



DEUXIÈME COLLOQUE
SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL
ET SES APPLICATIONS
NICE - 5 AU 10 MAI 1969

13/1

QUELQUES CAPTEURS EN OCEANOGRAPHIE

A. SILVENT

J.P. HENRIOUX

Centre d'Etude des Phénomènes Aléatoires (CEPHAG)
(associé au C.N.R.S.)*

* 46 avenue Félix Viallet 38 GRENOBLE



DEUXIÈME COLLOQUE
SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL
ET SES APPLICATIONS
NICE - 5 AU 10 MAI 1969

13/3

QUELQUES CAPTEURS EN OCEANOGRAPHIE

A. SILVENT * J.P. HENRIOUX *

Centre d'Etude des Phénomènes Aléatoires (CEPHAG)
(associé au C.N.R.S.) *

RESUME

On évoque les problèmes généraux qui se présentent dans l'élaboration de capteurs de mesure adaptés au milieu marin. Le domaine de recherches est très diversifié ; on montre quelques exemples de réalisation limités aux mesures de la vitesse de propagation du son (célérité), de la température et de la pression hydrostatique ainsi qu'une méthode originale de prélèvement et d'enregistrement simultané de ces trois grandeurs.

ABSTRACT

The general problems occurring in design of measurement sensors fitted marine medium are studied. The domain of research is very large ; some examples of practical applications are given : measurement of the velocity of sound, of the temperature and hydrostatical pressure and an original method of sampling and recording of these three data.

* 46, avenue Félix Viallet 38 GRENOBLE



PLAN

1. INTRODUCTION
2. MESURE DE LA TEMPERATURE
 - 2.1 Les détecteurs
 - 2.2 Les traducteurs
3. MESURE DE LA CELERITE
 - 3.1 Mesure de la célérité du son dans l'eau de mer
 - 3.2 Mesure de la célérité dans les sédiments
4. MESURE DE LA PRESSION HYDROSTATIQUE
 - 4.1 Les détecteurs
 - 4.2 Les traducteurs
5. SONDE AUTONOME DE MESURES OCEANOGRAPHIQUES
6. CONCLUSION



1. INTRODUCTION

L'étude du milieu marin requiert la détermination des propriétés physico - chimiques de ce milieu. L'évolution des connaissances fait apparaître des besoins nouveaux et entraîne une augmentation des moyens d'investigations. L'océanographe a recours, pour mener à bien sa tâche, à des appareils de mesure adaptés à des domaines très divers :

- Composition chimique : sels, gaz dissous ...
- Photométrie : transparence, absorption ...
- Magnétisme
- Conductivité électrique
- Pression hydrostatique
- Acoustique
- Thermométrie
- Courantométrie, etc...

Les exigences des spécialistes deviennent plus sévères au fur et à mesure qu'ils tendent vers une connaissance plus fine et plus vaste des phénomènes de la mer. Pour répondre à leurs demandes les méthodes de mesure se perfectionnent sans cesse : accroissement des étendues de mesures, des sensibilités et des précisions. Parallèlement on assiste à une augmentation considérable du volume des données recueillies.



rendant plus complexes les problèmes de traitement, de dépouillement et d'archivage des résultats.

Le rôle des capteurs est de décrire aussi fidèlement que possible la répartition et l'évolution dans le temps et dans l'espace des paramètres intéressants.

Un capteur de mesure comprend nécessairement un élément détecteur sensible à la grandeur à mesurer et un traducteur qui transforme celle-ci en une autre grandeur liée à la première par une relation univoque [1]. Cette transformation rend possible, ou simplifie, l'acquisition du signal perçu : lecture, transmission, enregistrement, etc. ; le traducteur est souvent un organe de traitement qui facilite ces différentes opérations.

Nous évoquerons ici quelques méthodes de mesure de trois grandeurs intéressantes en acoustique sous-marine : célérité, température et pression hydrostatique.

2. MESURE DE LA TEMPERATURE :

Par commodité de langage nous parlerons de mesure de température bien que le terme ne soit pas toujours admis.

La connaissance de la température est très importante : elle est un repère des échanges énergétiques entre l'atmosphère et l'océan [2], elle conditionne en partie les mouvements des masses



d'eau, son influence sur d'autres paramètres physiques, en biologie marine est souvent très grande.

2.1 Les détecteurs :

Nous mentionnerons pour mémoire le thermomètre classique à mercure encore très utilisé dans une disposition dite "thermomètre à renversement" qui donne, outre la température, l'immersion de mesure. Assez lourd d'emploi, il permet le tracé point par point d'un profil vertical de température auquel on se réfère souvent pour le contrôle d'autres appareils.

Les détecteurs les plus intéressants sont ceux qui se prêtent à une traduction sous forme de grandeur électrique ; parmi eux, les plus répandus sont les thermistances et les sondes à fil de platine.

2.11 Les thermistances sont des résistances dont le coefficient de température, généralement négatif, est notablement supérieur à celui des métaux. Elles sont constituées d'un semi-conducteur formé d'un mélange de divers oxydes métalliques. Elles ont une sensibilité élevée et par construction on peut obtenir des constantes de temps faibles. En revanche les caractéristiques de stabilité dans le temps et d'insensibilité à la pression sont mal définies. La réponse peut d'ailleurs être notablement améliorée par un circuit simple.

En effet supposons une tension proportionnelle à la résistance. La réponse à un échelon de température est de la forme :



$$V(t) = V_0 (1 - e^{-t/\tau}) \quad t \geq 0$$

Dérivons par rapport au temps

$$V'(t) = \frac{1}{\tau} V_0 e^{-t/\tau}$$

Multiplions $V'(t)$ par τ et ajoutons à $V(t)$, on obtient alors $V_1(t) = V_0$ pour $t \geq 0$.

Pratiquement les choses ne sont pas aussi parfaites, ne serait-ce que l'impossibilité d'obtenir une vraie dérivation. La fig. 1 montre néanmoins que l'on peut atteindre un résultat positif.

Le calcul montre que la compensation est obtenue également dans le cas où la sonde est soumise à un gradient de température constant. Sans compensation la limite de l'erreur est : $\epsilon = g\tau$ où g est le gradient en volt par seconde et τ la constante de temps ; et

$$V(t) = V_0 + g(t - \tau) + g\tau e^{-t/\tau}$$

dérivons

$$V'(t) = g(1 - e^{-t/\tau})$$

Multiplions par τ et ajoutons à $V(t)$:

$V_1(t) = V_0 + gt$; la réponse est linéaire en t

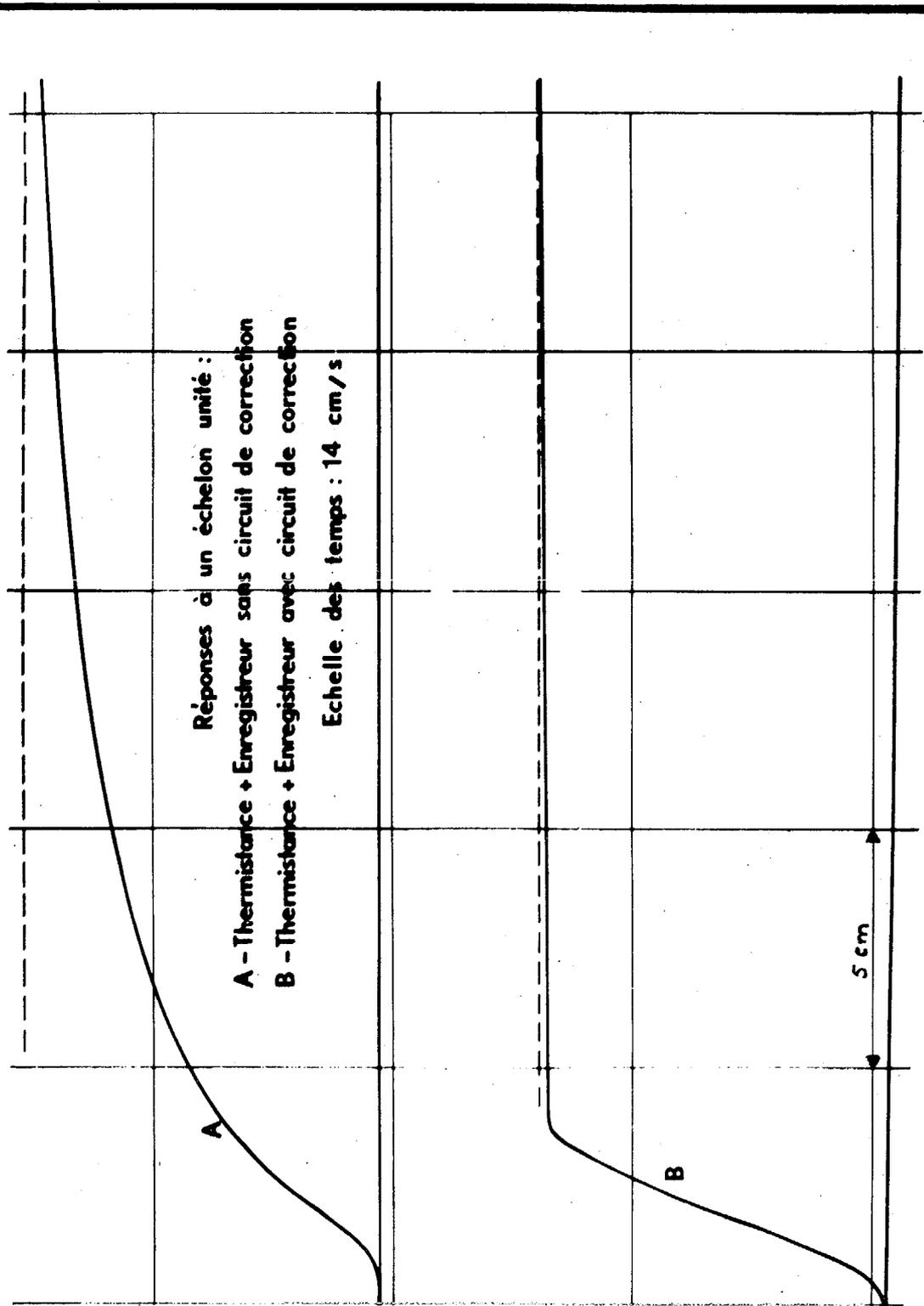


Fig. 1 : Réponses à un échelon de température



et l'erreur théorique ϵ nulle.

L'emploi des thermistances est généralement limité aux capteurs dont le rôle est de donner une allure de profil bien détaillée sans souci d'absolu ; il s'impose pratiquement pour l'observation de gradients élevés.

2.12 Le platine physiquement pur, dont l'emploi courant s'étend de $- 230$ à $+ 600^{\circ}$ C, constitue, en particulier, l'élément sensible des thermomètres à résistance étalons servant à définir l'Echelle Internationale des températures entre $- 183$ et $+ 630^{\circ}$ C [3]. La résistance de platine est donc un détecteur qui répond parfaitement aux problèmes de précision et de stabilité. Son utilisation, longtemps limitée aux mesures en laboratoire, est maintenant étendue grâce à l'évolution de la technique qui permet d'obtenir un bon pouvoir de résolution (10^{-2}° C) malgré un coefficient de température relativement faible (environ $4 \cdot 10^{-3} / ^{\circ}\text{C}$). Le marché actuel offre des sondes insensibles à la pression jusqu'à 1 500 bars et dont la constante de temps est inférieure à 0,3 s (elle peut être améliorée comme indiqué en 2.11).

2.13 Le thermomètre à quartz [4] est très linéaire ; il est d'une extrême sensibilité (10^{-4}° C) et peut supporter des pressions de 700 bars. Il présente malheureusement un temps de réponse important (16 s à 90 % de la pleine déviation). En contre-partie



il joue à lui seul le rôle de détecteur et de traducteur : la grandeur de sortie est une fréquence proportionnelle à la température.

2.2 Les traducteurs :

Thermistances et sondes au platine sont des résistances électriques dont la loi de variation en fonction de la température est bien déterminée. Il est à noter qu'une sonde à résistance doit être parcourue par un courant très faible, ne créant pas un échauffement propre qui s'ajouterait à celui dû à la température à mesurer. Il y a là une contrainte déterminante dans le choix du traducteur.

Le traducteur le plus simple est le montage en pont de Wheatstone associé à un galvanomètre enregistreur. La résistance des conducteurs reliant le pont de mesure à la sonde intervient, si cette résistance de ligne n'est pas négligeable par rapport à la résistance de la sonde. On peut y remédier par la disposition du "montage trois fils".

On préfère de beaucoup utiliser des traducteurs tels que les oscillateurs à résistance-capacité : la grandeur image ainsi obtenue se prête parfaitement aux opérations de télétransmission, multiplexage, etc. Actuellement on recherche de plus en plus la conversion directe analogique-numérique au niveau du capteur. Un exemple, dont le principe est dérivé de celui des voltmètres digitaux est donné fig.2.

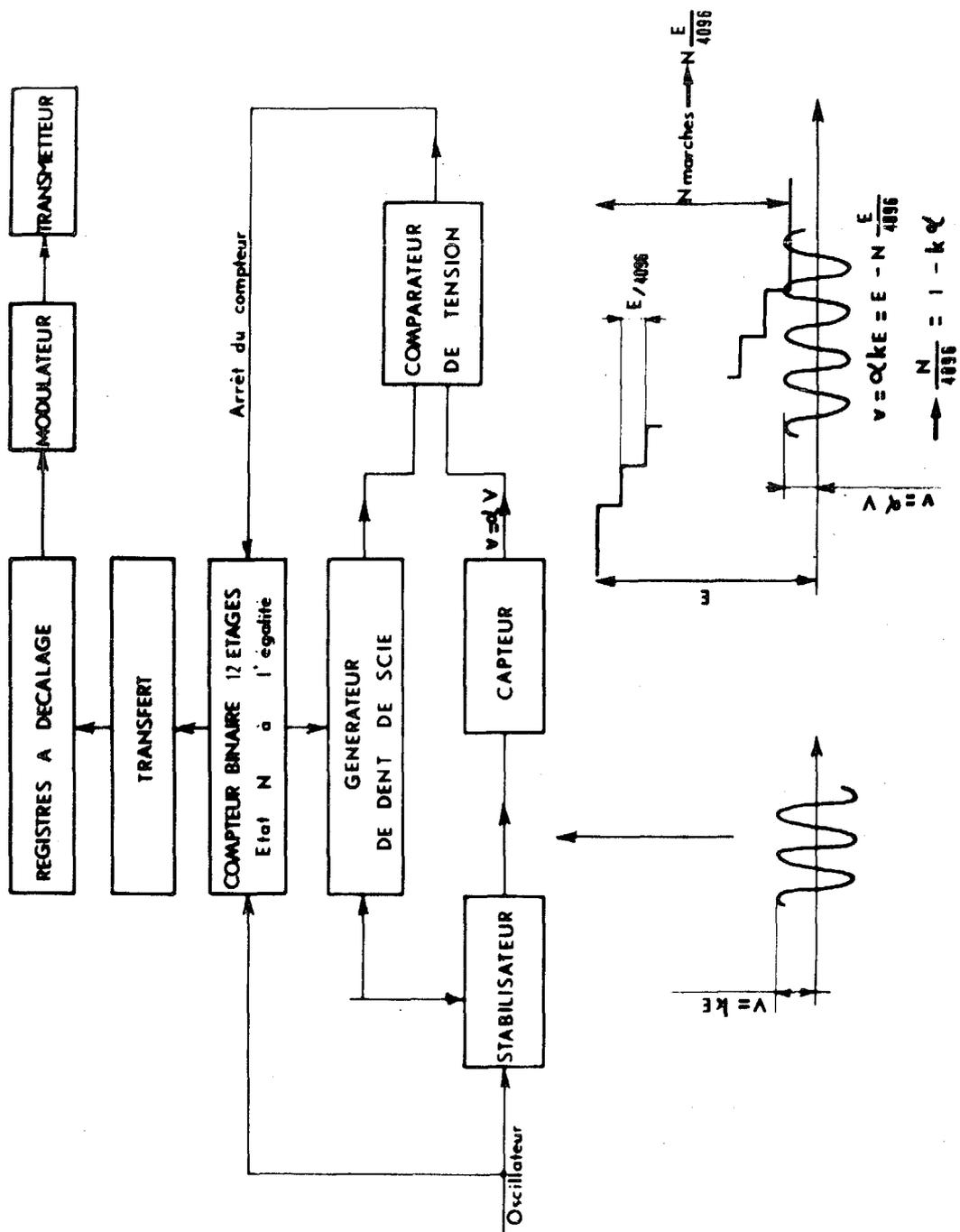


Fig. 2 : Thermomètre digital : schéma synoptique



3. MESURE DE LA VITESSE DE PROPAGATION DU SON OU CELERITE :

Nous évoquerons quelques méthodes de célérimétrie dans l'eau et dans les sédiments constituant la couche superficielle du fond.

3.1 La célérité du son dans l'eau de mer :

La célérité peut être déduite de la connaissance de la température ; dans ce cas il faut connaître également la pression au niveau du point de mesure et la salinité. On tient généralement compte d'une salinité moyenne estimée, ce qui peut conduire à de notables erreurs sur la valeur de la célérité.

La mesure-directe est définie par le temps de parcours d'une impulsion ultra-sonore ou par le déphasage d'une onde périodique sur la base de mesure. Un exemple de célérimètre à impulsions est donné schématiquement fig. 3 ; la fréquence de récurrence des émissions est asservie au temps de parcours des impulsions de sorte qu'elle est directement proportionnelle à la célérité du milieu.

Soit l la longueur de la base de mesure et c la célérité du milieu ; la fréquence de relaxation est donnée par :

$$f_0 = \frac{c}{2l}$$

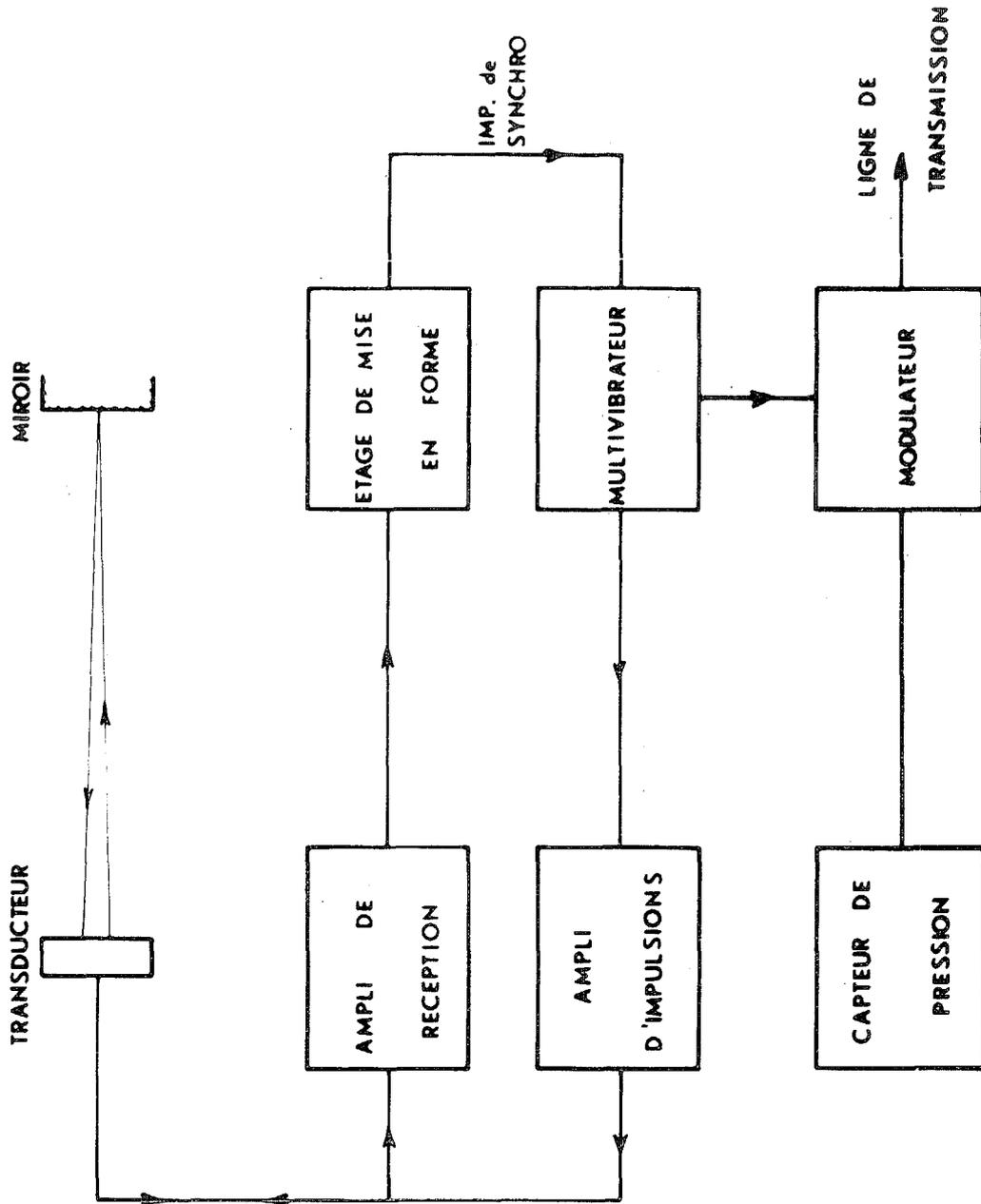


Fig. 3 : Célérimètre à impulsions : schéma synoptique



Si $2l$ est égale à 0,1 m, f_0 représente alors la valeur numérique de c exprimée en dm/s.

En réalité la période synchronisée T se compose de deux termes : T_0 le temps de transit de l'impulsion et τ le retard parasite dû au temps de transfert dans les circuits. La période est

$$T = \frac{2l}{c} + \tau$$

d'où

$$f = \frac{c}{2l + \tau c}$$

L'erreur due à τ est $\delta f = f_0 - f = \frac{\tau c^2}{4l^2 + 2\tau cl}$

ou

$$\delta f = \frac{\tau}{T_0(T_0 + \tau)}$$

or $T_0 \gg \tau$

d'où

$$\delta f \approx \frac{\tau}{T_0^2} = \tau \frac{c^2}{4l^2}$$

On peut réduire δf , donc δc en diminuant τ : amplificateurs à large bande, fréquence libre élevée de transducteur. L'augmentation de l conduit aussi à une erreur plus faible ; mais cette opération diminue la fréquence de récurrence donc le pouvoir de résolution si l'exploitation se fait par comptage de fréquence. Ce dernier inconvénient peut être éliminé par multiplication de la fréquence

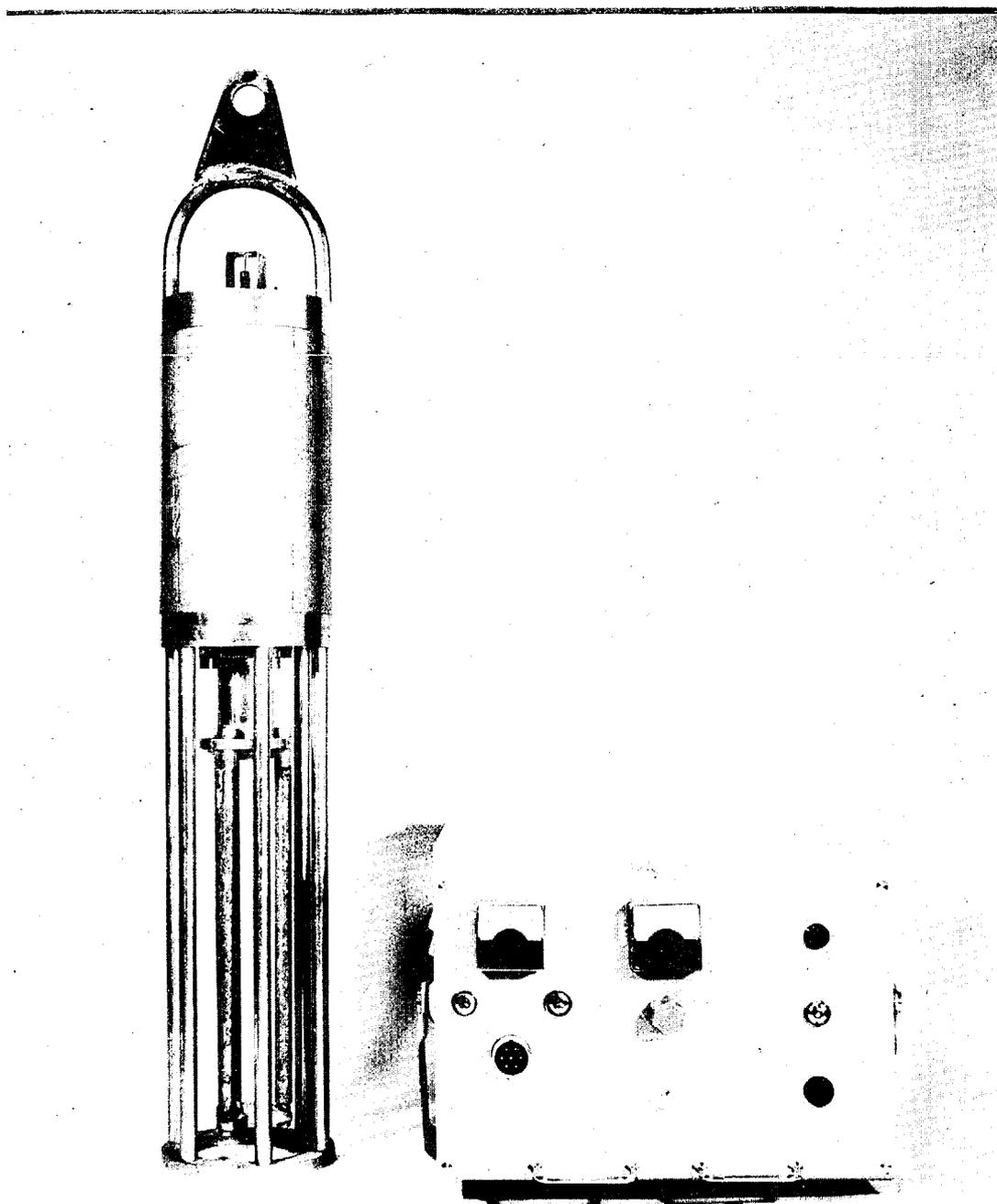


Fig. 4 : Célorimètre C 310 : Corps immergé et boi-
tier de surface.



avant comptage.

La fig. 4 nous montre une réalisation pratique correspondant au schéma ci-dessus. On distingue, à la partie inférieure, la base de mesure composée d'un transducteur électro-acoustique et d'un miroir, la distance entre les deux étant fixée par des colonnettes en acier INVAR. A la partie supérieure se trouve le boîtier étanche et résistant à de fortes pressions (> 350 bars) dans lequel sont logés les circuits de mesure et de modulation ainsi qu'un capteur de pression. Ce célérimètre effectue les mesures dans une gamme s'étendant de $1\ 440$ m/s à $1\ 560$ m/s ; sa sensibilité est de $0,1$ m/s. Le coffret, à droite sur la même figure, contient les circuits de surface : alimentation de la sonde, démodulateurs séparant les signaux "célérité" et "pression", convertisseurs fréquence-tension pour enregistrements analogiques, circuits de commande d'un fréquencemètre.

Quelques résultats typiques sont donnés sur les figures suivantes : En 5 et 6 deux profils tracés en temps réel à l'aide d'un enregistreur xy, entre la surface et $2\ 500$ mètres de fond. En 7 et 8 deux résultats de dépouillement d'enregistrements numériques par ordinateur .[5]

3.2 Célérité dans les sédiments :

La mesure directe, in-situ, d'un profil de célérité sur des épaisseurs de plusieurs mètres de sédiments par des fonds importants serait difficile

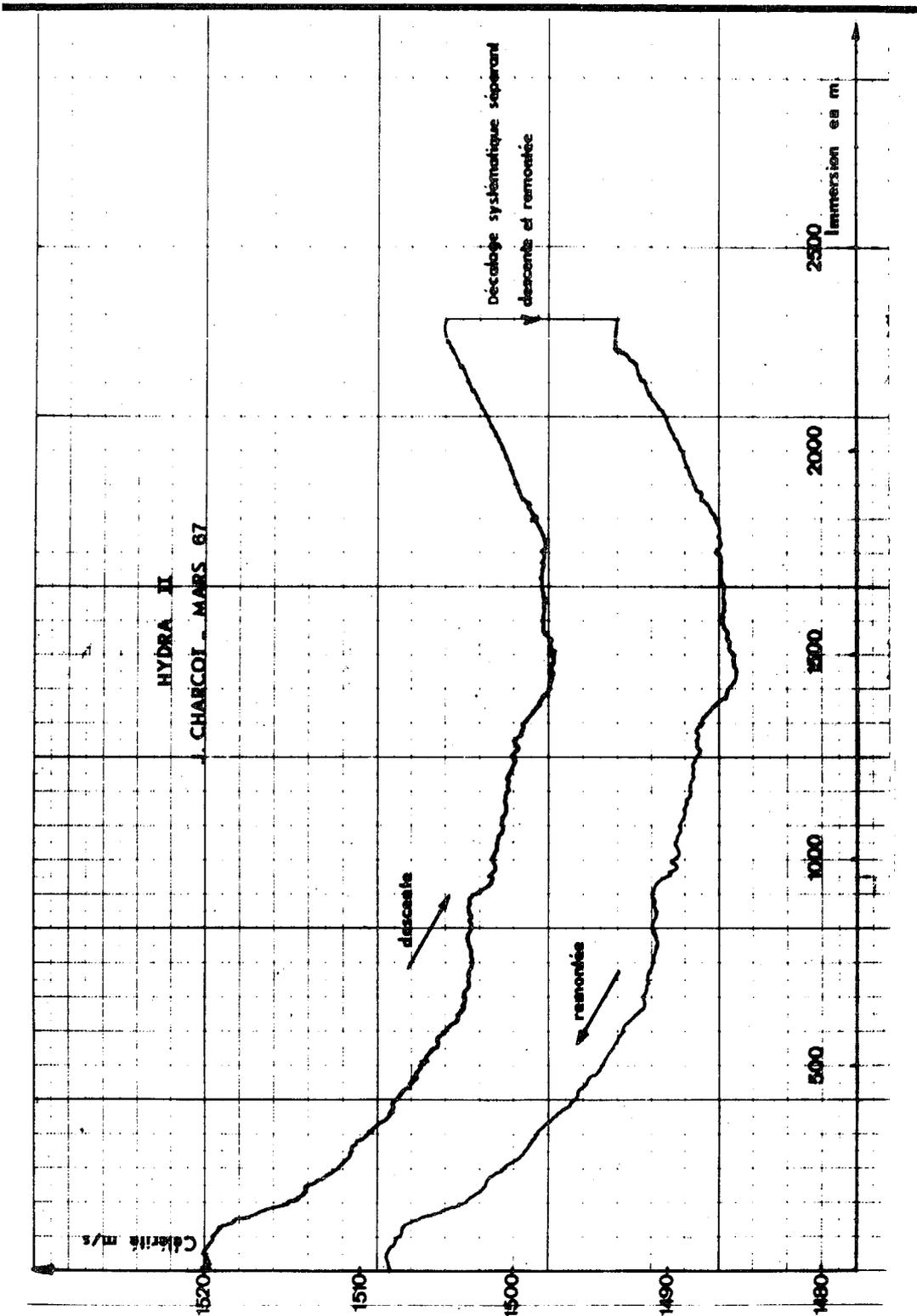


Fig. 5 : Célérimètre G 310 : enregistrements analogiques.

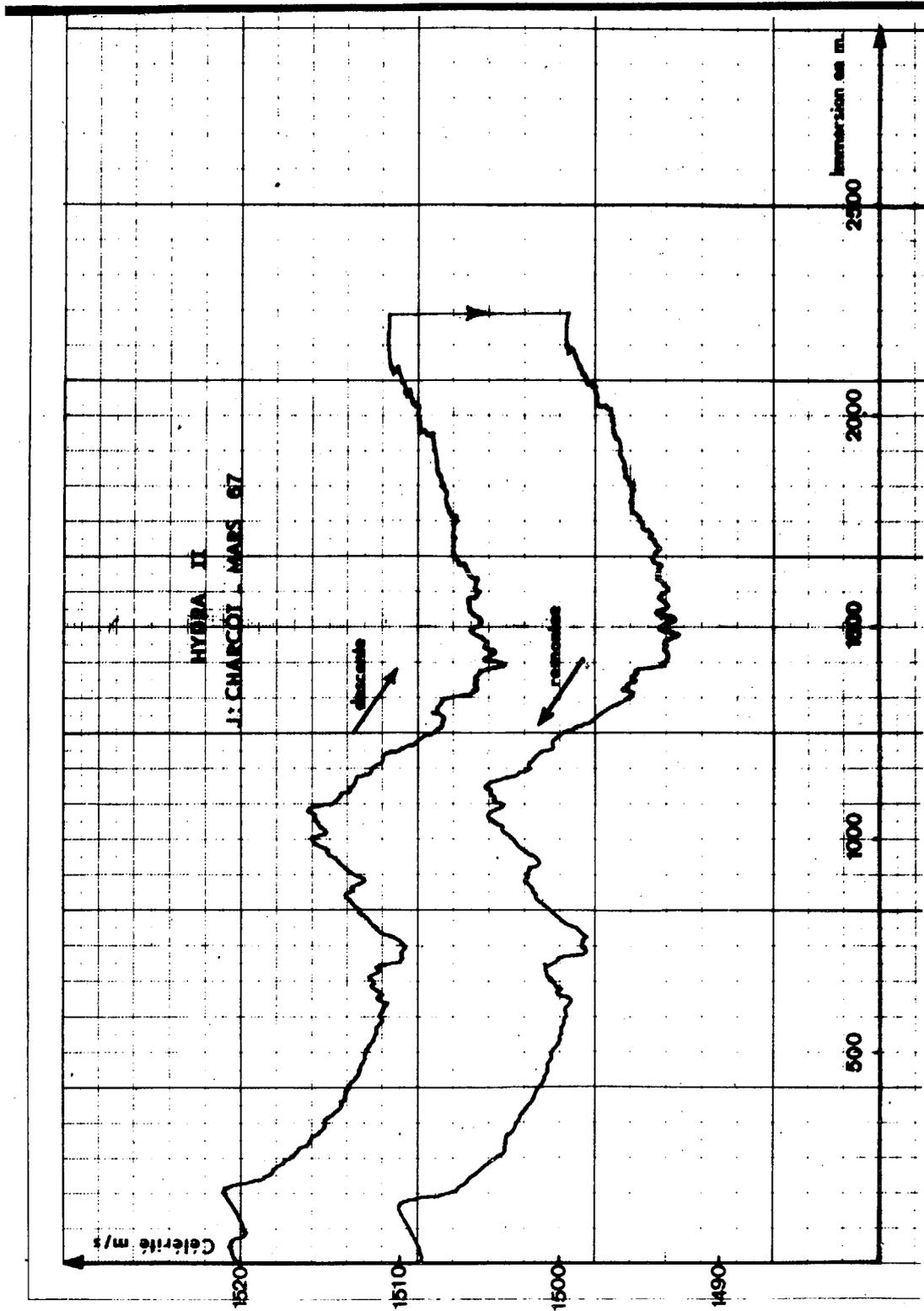


Fig. 6 : Célérimètre G 310 : Enregistrements analogiques

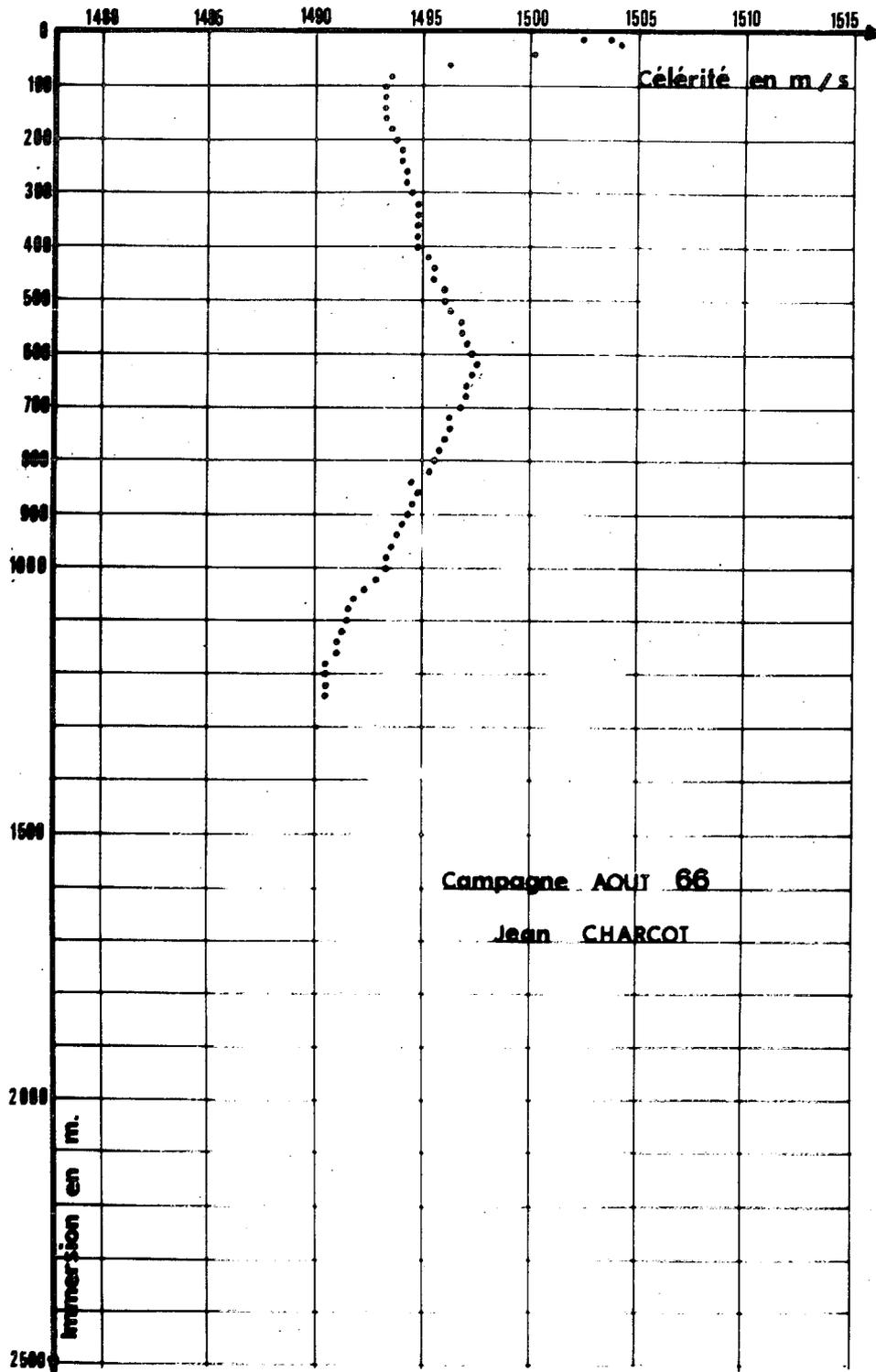


Fig. 7 : Célérimètre G 310 : dépouillement des relevés numériques

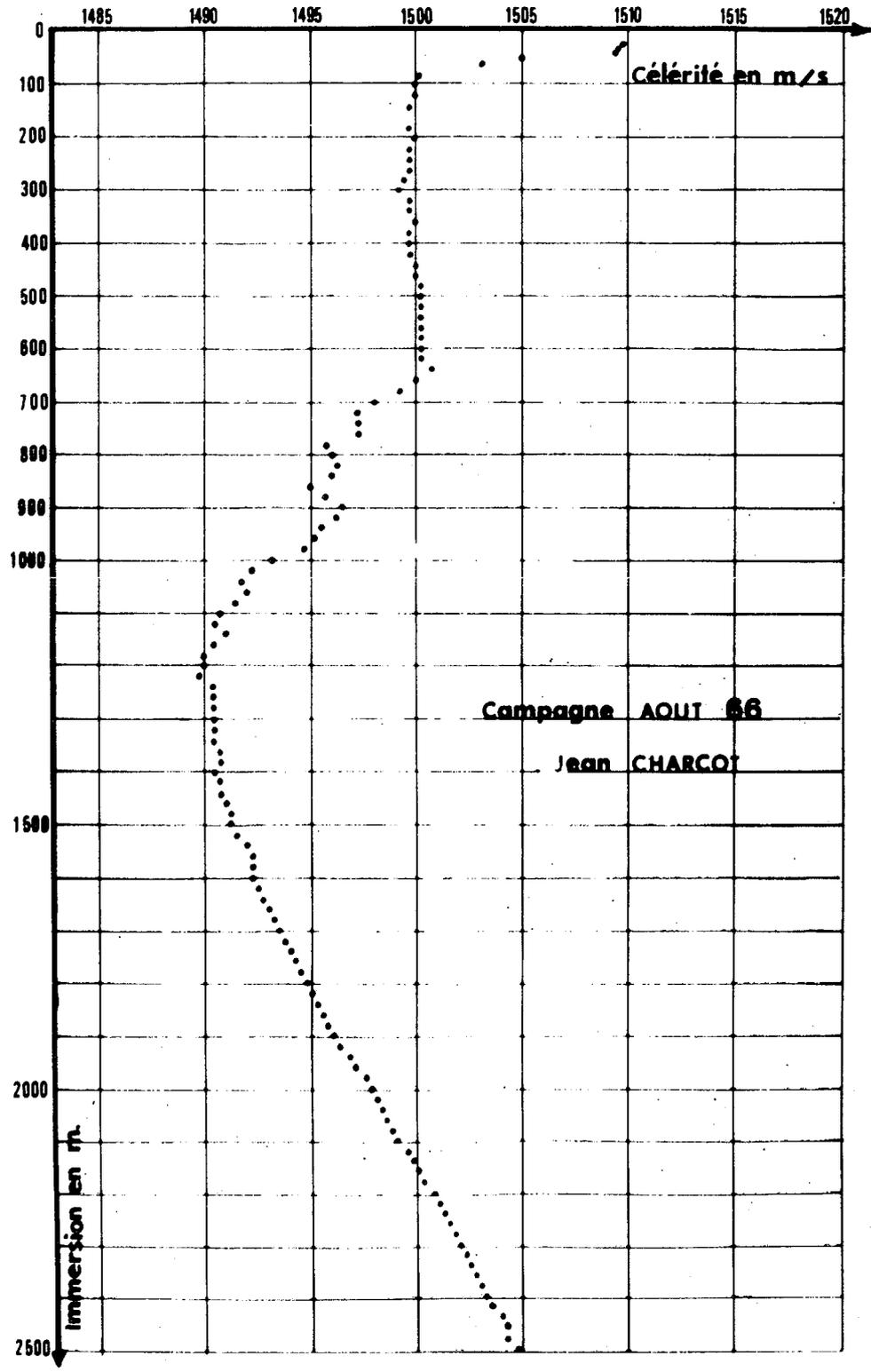


Fig. 8 : Célérimètre G 310 : dépouillement des relevés numériques



à réaliser ; en particulier la pénétration des capteurs poserait de gros problèmes technologiques. On travaille sur des échantillons ramenés en surface par les carottiers et on corrige les résultats en fonction des différences de pression et de température notées entre le lieu de prélèvement et le lieu de mesure.

Un célérimètre pour sédiments est illustré fig. 9 où l'on distingue à droite la base de mesure et à gauche la base de référence. Deux impulsions émises simultanément se propagent l'une dans le sédiment sur un trajet de longueur fixe d , l'autre dans un milieu de référence de célérité C_0 sur un trajet dont la longueur d_0 peut être ajustée par une vis micrométrique et lue sur un vernier. La distance d_0 est réglée jusqu'à égalité des deux temps de parcours : on déduit la valeur cherchée de d , d_0 et C_0 .

Le temps de parcours dans le sédiment est $t = d/c$ et dans le milieu de référence $t' = d_0/c_0$. On règle d_0 pour avoir $t = t'$ donc

$$c = c_0 d / d_0$$

En réalité les temps t et t' sont affectés de retards parasites inégaux. Soient τ_0 et τ les retards supposés constants, respectivement dans le milieu de référence et dans le sédiment ; on a donc :

$$\frac{d_0}{c_0} + \tau_0 = \frac{d}{c} + \tau$$

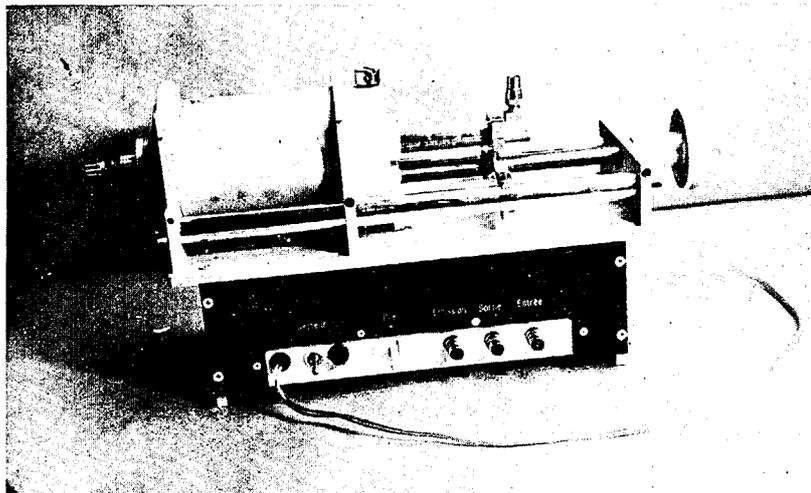
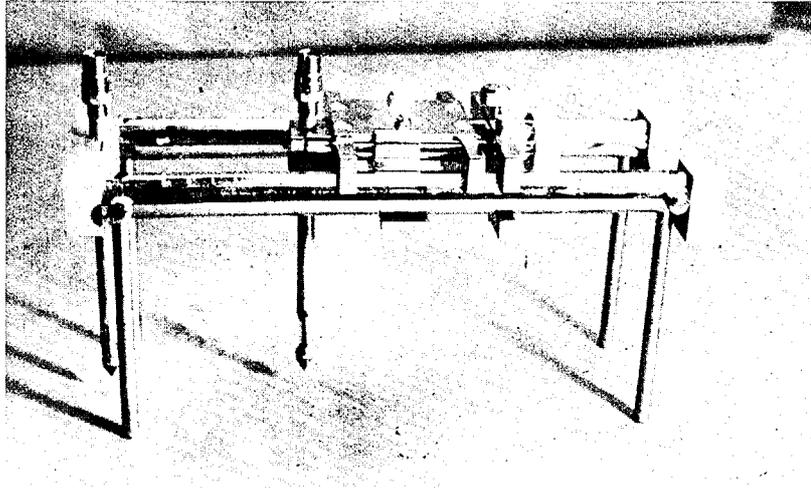


Fig. 9 : Célérimètre pour sédiments :
- (en haut) la base de mesure
- (en bas) la base de référence



ou

$$\frac{d}{c} = \frac{d_0}{c_0} + \tau - \tau_0$$

En posant $\tau - \tau_0 = \frac{\delta}{c_0}$ il vient $\frac{d}{c} = \frac{d_0 - \delta}{c_0}$

ou encore

$$c = c_0 \frac{d}{d_0 - \delta}$$

c_0 étant réputée indépendante de la température une mesure préliminaire dans le milieu de référence ($c = c_0$) permet de décaler une fois pour toutes d'une valeur δ l'échelle sur laquelle on lit la distance d_0 .

Le milieu de référence est un mélange d'eau et d'alcool éthylique à 18 % en poids, la célérité c_0 varie peu avec la température dans une plage assez large [6] autour de 20 ° C. La valeur c_0 elle-même est déterminée par référence à la célérité dans le mercure. (Le retard de propagation dans le mercure est donné en μs par centimètre par

$$\int t = 6,900 + 0,00205 (\theta - 20)$$

où θ est la température du mercure [7].)

La précision de cet appareil est de quelques 10^{-3} . Les fig. 10 et 11 donnent deux résultats caractéristiques. En 10 on observe un profil régulier relatif à une carotte homogène ;

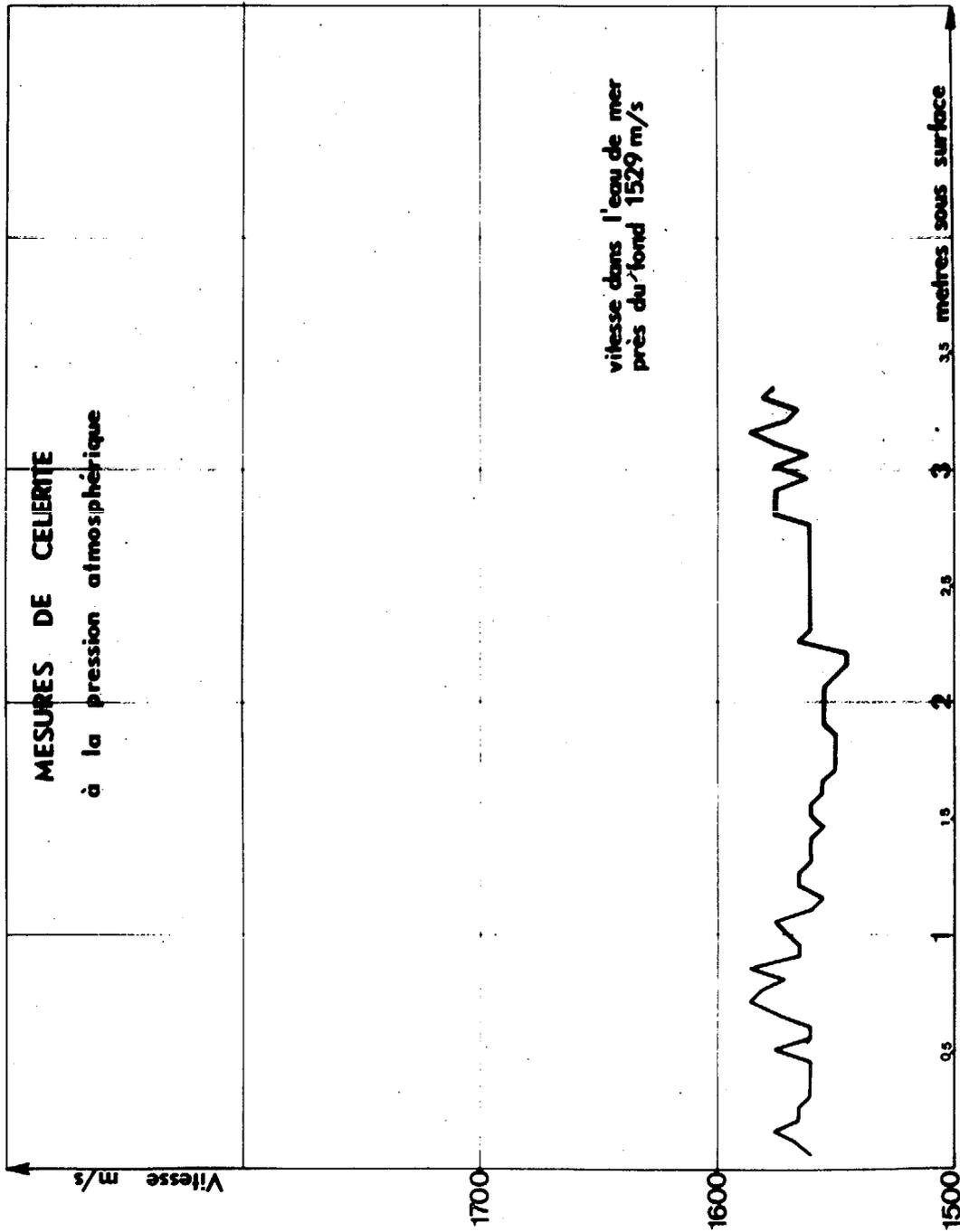


Fig. 10 : Célérité dans les sédiments : carotte homogène

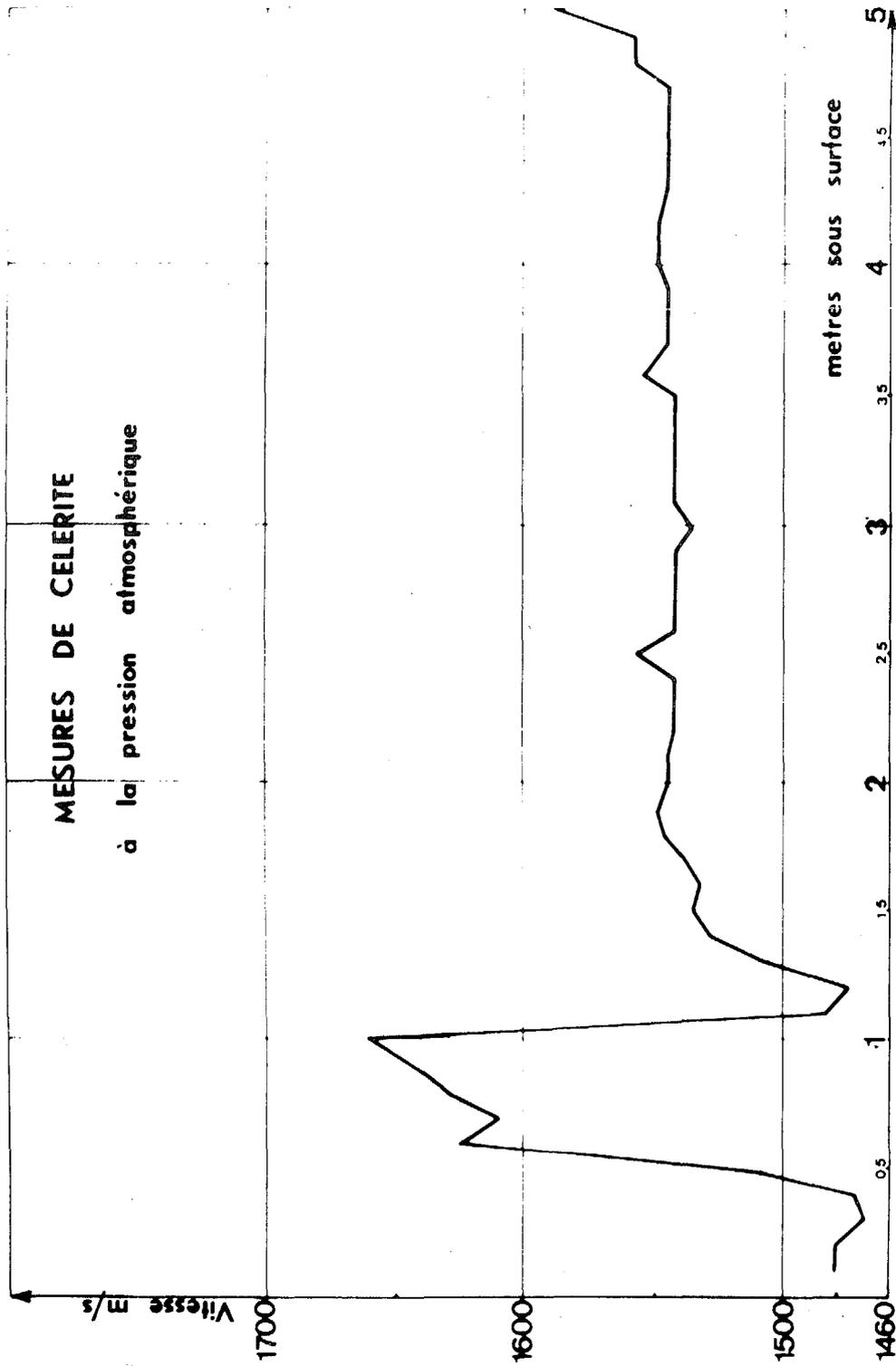


Fig. 11 : Célérité dans les sédiments : présence de sables entre 0,6 et 1 m sous surface.

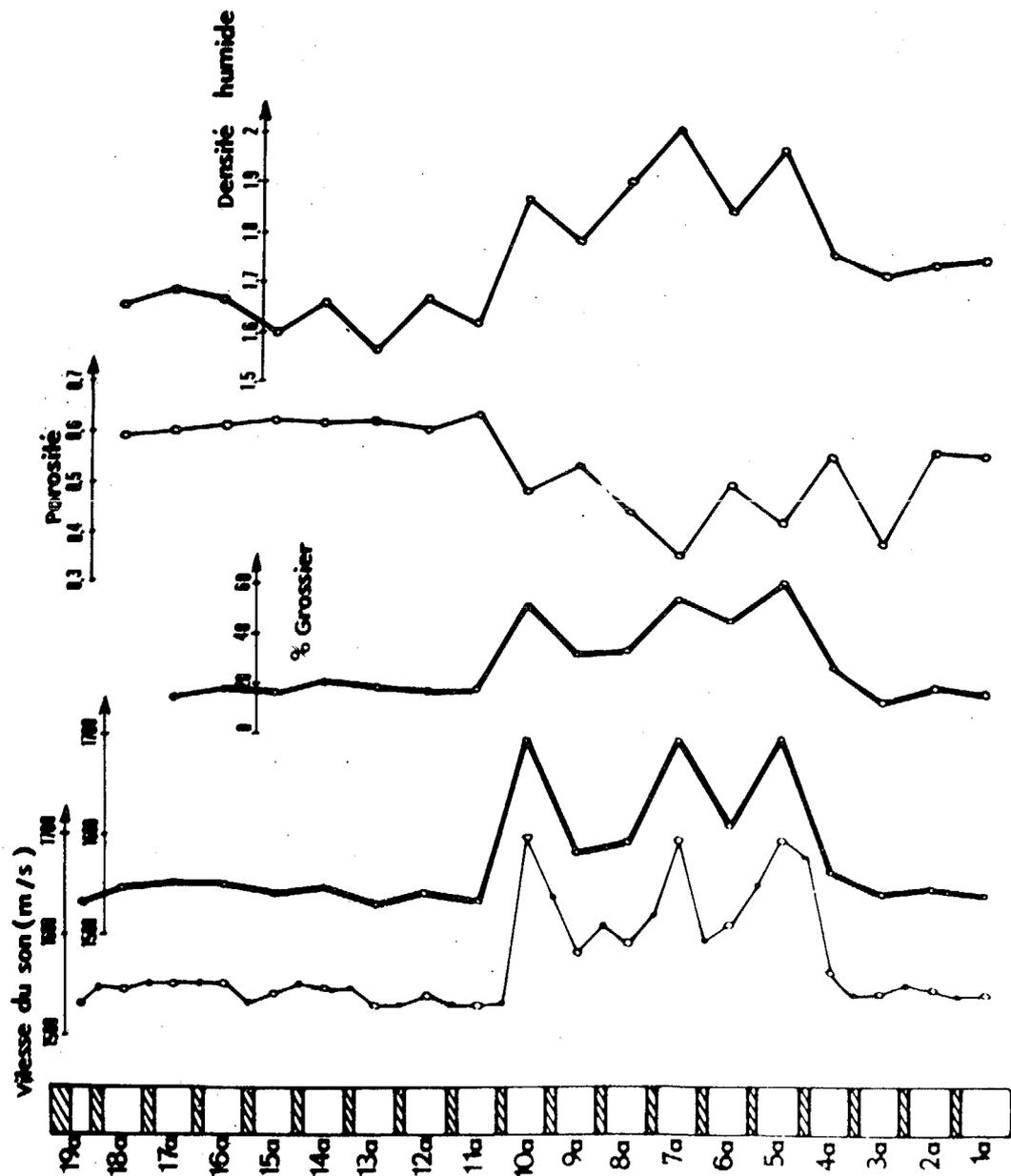


Fig. 12 : Célérité dans les sédiments : Comparaison de différents paramètres.



en 11 une passe sableuse entre deux couches de vase explique la brusque augmentation de célérité entre 0,6 m et 1 m. Sur la figure 12 sont portées les valeurs de divers paramètres caractéristiques de l'échantillon [8].

4. MESURE DE LA PRESSION HYDROSTATIQUE :

La connaissance de la pression hydrostatique présente un double intérêt : repère d'immersion et paramètre physique.

4.1 Les détecteurs

La pression est généralement mise en évidence par la déformation d'une pièce mécanique : ressort, membrane, tube de Bourdon. Il existe des détecteurs piezo-électrique mais leur adaptation à la mesure de pressions lentement variables est délicate (amplificateur de charges, intégrateur etc.). Signalons enfin l'apparition sur le marché de transistors piezo-sensibles qui dans l'avenir se prêteront peut-être à d'intéressantes applications.

4.2 Les traducteurs :

Là encore , on recherche l'élaboration de la grandeur la mieux adaptée aux conditions d'exploitation. Les dispositifs électriques les plus simples comportent un potentiomètre dont l'axe du curseur est couplé mécaniquement à la pièce déformable. Le potentiomètre peut être remplacé par une



inductance dont la valeur est modifiée par un noyau magnétique mobile ou par un transformateur différentiel dont le coefficient de couplage est fonction de la pression appliquée.

Un autre dispositif très intéressant en télémétrie et offrant d'excellentes performances met à profit la variation de fréquence de vibration d'une corde métallique par modification de la tension mécanique ; l'oscillation est entretenue par un amplificateur électronique. La fréquence de vibration d'une corde soumise à une tension mécanique t est donnée pour de faibles amplitudes par

$$[9] \quad f_0 = k \frac{\sqrt{t}}{L}$$

où L est la longueur de la corde et k un coefficient caractéristique.

Pour un allongement relatif $\frac{\Delta L}{L}$ on a $t = E \frac{\Delta L}{L}$

et $\frac{\Delta L}{L}$ est proportionnel à la force appliquée F_0 .

donc
$$t = k' E F_0$$

et
$$f_0 = k \frac{\sqrt{k' E F_0}}{L}$$

Si F_0 est la force correspondant à la

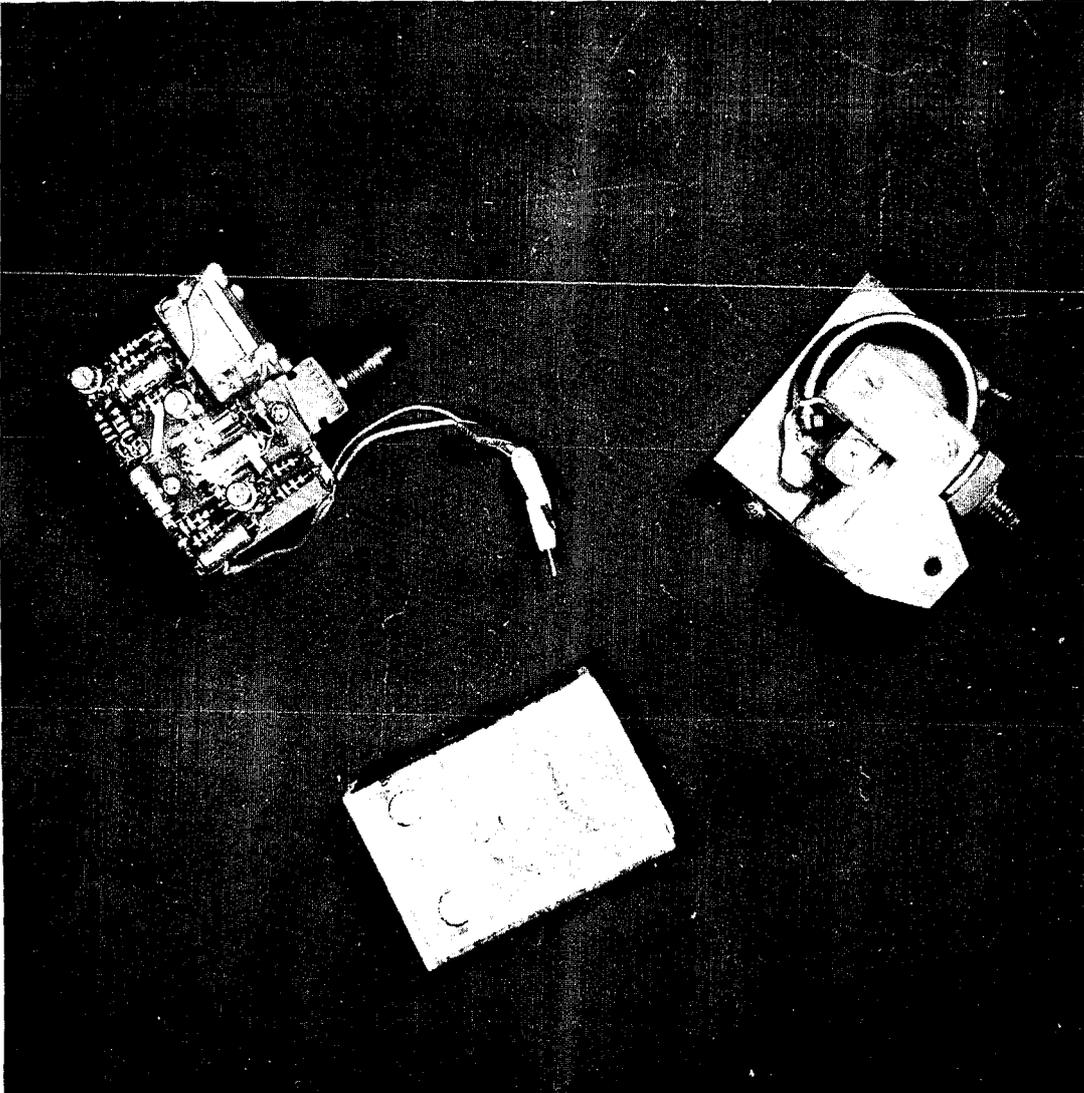


Fig. 13 capteur de pression à tube Bourdon
et inductance variable

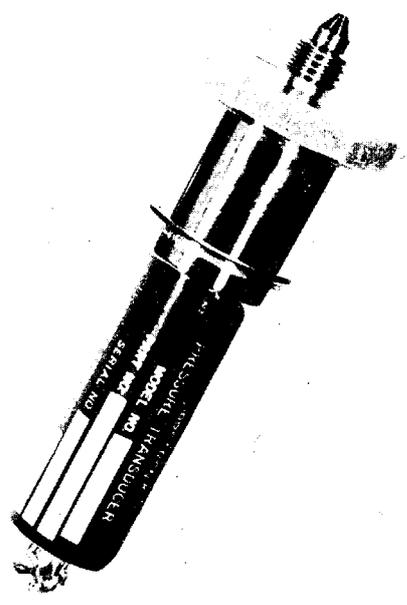
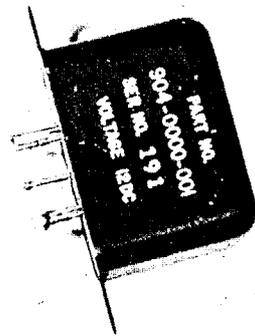


Fig. 13 bis : capteur de pression à corde vibrante (VIBRCTRON)



précontrainte et si F est une force opposée à F_0 on aura :

$$f = \frac{k}{L} \sqrt{E\alpha(F_0 - F)} = \sqrt{f_0^2 - \alpha F}$$

Si F est développée par la pression à mesurer on a, à un coefficient près, l'expression de la fréquence en fonction de P .

Il existe une variante dans laquelle la corde vibrante est remplacée par un cylindre dont on exploite un mode vibratoire radial. L'expression de f en fonction de P est de la même forme que ci-dessus [10].

Deux exemples de capteurs haute pression (350 bars) l'un à tube de Bourdon, l'autre à corde vibrante, sont donnés fig. 13.

5. SONDE AUTONOME DE MESURES OCEANOGRAPHIQUES

On donne ici un exemple de réalisation d'une sonde sur laquelle sont groupés un thermomètre, un célérimètre, un capteur de pression, les circuits de traduction en fréquence, un compteur numérique et un enregistreur miniature d'informations binaires.

La plongée de la sonde est assurée par un lest de 30 kg environ. Lorsque l'ensemble atteint une immersion prédéterminée un largueur manométrique libère le lest et la sonde revient en surface sous l'effet de sa flottabilité positive. L'immersion maximale de plongée est de 3 500 mètres .

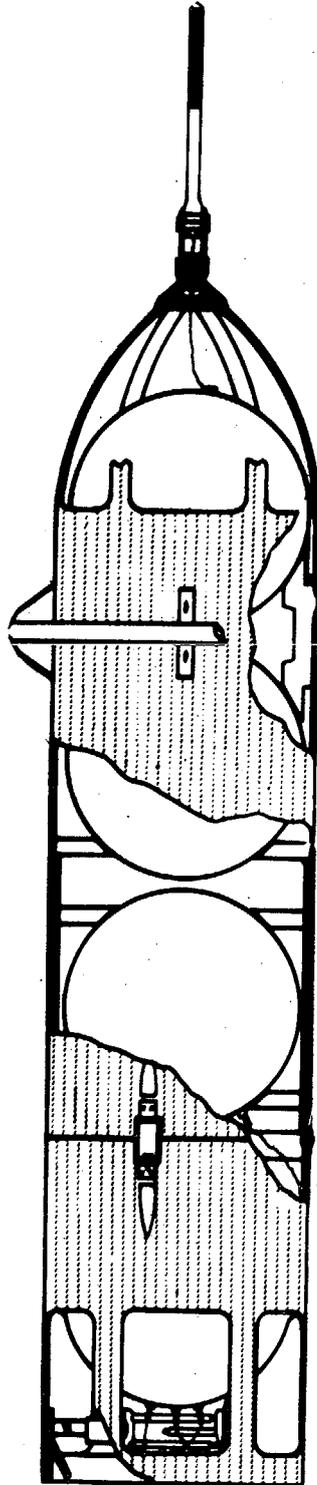


Fig. 14 : Sonde autonome de mesures océanographiques.

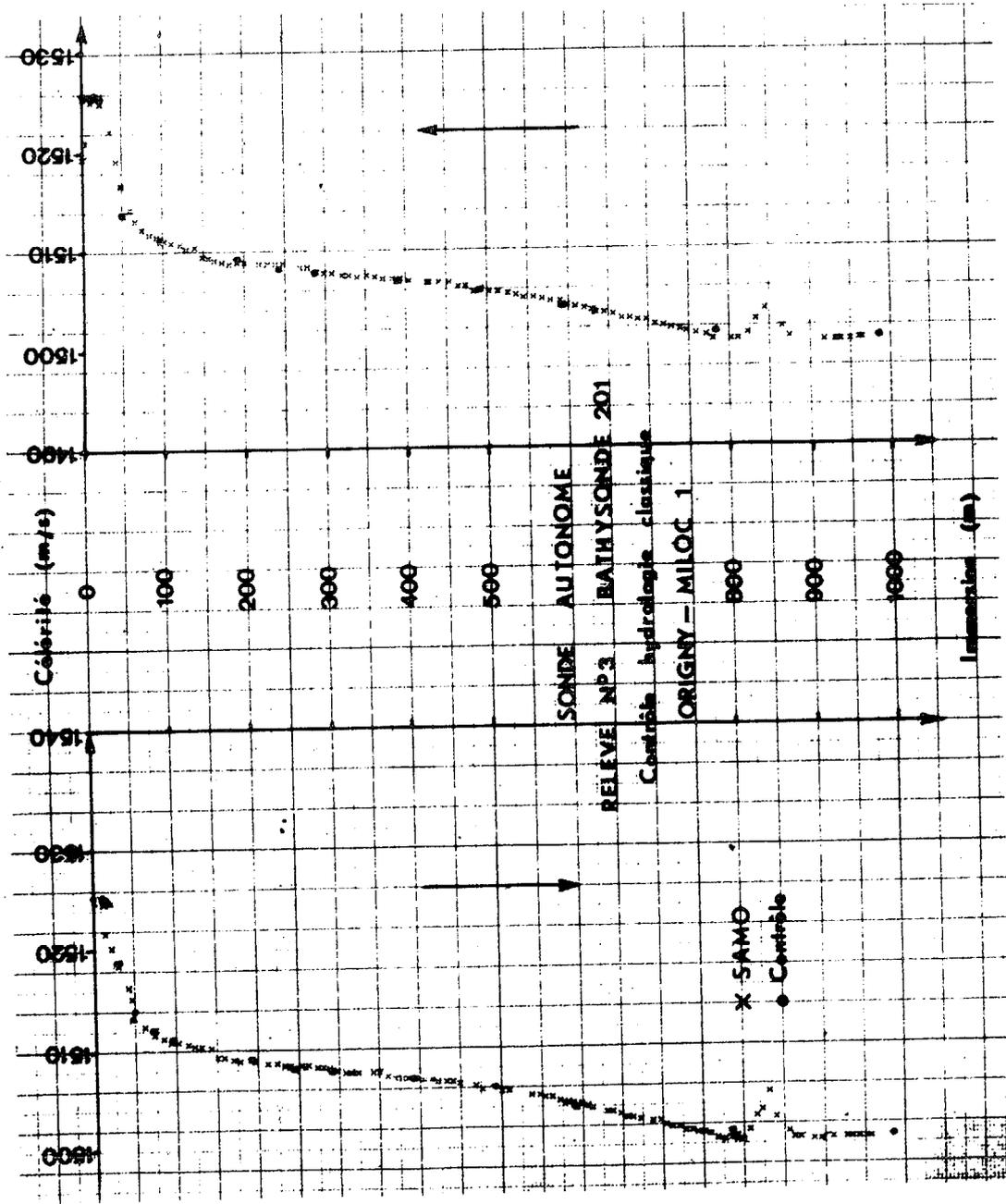


Fig. 15 : S. A. M. O. célérogramme avec contrôles hydrologiques

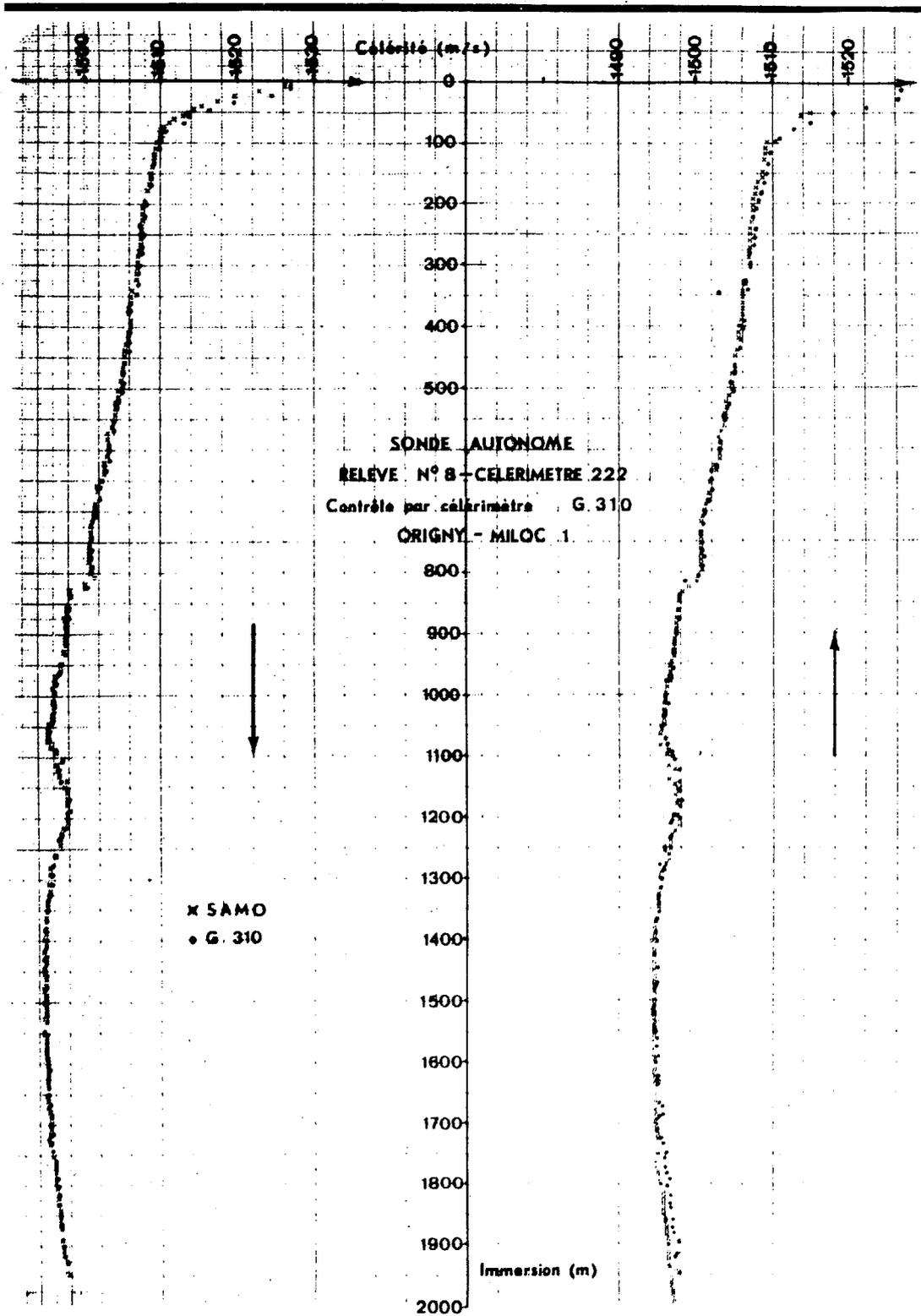


Fig. 16 : S. A. M. 0. célérogramme avec contrôles par G 310.

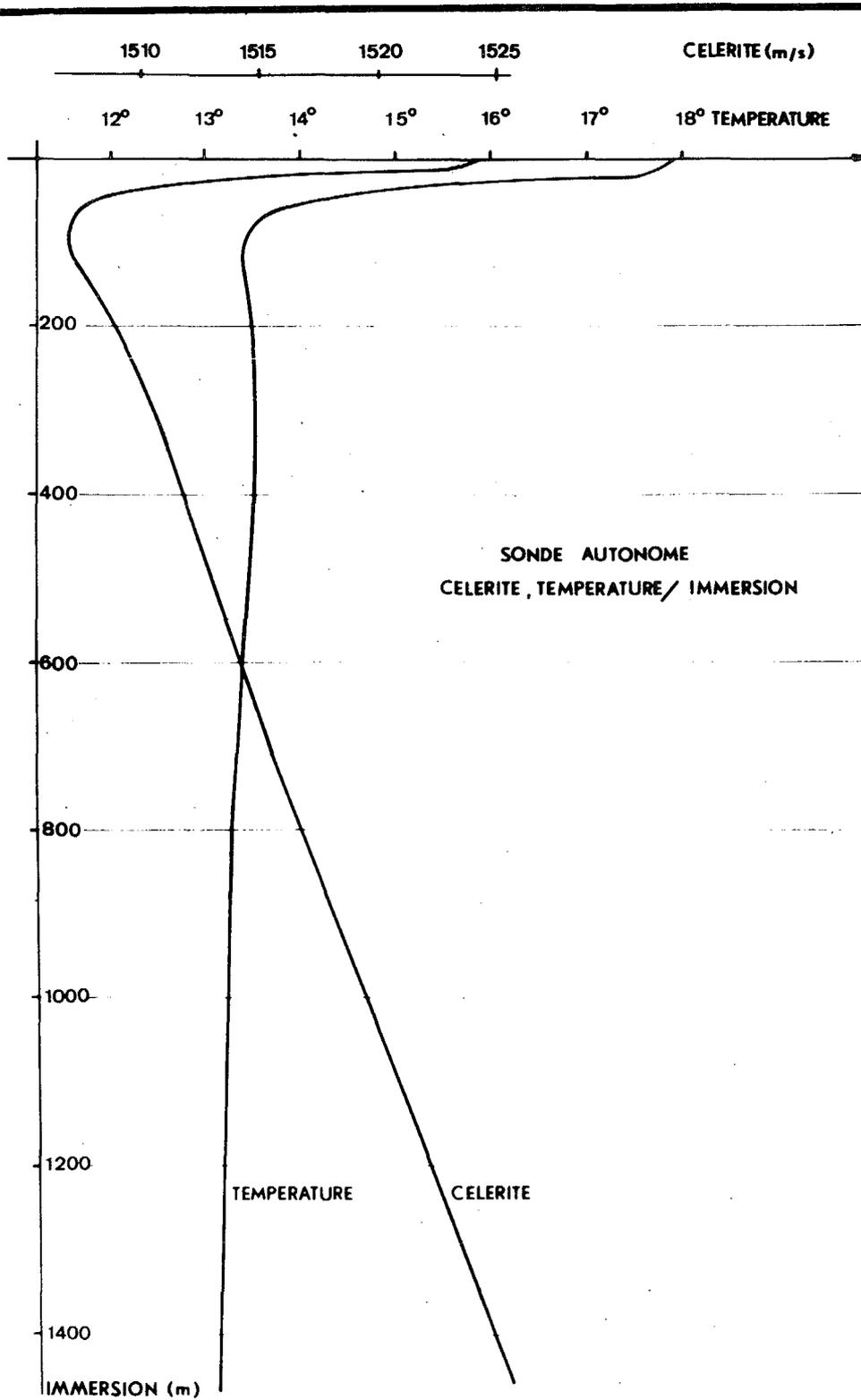


Fig. 17 : S. A. M. O. Bathythermogramme - Céléri-gramme simultanés.



on prévoit de la porter à 5 000 mètres en version industrielle. Au cours du voyage qu'elle effectue à une vitesse moyenne de 2 m/s la sonde enregistre environ 4000 points de mesure à la cadence de 4 toutes les 5 secondes.

La fig. 14 représente schématiquement l'organisation d'ensemble. La sphère de mesure, métallique, est placée à la partie inférieure ; elle supporte les capteurs et contient les circuits de mesure et d'enregistrement. Immédiatement au-dessus se trouvent les batteries logées dans une sphère en verre Pyrex elle-même placée sur un support interchangeable, ensuite on distingue une sphère flotteur et à la partie supérieure une autre sphère en Pyrex contenant un flash électronique et un émetteur de radio-gonométrie.

Les fig. 15 et 16 donnent deux profils de célérité obtenues par dépouillement des enregistrements numériques. En 15 figurent également les points de contrôles hydrologiques et en 16 les résultats fournis par un bathycélérimètre classique. Enfin sur la fig. 17 sont tracés les relevés simultanés de la température et de la célérité en fonction de l'immersion.

6. CONCLUSION

Dans la physique des mers on essaie de déterminer très exactement certaines grandeurs comme fonction de lieu et comme fonction de temps. On exige une grande précision de ces mesures et



et l'on est obligé d'utiliser un grand nombre de données. On cherche l'élaboration de capteurs délivrant les informations sous une forme qui facilite et allège le traitement.

On donne quelques méthodes de mesure de trois grandeurs intéressantes en acoustique sous-marine : température, célérité et pression.



BIBLIOGRAPHIE

- [1] Centre National de l'Automatisme - Oct. 1964
"Les capteurs de mesure".
- [2] M. COANTIC - "Les interactions atmosphère -
océan -" Cahiers océanographiques - Janvier 69
p. 17-46
- [3] La Pyrométrie industrielle - "Les détecteurs
pyrométriques" 2ème édition.
- [4] HEWLETT - PACKARD - "Instrumentation 1968"
p. 623
- [5] B. GRANVEAUX - C. JEANNIN - "Profils célérimé-
triques" C.R. interne N° 16 056 DSM-B
- [6] T.F. HUETER - R.H. BOLT - "Sonics" p. 436-438
- [7] H.B. HUNTRINGTON- "Supersonic Delay lines"
M.I.T. "Radiation laboratories Series"
Tome 17 p. 218
- [8] GREFFARD - "Etude de la propagation du son
dans les sédiments" - Cahiers Océanographiques
(février 1969)
- [9] Dr J.P. den HARTOG - "Vibrations et mouvements
vibratoires" Dunod Ed.
- [10] W.E. ABBOTTS - "The Solartron Transdeptor"
International Hydrographic Review - Vol. XL
N°2 Juillet 1963.