



## TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 7 au 12 mai 1973

---

DETECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

---

I.S.C. PRATET

---

**RESUME**

Après avoir rappelé que le problème essentiel en détection magnétique en mer est actuellement de pouvoir utiliser toute la sensibilité des détecteurs, on donne un aperçu des études en cours, en ce qui concerne la réduction du champ magnétique terrestre sur de larges zones en mer et les variations du champ magnétique dues à la houle. On décrit en particulier les mesures effectuées pour l'étude de ces derniers phénomènes.

**SUMMARY**

As a reminder, the main problem in magnetic detection at sea is, at the present time, the use of the full sensitivity of the detectors.

Examples are given of the researches now in progress concerning the reduction of the terrestrial magnetic field on large areas at sea and the variation of the magnetic field due to the swell. Emphasis is laid on the measuring made in view of the study of these phenomena.



## DETECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

---

### I - INTRODUCTION -

Les performances relativement modestes des premiers appareils de détection magnétique a, pendant longtemps, limité le traitement du signal obtenu à un simple filtrage destiné à limiter au maximum le bruit propre de l'appareil, tout en constituant une adaptation sommaire du signal utile. Le bruit propre était en effet, pour ces appareils, souvent supérieur au bruit ambiant constitué essentiellement par les variations naturelles du champ magnétique terrestre. La mise au point de détecteurs magnétiques à grande sensibilité (magnétomètre type fluxgate, à lames minces, à résonance magnétique nucléaire (RMN), à pompage optique, variomètre à aimant, etc...) a permis d'étudier d'une manière plus fine les variations du champ magnétique terrestre et d'envisager des méthodes efficaces de traitement du signal pour utiliser toute la sensibilité des appareils. Le problème est d'autant plus important que de nouveaux progrès sont réalisés (amélioration des appareils existants, mise au point de nouveaux détecteurs (magnétomètres à superconducteurs, par exemple)) et se poursuivront.



## DETECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

---

Nous allons étudier ici quels sont les problèmes à résoudre d'abord pour la détection sous-marine par des moyens fixes (magnétomètres posés sur le fond de la mer), puis par des moyens mobiles (magnétomètres remorqués) et nous ferons le point des études en cours.

### II - DETECTION MAGNETIQUE PAR DES MAGNETOMETRES FIXES -

Le but recherché est de détecter et éventuellement de localiser tout objet ferromagnétique en déplacement dans une zone la plus grande possible autour du détecteur. Le problème essentiel est de pouvoir utiliser toute la sensibilité des magnétomètres actuellement disponibles. On dispose actuellement de capteurs mesurant les composantes horizontales du champ magnétique (variomètre à aimant) et le module (magnétomètre à résonance magnétique nucléaire, RMN) dont les sensibilités sont de l'ordre de  $\frac{1}{50} \gamma$  à  $\frac{1}{100} \gamma$  (1). Or, les variations naturelles du champ magnétique terrestre, dans la bande passante considérée pour la détection, peuvent atteindre  $10 \gamma$  en période d'orage magnétique. De plus, des phénomènes locaux peuvent venir se superposer, c'est le cas en particulier des variations de champs magnétiques créés par les déplacements d'eau de mer conductrice sous l'effet des courants ou de la houle. Nous allons voir quelles sont les études en cours pour essayer de s'affranchir de ces bruits magnétiques.

$$(1) - 1 \gamma = 10^{-2} \text{ mG} = 1 \text{ nT}$$

DETECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL2.1 - Etude du gradient des variations du champ magnétique en mer - Essais de réduction -

Le but est d'étudier la corrélation spatiale des variations du champ magnétique terrestre sur de larges zones. On sait que les sources de perturbations créant les variations rapides du champ magnétique terrestre sont suffisamment éloignées pour que, théoriquement, ces variations soient identiques sur de très larges zones. On devrait donc pouvoir, en utilisant un détecteur de référence dans la zone, éliminer par simple différence ces variations sur les autres détecteurs. En fait, ceci n'est vrai que si la zone est parfaitement homogène sur le plan géomagnétique et s'il n'existe pas d'effets particuliers dus à des discontinuités de milieu (effets de fond, effets bord de mer).

L'étude de la corrélation spatiale du champ magnétique en mer et des effets bord de mer a été confiée par la D.R.M.E. à Monsieur MOSNIER de l'Ecole Normale Supérieure. Ces études sont menées, depuis 1970, dans les régions de QUIBERON et de BREST en collaboration avec le Groupe d'Etudes Sous-Marines de l'Atlantique (G.E.S.M.A.).

Pour ces mesures on utilisait des variomètres à aimant très sensibles (0,02 à 0,05  $\gamma$ ) permettant d'obtenir les variations des composantes H (N - S) et D (E - W) du champ magnétique terrestre. Plusieurs stations installées à l'intérieur des terres (GRANDCHAMP dans la région de QUIBERON et SAINT-RENAN dans la région de BREST) et sur des îles



## DETECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

---

(BELLE-ILE et OUESSANT) ont permis d'étudier les gradients  $\Delta H$  et  $\Delta D$  sur de grandes distances entre des points situés à terre et en mer. Toutes ces mesures ont montré (1) :

1° - que l'effet "bord de mer" dû à la présence de courants telluriques dans la masse d'eau au voisinage de la côte était un effet très localisé et sensible uniquement sur une bande de quelques kilomètres de part et d'autre de la côte et lorsqu'il s'agit d'une discontinuité importante de profondeur ;

2° - que la polarisation (N - E à BELLE-ILE, N à OUESSANT) du vecteur représentant le gradient horizontal du champ était due probablement à la structure géologique profonde de la zone ;

3° - que sur des distances de quelques kilomètres, on peut obtenir une excellente corrélation spatiale des variations naturelles du champ magnétique (96 à 98 %). Cette corrélation pourrait être améliorée si on pouvait choisir l'emplacement des stations et les composantes mesurées pour tenir compte de la polarisation des phénomènes.

Les études de Monsieur MOSNIER se poursuivent pour essayer de préciser les chiffres obtenus, de confirmer les hypothèses, d'effectuer une étude détaillée sur une vaste zone afin de déceler d'éventuelles anomalies et de définir des critères de choix pour les points de référence.

Compte tenu des résultats déjà obtenus,



## DETECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

---

on peut envisager d'effectuer une "réduction" des mesures magnétiques en mer en utilisant une station de référence distante de quelques kilomètres. En effectuant une simple différence entre la station de mesures et la station de référence, on peut espérer réduire dans des rapports de l'ordre de 1 à 50 ou 1 à 100 les variations naturelles du champ magnétique terrestre. Il n'est pas impossible de penser qu'une étude plus détaillée des phénomènes et un traitement mieux adapté qu'une simple différence permettent ultérieurement d'obtenir de meilleurs résultats.

Toutes les études ci-dessus ont été faites avec des magnétomètres non immergés, ce qui a permis de s'affranchir d'effets locaux dus aux mouvements de l'eau de mer et dont nous allons parler maintenant.

### 2.2 - Variations du champ magnétique dues à la houle

L'existence de variations du champ magnétique liées aux déplacements de l'eau de mer sous l'action de la houle a été envisagée depuis longtemps (2) et des études théoriques basées sur des modèles simplifiés (mer de profondeur infinie ou très grande devant la longueur d'ondes de la houle, houle sinusoïdale, etc...) ont été faites (3), (4), (5), (6). Plus récemment, des mesures expérimentales ont été effectuées (7), (8). Ces mesures ont en général donné des ordres de grandeur prévus par la théorie. Ces mesures sont très délicates à faire et les résultats obtenus doivent être soigneusement



## DEFLECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

---

analysés. Nous avons nous-mêmes réalisé des mesures pour compléter les résultats obtenus. Après un rapide rappel des résultats de la théorie et une description sommaire de la méthode de mesures, nous donnerons quelques exemples de résultats expérimentaux et nous verrons comment on peut espérer s'affranchir de ces phénomènes qui risquent de limiter la sensibilité des magnétomètres.

### 2.21 - Rappel des résultats théoriques -

L'analyse théorique détaillée du phénomène débordant le cadre de cet exposé, nous ne ferons que rappeler brièvement les résultats. Des études théoriques sur modèles simples, telles qu'elles sont faites dans les documents de référence (3), (4), (5), (6), montrent qu'en présence de houle on doit observer des variations de champ magnétique périodiques dont la période est celle de la houle et l'amplitude fonction de la longueur d'onde, de la période, de la direction de propagation (par rapport au champ magnétique terrestre) de la houle, de la hauteur d'eau, de la conductivité de l'eau de mer et du fond.

Il est possible de donner un ordre de grandeur du phénomène. Pour une houle de période moyenne de 10 secondes et pour une hauteur d'eau de 30 mètres, on a sur le fond des variations de champ magnétique de l'ordre de 1% par mètre de houle en surface.



2.22 - Description sommaire du dispositif expérimental -

La difficulté essentielle des mesures réside dans la nécessité de s'assurer que les variations de champ magnétique observées ne sont pas dues à des origines différentes de celles étudiées (déplacement de capteurs sous l'action de la houle dans le champ magnétique terrestre pour des capteurs directs (barres fluxmètre par exemple) ou simplement pour des capteurs ne possédant pas de propriété omnidirectionnelle excellente, déplacement sous l'action de la houle d'un objet ferromagnétique au voisinage du capteur (câble de liaison par exemple), etc...).

Pour nos mesures, nous avons choisi des capteurs d'excellente qualité réalisés par l'équipe de Monsieur SALVI du CENG/LETI (magnétomètre à RMN monté en oscillateur avec une sonde omnidirectionnelle (moins de 0,1% dans une rotation de 360° dans tout l'espace)).

L'équipement comprenait :

- un ensemble de deux sondes distantes de 1,5 m, montées dans une enceinte étanche cylindrique contenant également l'électronique associée aux sondes (oscillateur VHF et amplificateur de boucle). L'enceinte étanche était fixée sur un trépied entièrement amagnétique fortement lesté (voir la photographie N° 1). Cet ensemble permettait donc de mesurer le champ magnétique et son gradient vertical ;



## DETECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

---

- un ensemble autonome de mesures et d'enregistrement (photographie N° 2) contenant le fréquencesmètre des magnétomètres, l'enregistreur magnétique, le système de programmation et de commande des mesures et les batteries d'alimentation ; un capteur de pression permettait en outre d'enregistrer les variations de pression sur le fond dues à la houle. Cet ensemble était mouillé à 60 mètres du trépied et relié à celui-ci par câble (liaison réalisée par plongeur à l'aide de prises enfichables sous l'eau).

L'équipement complet a été immergé du 30.10.72 au 14.11.72 sur des fonds de l'ordre de 26 mètres (au zéro des cartes) et a fonctionné 4 heures par jour pendant toute la durée du mouillage.

### 2.23 - Résultats obtenus -

Nous ne donnerons que les principaux résultats. Les dépouillements, très longs, ont permis d'obtenir les fonctions d'autocorrélation des signaux correspondants aux variations de pressions sur le fond, aux variations du champ magnétique et de son gradient vertical, et les fonctions d'intercorrélation de ces signaux (la planche 1 donne un exemple d'enregistrement obtenu et la planche 2 quelques exemples de fonctions de corrélation des signaux). Pour obtenir ces fonctions, nous avons utilisé un corrélateur en temps réel CTR 200 (licence CEA) associé à un transformateur de Fourier TPN 1024 dont nous utilisons la mémoire pour effectuer une post-intégration, la constante de temps du corrélateur

DETECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

étant trop faible pour la gamme de fréquences des signaux. On pourra noter sur la planche 1 la parfaite similitude des trois signaux et sur la planche 2 la similitude entre la fonction d'autocorrélation par exemple de la houle et la fonction d'intercorrélation Houle-Champ magnétique (au décalage d'origine près qui provient du décalage dans l'espace des deux capteurs). Ceci confirme l'excellente corrélation des signaux dus aux variations de pression et du champ magnétique.

Nous avons également effectué une analyse spectrale des signaux en utilisant d'une part la transformée de Fourier des fonctions de corrélation, et d'autre part l'analyse obtenue à l'aide d'un analyseur fin (Ubiquitus UA 6 B) en effectuant une transposition de fréquence par multiplication de la vitesse de lecture de la bande magnétique d'enregistrement.

Un exemple de spectre obtenu est donné sur la planche 3, on peut comparer ces résultats avec ceux donnés par FRASER (8) et reproduit sur la planche 4.

Les résultats obtenus sont proches de ceux prévus par la théorie, sauf pour le gradient vertical qui paraît plus important que prévu (il n'a pas été possible pour l'instant de trouver une interprétation ou une explication à cet écart).



## 2.24 - Solutions envisagées pour s'affranchir du bruit magnétique dû à la houle -

On peut envisager deux solutions :

- la première repose sur la constatation que le signal utile (signal dû à l'objet ferromagnétique) en déplacement a un spectre dans la gamme de celui de la houle lorsque l'objet est proche, mais dans ce cas il possède une amplitude grande par rapport au signal dû à la houle, et voit son spectre se décaler vers les basses fréquences lorsque l'objet s'éloigne. Il suffit donc de réaliser un filtre passe-bas adapté à l'évolution du signal utile en fonction de la distance de l'objet à détecter. Ce filtre atténuera les signaux parasites dus à la houle, il atténuera le signal utile lorsque l'objet ferromagnétique sera proche mais dans ce cas le rapport signal sur bruit restera toujours grand et il conservera le signal utile lorsque l'objet sera loin. En fait, il sera nécessaire de vérifier que ce filtre est compatible avec la réduction des variations naturelles dont nous avons parlé au paragraphe 2.1 et qui ont une amplitude d'autant plus grande que la fréquence est faible (6 db/Octave environ).

De plus, cette solution présente l'inconvénient d'interdire tout espoir de détection d'un objet faiblement magnétique même en zone proche.

- la deuxième solution peut être recherchée en utilisant le fort gradient vertical des signaux dus à la houle. Il faut avant tout s'assurer

DETECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

de cette propriété. De nouvelles mesures sont prévues dans ce but et la recherche d'une interprétation est à l'étude.

III - DETECTION MAGNETIQUE A L'AIDE DE MAGNETOMETRES REMORQUES -

L'utilisation de magnétomètres remorqués derrière un bâtiment pour la détection d'objets ferromagnétiques fixes (épaves) ou mobiles, nécessite, comme dans le cas précédent, l'emploi d'un signal de référence pour la réduction des variations temporelles du champ magnétique terrestre. Il existe dans ce cas des signaux parasites supplémentaires dus aux variations des caractéristiques magnétiques du fond de la mer. En fait, les objets que l'on cherche à détecter sont toujours beaucoup plus localisés que les accidents géologiques et, de ce fait, possèdent un gradient spatial plus important. C'est par l'intermédiaire de ce gradient que l'on peut traiter le signal pour faire apparaître soit les anomalies magnétiques dues à la géologie, soit celles dues à des objets ferromagnétiques particuliers. Les études ne sont pas suffisamment avancées et les résultats suffisamment nombreux pour que l'on puisse actuellement dire quelle sera la meilleure solution.

Afin de recueillir le maximum d'éléments, le G.E.S.M.A. a développé deux systèmes remorqués, l'un mesurant le gradient horizontal du champ et l'autre le gradient vertical. Ce dernier système pourrait être très intéressant pour la prospection



## DETECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

---

puisqu'il permet d'avoir directement la carte dite de "la dérivée première" du champ que l'on est obligé autrement de calculer à partir de la carte du champ, ce qui n'est faisable en général qu'en temps différé à cause des moyens importants de calcul nécessaires.

### IV - CONCLUSION -

Nous avons essayé de faire un rapide survol de la détection magnétique en mer en précisant les méthodes utilisées ou envisagées, les études en cours et surtout les difficultés rencontrées.

On peut conclure en disant que la détection magnétique a été et est actuellement encore essentiellement un problème traité par des physiciens et des expérimentateurs, mais que de plus en plus il faudra que des spécialistes du traitement du signal viennent apporter leur soutien à cette technique en pleine évolution. Il existe certainement dans ce domaine de grandes possibilités pour le développement de recherches originales.



DETECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

---

REFERENCES

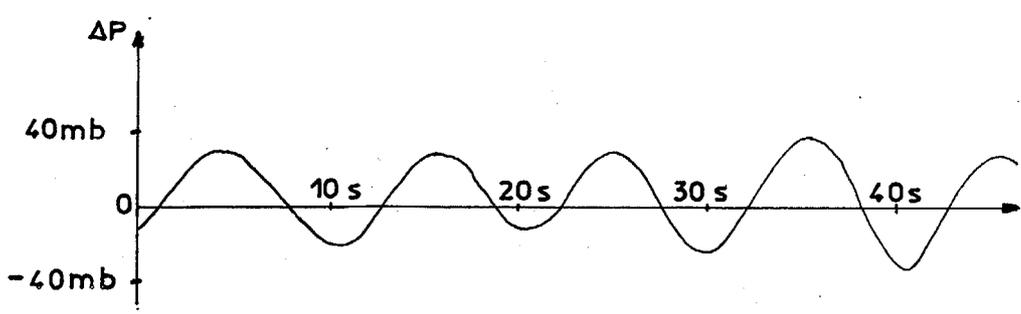
- (1) - MOSNIER - (E.N.S.) - Rapport final du contrat  
D.R.M.E. 70.34.329.00.480.75.01
- (2) - F.B. YOUNG, H. GERRARD and W. JEVONS - "On electrical disturbances due to tides and waves" -  
Phil. Mag. 40 p. 149 - July 1920
- (3) - A. GREWS and FUTTERMAN - "Geomagnetic micropulsation due to the motion of ocean waves" - Journal  
of geophysical research - Vol. 67 - January 1962 -  
Number 1 - p. 299 - 306
- (4) - Fred WARBUSTON and Richard CAMINITI - "The induced magnetic field of sea waves" - Journal of Geophysical Research - Vol. 69 - N° 20 - October 15,  
1964 - p. 4311 - 4318
- (5) - J.T. WEAVER - "Magnetic variations associated with ocean waves and swell" - Journal of Geophysical Research - Vol. 70 - N° 8 - April 15, 1965 -  
p. 1921 - 1929
- (6) - M. KLEIN - "Influence du milieu sur les mesures magnétiques en magnéto-tellurique Marine" - Thèse doctorat 3ème cycle présentée à la Faculté des Sciences de PARIS



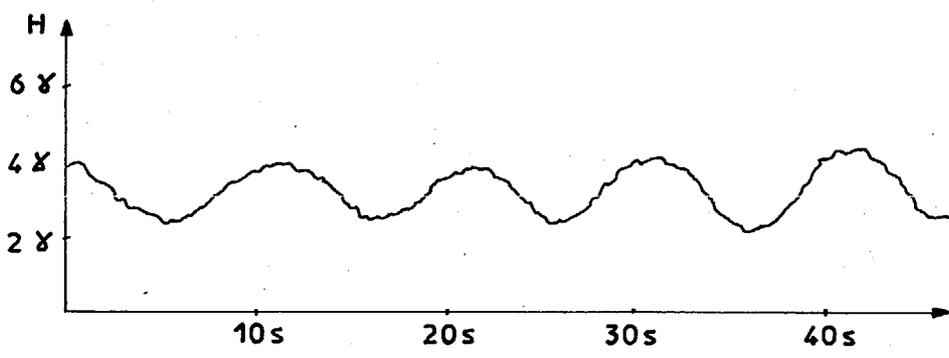
DETECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

---

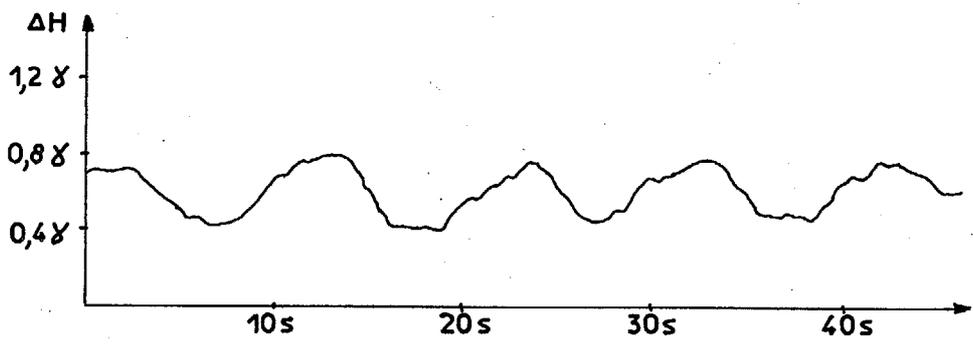
- (7) - K.C. MACLENE, R.A. HAFER, J.T. WEAVER - "Magnetic variations produced by ocean swell" - Nature - Vol. 204 - December 26 - 1964 - p. 1290 - 1291
- (8) - D.C. FRASER - "Experiments to measure the magnetic fields of ocean waves in shallow water" - Proceedings of the IERE Conference on Electronic Engineering in Oceanography - 12th to 15th September 1966

DETECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

a) Variation de pression sur le fond



b) Variation du champ magnétique



c) Variation du gradient vertical du champ magnétique

PLANCHE 1: Exemple d'enregistrement



DETECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL



PHOTO N° 1 - Ensemble magnétométrique monté  
sur son trépied

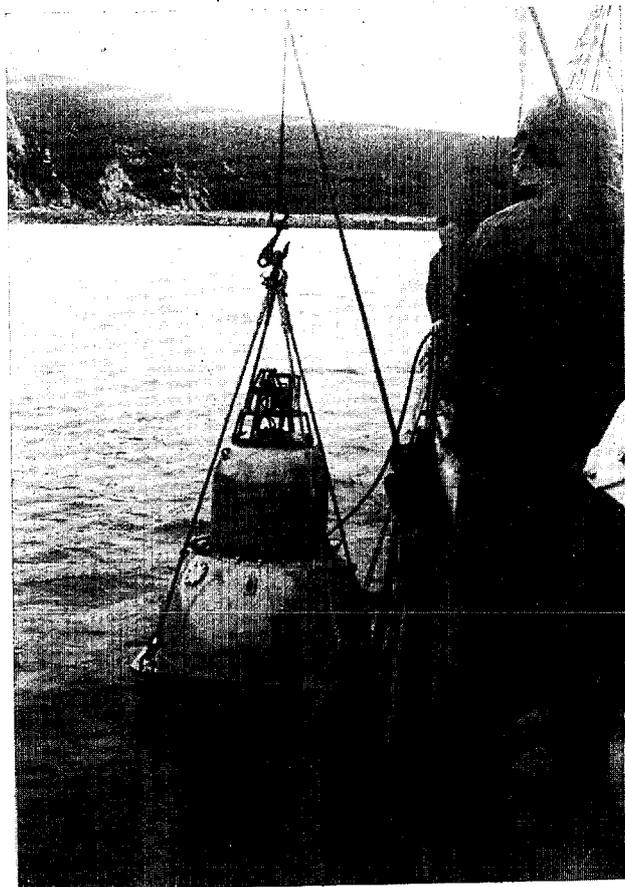
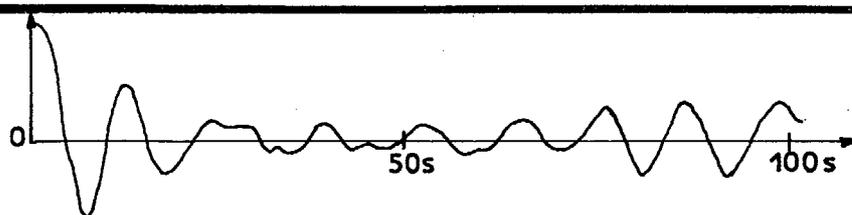
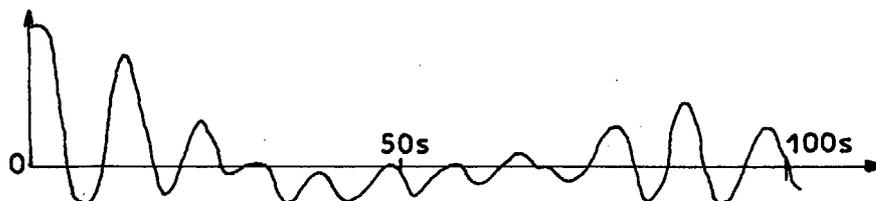


PHOTO N° 2

Ensemble autonome  
de mesures et d'en-  
registrement

DETECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNALa) Fonction d'autocorrélation de  $\Delta P$ 

b) Fonction d'autocorrélation de H

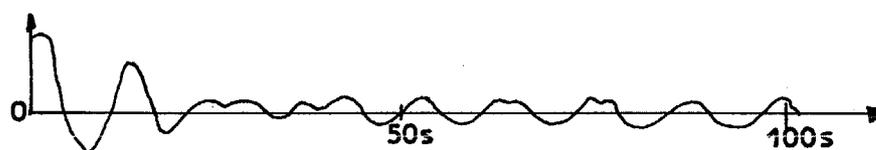
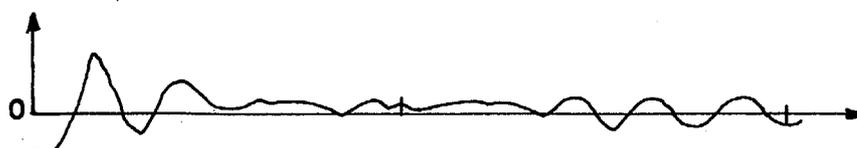
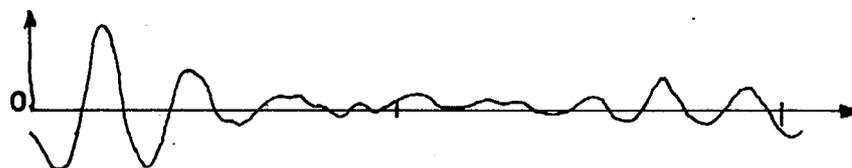
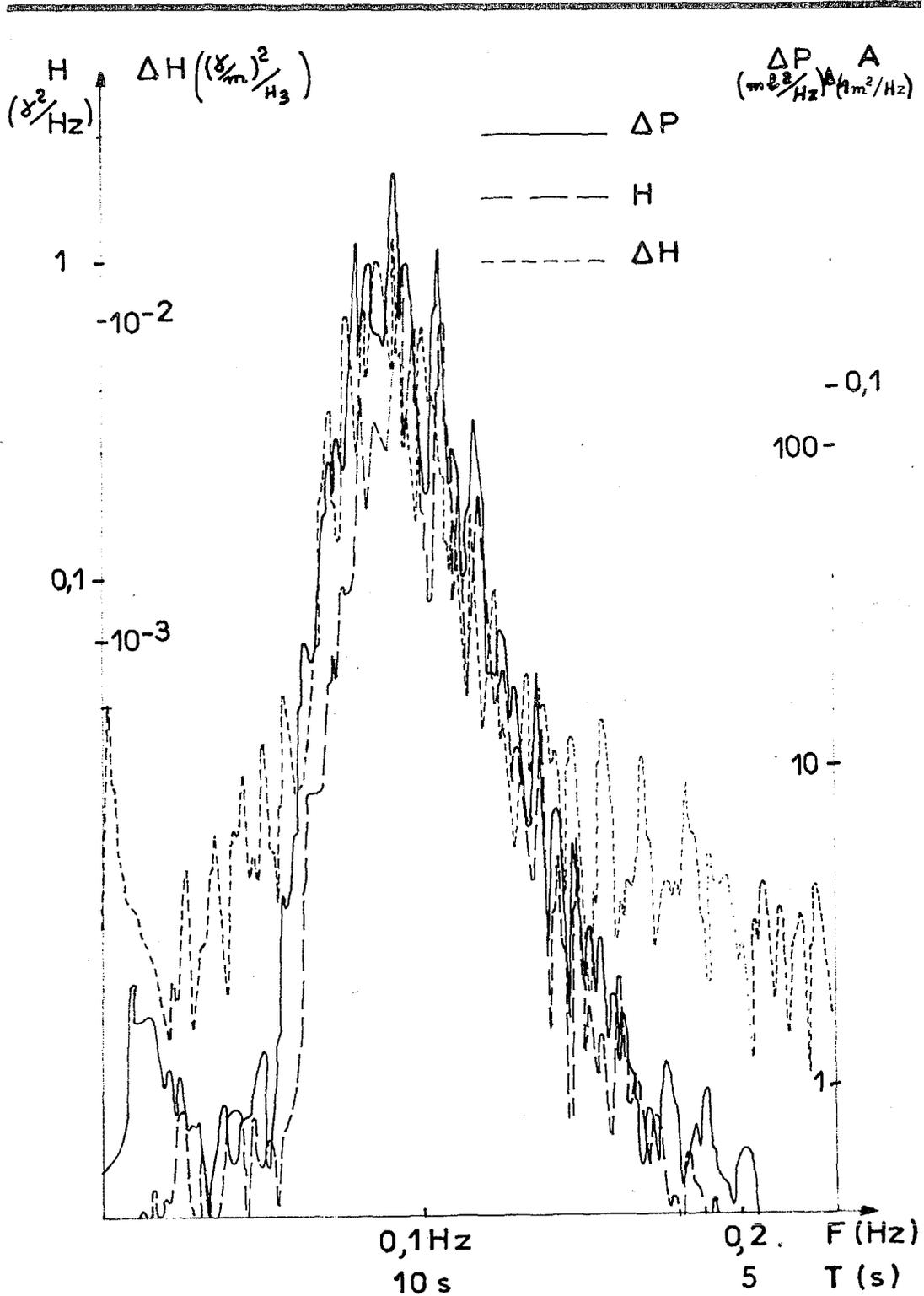
c) Fonction d'autocorrélation de  $\Delta H$ d) Fonction d'autocorrélation de  $\Delta P_H$ e) Fonction d'autocorrélation  $\Delta P_{\Delta H}$ 

PLANCHE 2: Exemple de fonctions de corrélation  
des signaux de variation de pression,  
de champ magnétique et de gradient du  
champ magnétique (retard incrémental  $\tau=0,5s$ )



DETECTION MARITIME ET TRAITEMENT DU SIGNAL



**PLANCHE 3: Exemple de spectres obtenue**

$A$  = amplitude théorique de la houle en surface d'après  $\Delta P$

DETECTION MAGNETIQUE ET TRAITEMENT DE SIGNAL

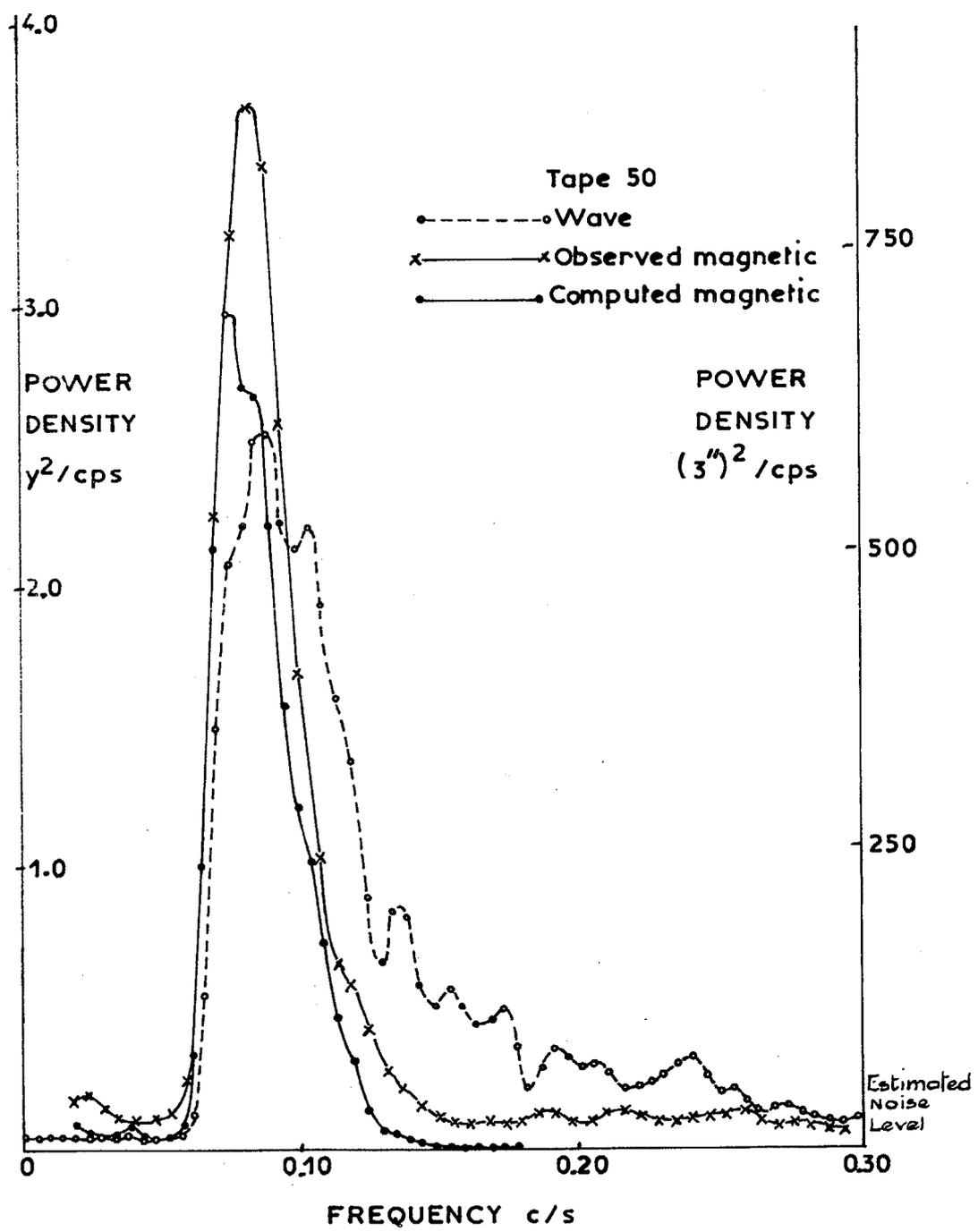


PLANCHE 4 - Wave and Magnetic spectra  
By FRASER (Ref. 8)