décisif du Sea-Beam sur les techniques mono-faisceau est qu'il offre l'équivalent de 16 routes mono-faisceau parallèles et ce sans besoin impératif de navigation précise. Ces routes espacées de 10 mètres environ sur le plateau continental à 300 mètres par 6 000 mètres de fond, ne pourraient être suivies que moyennant un système de positionnement très précis tel un champ de balises acoustiques. Le temps requis pour un tel relevé serait au moins seize fois supérieur à celui d'un seul passage Sea-Beam. De plus l'implantation d'un champ de balises ou de plusieurs vu leur portée limitée (10 à 15 km) en augmenterait encore la durée. C'est pour ces raisons que peu de relevés détaillés ont été effectués à ce jour [9]. Le Sea-Beam permettra d'effectuer ce type de relevé de façon routinière.

### Relevé sur route isolée

Les données Sea-Beam récoltées sur des trajets isolés se sont révélées très profitables. La mesure systématique des orientations des structures à partir des contours Sea-Beam permet de mettre en évidence le style tectonique des régions survolées, et de conclure à une appartenance océanique (dorsales, zones de fracture, monts sous-marins) ou continentale (dômes de sel, marges effondrées, canyons, ...).

### Relevé de reconnaissance

Le Sea-Beam permet de reconnaître rapidement les zones d'étude sans nécessiter une couverture bathymétrique complète. A titre d'exemple, un canyon de la marge continentale armoricaine (fig. 27) a été suivi vers la fin de la période d'essais du Sea-Beam [10]. Ce relevé fut fait à 10 nœuds en pilotant le navire à partir du Sea-Beam de telle manière à centrer le navire sur l'axe du canyon. La navigation étant fournie par le Decca, tous les changements de cap ont pu être enregistrés de façon continue. L'orientation du canyon varie de 340° au 140°. Comme les changements de cap déforment les lignes de contour, il est clair que le document obtenu n'a pas valeur cartographique. Plusieurs traits remarquables de ce canyon ont cependant pu être relevés. De plus la connaissance de son parcours au travers de la marge continentale et de ses pentes peut servir de base à une étude plus détaillée, telle que dragage ou carottage.

### Relevé cartographique détaillé

Les figures 14 et 15 illustrent bien les possibilités du Sea-Beam pour la cartographie détaillée en présence d'un système de navigation précis (2 à

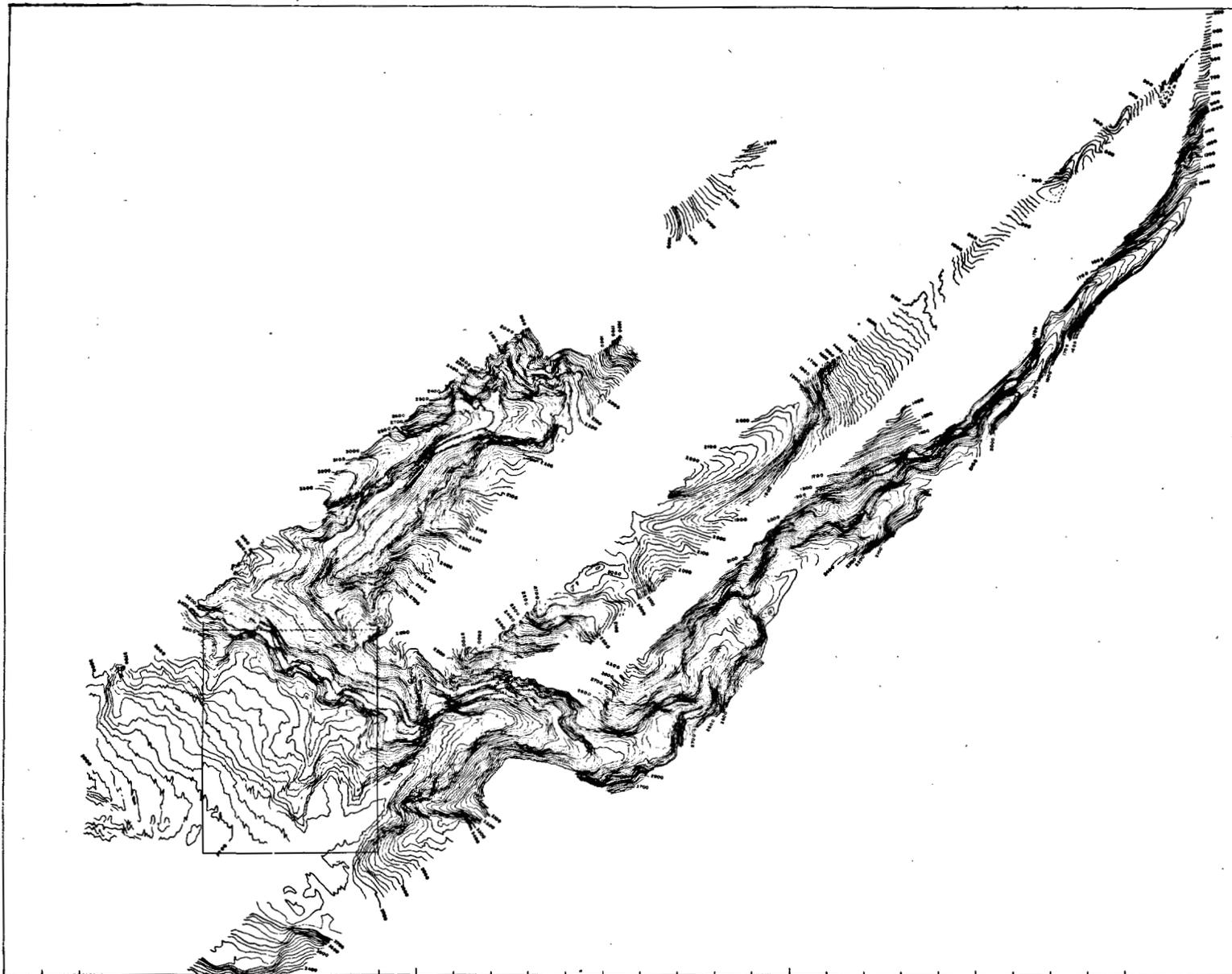


FIG. 27. — Esquisse bathymétrique réalisée à partir des contours temps réel du Sea-Beam avec contrôle de navigation par satellite. La zone de la figure 11 est encadrée. Distance entre traits du cadre de 1 minute de latitude ou de longitude. Intervalle de contour 20 m.

3 mètres en relatif, 50 mètres en absolu). Lorsqu'un tel système n'est pas disponible, l'on aura recours aux systèmes de radio-navigation près des côtes (précision de quelques dizaines à quelques centaines de mètres) et à la navigation par satellites en domaine océanique (précision de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres en fonction du degré d'intégration de la navigation). Dans ces cas le montage des documents Sea-Beam temps réel sera plus difficile. A défaut de navigation précise, la vision tridimensionnelle que fournit le Sea-Beam permet de repérer des structures caractéristiques sur des profils qui se croisent ou se chevauchent et permet une amélioration de la navigation en ramenant ces structures en superposition. Il en est ainsi des seamounts, escarpements, canyons, etc. Plusieurs montages cartographiques ont ainsi pu être réalisés lors des premières campagnes utilisant le Sea-Beam, en ayant recours à la navigation satellite seule. En l'absence de structures caractéristiques, les erreurs dues à la navigation ne pourront être ainsi corrigées mais le problème sera moins grave puisqu'on se trouvera en présence de zones à faible relief ne nécessitant pas une très grande précision de positionnement.

L'importance majeure de ces relevés est l'étude structurale qui peut en être faite. Les distorsions dues à l'imprécision de la navigation ne sont gênantes qu'en relief accidenté, où fort heureusement les structures caractéristiques qui permettent de se repérer sont nombreuses. Un exemple de montage fait sur le navire à partir des documents du traceur est donné en figure 27. L'intégration de la navigation et le contourage directement sur projection en temps réel ou légèrement différé feront du Sea-Beam l'outil de cartographie idéal.

### **Travail en Station**

Pour le travail en station l'on souhaite généralement positionner le navire de façon précise par rapport à une structure du fond. Il en est ainsi pour le dragage, carottage, etc. Le Sea-Beam peut être utilisé avec grand avantage dans ce but en introduisant dans le système une vitesse fictive qui permet au traceur de courbes de défiler bien que le bateau soit à l'arrêt. Cet artifice permet de connaître en permanence l'orientation des structures par rapport à l'axe du navire, les structures étant bien sûr déformées longitudinalement au navire, et ce d'autant plus que la vitesse fictive introduite est élevée.

### **Limite de Résolution**

La limite de résolution du système peut être illustrée sur une zone rencontrée entre les zones 1 et 2 des essais. La figure 28 est un enregistrement de pénétrateur de sédiments qui illustre le passage d'une zone à sédiments bien stratifiés à une zone où les sédiments sont perturbés avec des ondulations de quelques mètres. Les deux zones sont séparées par une différence de niveau d'une dizaine de mètres. Le passage Sea-Beam au travers de cette transition est montré sur la figure 29. Si le changement de niveau est bien visible, par contre le caractère très différent du fond n'appa-

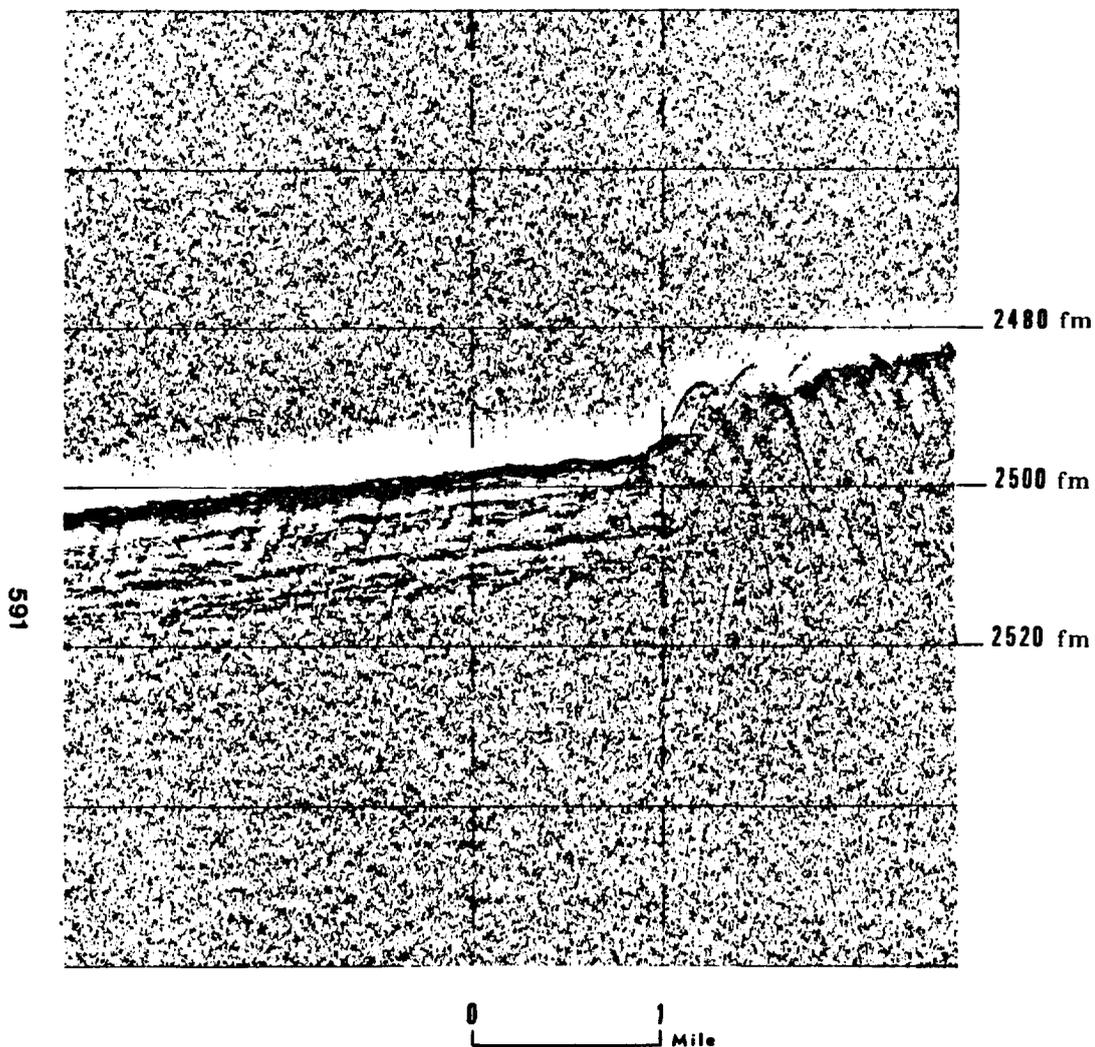


FIG. 28. — Profil 3,5 Kc sur glacis continental illustrant un changement entre sédiments stratifiés et sédiments perturbés vers 4 700 mètres (2 500 brasses).

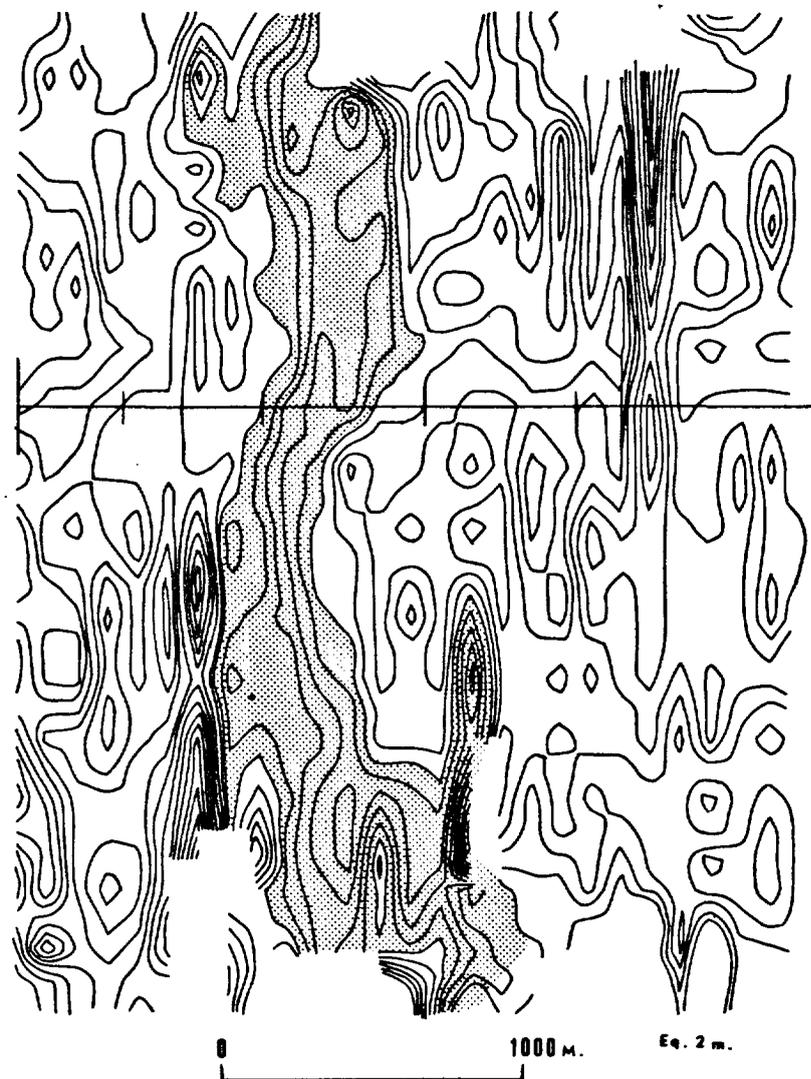


FIG. 29. — Profil Sea-Beam correspondant à la figure 28 ; intervalle de contour de 2 m ; échelle originale 1 : 20 000, état de mer cinq.

rait pas. Ce caractère qui se manifeste par des ondulations de quelques mètres sur de faibles longueurs d'onde (100 mètres environ) ne pourra être mis en évidence qu'à partir de l'enregistrement analogique du faisceau vertical. Ceci découle de la précision supérieure de ce dernier par rapport aux faisceaux obliques (17 A). Il est clair que dans le présent exemple le pouvoir de résolution du système est dépassé.

### Restitution en temps différé

Seule l'utilisation du Sea-Beam en temps réel a été mentionnée jusqu'ici. Toutes les données sont cependant enregistrées sur bandes magnétiques et il est dès lors possible de rejouer ces données après les campagnes.

Un logiciel qui permettra ce rejeu en couplant les données bathymétriques à une navigation « améliorée » a été développé au COB. Ses principales fonctions sont les suivantes : 1° élimination des valeurs aberrantes bathymétriques par fixation de fenêtres soft ; 2° optimisation de la navigation par lissage entre données loch enregistrées sur la centrale d'acquisition du navire et les points satellites ou autres paramètres de navigation ; 3° projection des lignes de contour le long de la route en projection Mercator ou autre.

Le problème difficile qui reste à résoudre est le contournage des données bathymétriques à l'intersection de routes. Suite aux erreurs de navigation qui ne seront jamais totalement éliminées, il en résultera aux intersections une dégradation des données bathymétriques brutes due au lissage quelle que soit la méthode utilisée (Krigage, etc.) [11]. Dans le stade actuel, le contournage des lignes de contour sera effectué le long de la route et le match de ces contours aux intersections sera optimisé par intervention manuelle d'un opérateur sur le positionnement des routes et ce par l'intermédiaire d'un support volatil tel un écran cathodique. Lorsque les contours auront été ainsi superposés de façon optimale aura lieu la restitution sur support stable (traceur de courbes).

Ce logiciel de rejeu étant développé, on espère en transférer son application à bord du navire pour rejeu en temps légèrement différé. Ce rejeu sera toujours nécessaire même en cas d'intégration temps réel, car celle-ci ne sera jamais sans fautes. Ce rejeu sera également nécessaire pour obtenir des documents avec des paramètres autres que ceux choisis initialement (échelles, contours, unités, ...).

### CONCLUSION

En conclusion, le Sea-Beam s'est révélé être un instrument parfaitement opérationnel. Ses performances sont en tous points supérieures à celles définies dans le contrat d'achat. Le Sea-Beam a fourni une digitalisation des sondes entièrement satisfaisante, même sur les zones les plus accidentées et les plus profondes (7 200 mètres). La vision tri-dimensionnelle qu'il donne en temps réel des fonds marins survolés lui donne une

supériorité écrasante par rapport aux systèmes conventionnels. Les premiers résultats illustrent les progrès rapides qu'un tel système permettra de faire dans le domaine de la cartographie et de l'interprétation structurale des fonds océaniques. Un effort important reste à faire pour coupler le Sea-Beam à un système de navigation de haute précision et pour développer un logiciel permettant le tracé de cartes bathymétriques à bord du navire.

### RÉFÉRENCES

- [1] Sea-Beam for precise bathymetric surveys, Technical Bulletin, General Instrument Corporation, Harris ASW Division, Westwood, Massachusetts, 43 p., May 1977.
- [2] Présentation d'un sonar opérationnel à faisceaux multiples, par Morris F. GLENN, *Revue Hydrog. Intern.*, Monaco, XLVII (1), janvier 1970, pp. 35-40.
- [3] Le Sea-Beam, sondeur multi-faisceaux du *Jean Charcot*. Notice technique par Jean-Paul ALLENOU et Vincent RENARD, Centre Océanologique de Bretagne, Rapport Scientifique et Technique, N° 37, 1978.
- [4] ATNAV II, The Expanded Capacity Acoustic Transponder Navigation System, Technical Bulletin, AMF Sea-Link Systems, Herndon, Virginia, 19 p., April 1977.
- [5] Application du filtre de Kalman à la navigation, par J.P. FAIL. *Geophys. Prospecting*, Vol. 20, 1972, pp. 665-699.
- [6] Evaluation du système Sonar à faisceaux multiples Bo'sun, par R. BURKE et J. ROBSON, *Revue Hydrog. Intern.*, Monaco, LII (2), juillet 1975, pp. 57-75.
- [7] Bo'SUN : A high resolution automatic charting system for continental shelf, by Harold K. FARR. General Instrument Corporation, Harris ASW Division, Westwood, Mass., USA.
- [8] Integrated navigation systems for precise positioning in the deep ocean, by K. KASMEYER, *Marine Geodesy*, Vol. 1 (1), 1977.
- [9] Bathymétrie détaillée d'une vallée du Rift et de faille transformante, effectuée dans le cadre du projet FAMOUS par V. RENARD, B. SCHRUMPF et J.C. SIBUET, Centre Océanologique, Brest, 1975.
- [10] Relevé du canyon sous-marin de Guilvinec avec le sondeur Sea-Beam, marge continentale armoricaine, par Vincent RENARD *et collab.*, Centre Océanologique de Bretagne, en préparation.
- [11] Le Krigeage : Méthode de cartographie des fonds marins, par J.P. CHILES et P. CHAUVET, *Revue Hydrog. Intern.*, Monaco, LII (1), janvier 1975, pp. 29-45.