



Note Technique LETI/MA n° 1059

COMMISSARIAT
A L'ENERGIE
ATOMIQUE

CEA-CONF--2983
FR7501165
EQUIPEMENTS REMORQUES POUR LA PROSPECTION
ET LA DETECTION MAGNETOMETRIQUE EN MER

A. SALVI
P. LEMERCIER
F. ROBACH
G. PRETET (Marine Nationale
Proct)

CENTRE D'ÉTUDES NUCLÉAIRES
DE GRENOBLE

LABORATOIRE
D'ELECTRONIQUE
ET DE
TECHNOLOGIE
DE L'INFORMATIQUE

C.E.A. - C.E.N.-G

le 12 Novembre 1974

Laboratoire d'Electronique et de
Technologie de l'Informatique

INLS

Division de Magnétométrie

~~2~~ Colloque International sur
l'Exploitation des Océans
BORDEAUX - 1er au 4 Octobre 1974

Note Technique LETI/MA n° 1059

CEA-COWF--2983

EQUIPEMENTS REMORQUES POUR LA PROSPECTION

ET LA DETECTION MAGNETOMETRIQUE EN MER

A. SALVI
P. LEMERCIER
F. ROBACH
G. PRETET (Marine Nationale
Brest)

1 - INTRODUCTION

Cet exposé est consacré aux mesures de champ magnétique terrestre en mer. Nous verrons brièvement quelles sont les exigences de ces mesures et ce qu'elles apportent ; puis les différents types d'appareillages et plus particulièrement les magnétomètres à double résonance. Ces appareils sont incorporés dans divers équipements destinés à l'exploration des fonds marins dont le fonctionnement sera illustré, en conclusion, par quelques résultats.

2 - LES MESURES DE CHAMP MAGNETIQUE EN MER

Les mesures de champ magnétique sont devenues faciles grâce aux méthodes de résonance magnétique nucléaire.

La résonance magnétique nucléaire assure une conversion de l'intensité du champ magnétique en une fréquence suivant la relation :

$$\omega = 2\pi f = \gamma H$$

où γ est une constante physique, H l'intensité du vecteur champ magnétique et f la fréquence d'un signal sinusoïdal.

La simplicité des mesures est due au fait que l'on est ramené à une mesure de fréquence, ce qui est facile et peut être très précis. Actuellement, certains appareils affichent le $1/100\gamma$, c'est-à-dire $10^{-7}\omega$, ce qui représente le millionième de la valeur du champ terrestre.

La simplicité des mesures est également due au fonctionnement omnidirectionnel du capteur. Il n'y a plus les problèmes d'orientation qui rendaient délicates les mesures classiques de composantes du champ magnétique. Le capteur d'un magnétomètre à champ total peut aisément être remorqué par un bateau.

Un magnétomètre à résonance magnétique permet donc de mesurer, de façon simple et précise, le champ magnétique terrestre et de mettre ainsi en évidence des anomalies locales.

3 - INTERET DES MESURES MAGNETIQUES EN MER

Pratiquées à grande échelle, les mesures magnétiques apportent des renseignements géophysiques utiles en prospection minière et pétrolière. Elles permettent de déterminer des contrastes de teneurs en minéraux ferromagnétiques dans les roches, ou encore de préciser la topographie de roches uniformément aimantées, dissimulées par un revêtement de roches sédimentaires peu magnétiques,

A petite échelle, certaines études de génie civil maritime s'apparentent aux mesures géophysiques précédentes mais, en mer, la magnétométrie permet surtout de résoudre des problèmes de localisation d'objets. Il peut s'agir aussi bien de détection d'épaves que de recherches d'outillages perdus, ou encore de surveillance d'équipements immergés.

Les objets recherchés sont alors des sources magnétiques, généralement bien localisés, produisant des effets essentiellement liés à leur distance. L'amplitude de l'anomalie décroît en $1/r^3$, r étant la distance entre la source et le point de mesure. Elle ne dépend pas du milieu dans lequel l'objet est enfoui - (figure 1) - Cette loi de décroissance rapide des effets magnétiques explique pourquoi il est important de se rapprocher des sources et montre l'intérêt des équipements permettant une mesure en milieu marin.

Une autre limitation importante provient de la variation au cours du temps, du champ magnétique terrestre. Au champ magnétique fonction du lieu, se superpose une agitation magnétique, une fluctuation qui fait partie de la variation diurne du champ magnétique terrestre et qui limite au gamma la sensibilité effective des magnétomètres.

Pour s'affranchir de cette limitation, avec des appareils peu sensibles, la seule solution consiste à se rapprocher suffisamment des sources, solution contraignante car il faut explorer la zone d'intérêt avec une maille de petite dimension, solution coûteuse en temps et qui demande une navigation précise.

Une autre solution, qui exploite de manière efficace les possibilités des capteurs à haute sensibilité, est fondée sur des mesures différentielles. Les fluctuations du champ magnétique terrestre sont, à l'échelle des problèmes de localisation, les mêmes en tout point. Par mesure différentielle, on élimine ces fluctuations et on gagne un facteur de l'ordre de 10 en sensibilité effective.

Les mesures différentielles peuvent être envisagées sous plusieurs formes :

- la première consiste à implanter une station de référence en un point fixe et à enregistrer le champ magnétique, de manière à faire une différence de résultats entre les enregistrements du bateau qui remorque un capteur et ceux de la station de référence après la campagne de mesure.

- la seconde manière consiste à transmettre, par un moyen radio approprié, l'information de la station de référence au bateau qui assure la mesure du champ et en temps réel la différence. Cette solution est naturellement préférable, si l'on souhaite pouvoir, le cas échéant, adapter la navigation aux résultats obtenus.

- dans une troisième configuration, le capteur de référence fixe est remplacé par un capteur mobile. Le bateau remorque alors deux capteurs espacés d'une distance constante. La mesure différentielle s'apparente alors à une mesure de gradient. En fonction de la nature des sources visées et de l'espacement des capteurs, on pourra alors parler ou non de gradient. D'un point de vue pratique ces mesures se font directement, à partir du bateau, en temps réel, ce qui est un avantage. D'un point de

vue théorique, des mesures de gradient peuvent préciser la position des sources car on a, pour un dipôle magnétique, une relation du type :

$$x \frac{\delta \Delta H}{\delta x} + y \frac{\delta \Delta H}{\delta y} + z \frac{\delta \Delta H}{\delta z} = - 3 \Delta H$$

où ΔH est l'anomalie du champ mesurée, en un point de coordonnées x, y, z , provoquée par un dipôle placé à l'origine des coordonnées.

La connaissance de trois gradients et de l'anomalie du champ magnétique fixe à tout instant la position de la source.

Avec de telles mesures différentielles on peut aller plus loin, c'est-à-dire trouver des objets faiblement magnétiques ou plus vite, grâce à un maillage plus lâche et une navigation moins précise. Cette amélioration résulte d'un progrès au niveau des appareils de magnétométrie que nous allons passer rapidement en revue.

4 - LES APPAREILS DE MESURE

Trois types d'appareils sont utilisés pour les mesures d'intensité du champ magnétique, par des phénomènes de résonance, ce sont :

- magnétomètre à protons ou à précession libre
- les magnétomètres à double résonance
- les magnétomètres à pompage optique.

Les magnétomètres à protons sont les mieux connus, ils sont largement utilisés en mer, à cause de leur robustesse et de leur faible coût. Leur principal défaut est une manque de sensibilité.

Les magnétomètres à pompage optique sont beaucoup plus sensibles, - ils affichent couramment le centième de gamma - mais présentent souvent des défauts liés à l'orientation du capteur par rapport au champ ; ils ne sont pas couramment employés en mer, vraisemblablement pour des raisons de coût et de manque de robustesse.

Les magnétomètres à double résonance protons-électrons sont des magnétomètres développés au Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble qui paraissent bien adaptés aux problèmes marins. Sans être aussi simples que les classiques magnétomètres à protons, ils sont robustes et d'une sensibilité comparable aux magnétomètres à pompage optique et ils se prêtent bien à la réalisation de mesures différentielles.

4.1. Le magnétomètre à double résonance

A la base de tous les magnétomètres à champ total, on trouve le phénomène physique de résonance magnétique : résonance magnétique nucléaire dans le cas de la précession libre, résonance magnétique électronique dans le pompage optique.

Le phénomène de résonance magnétique nucléaire se produit pour des noyaux dotés à la fois d'une aimantation et d'un spin. Placé dans un champ magnétique, le mouvement d'un tel noyau est un mouvement de précession dont la pulsation $\omega = \gamma H$ est rigoureusement proportionnelle au champ.

D'un point de vue pratique, la mesure de l'intensité d'un champ magnétique revient ainsi à la mesure de la fréquence de précession des noyaux. A cause de la faiblesse du champ magnétique terrestre et de l'aimantation qui lui est proportionnelle, l'observation de la précession est impossible sans artifice.

Une première solution consiste à placer l'ensemble des noyaux dans un champ fort, que l'on coupe rapidement. L'observation de la précession devient alors possible pendant une phase transitoire de retour à l'équilibre thermodynamique. La mesure est fondamentalement discontinue, il y a un temps de polarisation, un temps bref de coupure et puis la mesure. Les magnétomètres à R.M.N. classiques fonctionnent suivant ce principe de polarisation.

Un principe très différent a été découvert en 1957 par ABRAGAM, COMBRISSEON et SOLOMON [1], [2], [3] : la polarisation dynamique. Ils ont montré qu'au sein d'un liquide contenant des noyaux et des électrons en interaction, on pouvait observer en permanence dans le champ terrestre la précession des noyaux en excitant une résonance magnétique électronique. Les études faites au Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble [4], [5], principalement par A. SALVI [6] lui ont permis de réaliser un appareil opérationnel. Les mécanismes, très complexes d'interaction protons électrons [7], [8], la structure du capteur [9], [10], et le principe électronique de l'oscillateur ont fait l'objet de publications et ne seront pas développés ici. Nous noterons simplement les principaux résultats obtenus :

- tout d'abord, l'ensemble assure en permanence la conversion champ magnétique - fréquence, sans présenter le caractère discontinu des magnétomètres à précession libre.

- ce capteur permet des mesures d'une résolution de 1/100γ c'est-à-dire 50 à 100 fois supérieure à celle des appareils à précession libre les plus courants et analogue à celle des magnétomètres à pompage optique.

Pour arriver à ce résultat, diverses difficultés ont été surmontées notamment la stabilité des radicaux libres. Elle est maintenant acquise et les capteurs obtenus sont opérationnels dans la gamme de température -50°C , $+70^{\circ}\text{C}$.

- l'excellente isotropie de la sonde (inférieure à 0,1%) permet un fonctionnement du capteur indépendant de son orientation dans le champ magnétique terrestre.

- la très faible consommation du capteur (5 W) permet un fonctionnement prolongé avec une alimentation très légère.

- la fréquence de sortie comprise entre 1 et 3 kHz est facile à transmettre par radio.

Sonde et électronique associée forment un oscillateur nucléaire qui délivre un signal dont la fréquence doit être mesurée avec précision. Pour mesurer une fréquence comprise entre 1 et 3 kHz avec une précision relative de 10^{-7} et un temps de comptage de l'ordre de la seconde, on ne peut pas utiliser un fréquencemètre classique à comptage. Nous avons étudié un appareil spécifique de conception numérique [1].

Il permet de mesurer, au centième de gamma, par simple commutation, soit le champ soit la différence entre deux capteurs (figure 2).

La mesure apparaît sur une bale de visualisation.

Une sortie numérique permet l'acquisition des données sur ruban perforé ou bande magnétique.

L'informatique numérique est également convertie en une tension analogique pour l'enregistrement graphique.

Si l'appareillage présenté peut être comparé aux magnétomètres à pompage optique par sa grande sensibilité il en diffère par la simplicité et la faible consommation. Il reste analogue sur ces points aux systèmes à précession libre qui n'ont pas ses performances. Il apparaît bien adapté à la réalisation d'un ensemble de mesure à vocation marine.

4.2. Les divers équipements

Divers équipements ont été développés par le G.E.S.M.A. (Groupe d'Etudes Sous-Marines de l'Atlantique - Marine Nationale) et par le L.E.T.I. (Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Informatique - Commissariat à l'Energie Atomique) pour répondre à des besoins spécifiques. Ils sont au nombre de trois :

- A - le magnétomètre remorqué
- B - le magnétomètre et gradientmètre horizontal
- C - le magnétomètre différentiel et gradientmètre vertical.

A - Magnétomètre remorqué

Le magnétomètre remorqué est un équipement simple destiné à des mesures de champ ou des mesures de différence de champ entre une station de référence et l'ensemble embarqué.

L'équipement comporte :

- un poisson, dans lequel se trouve un oscillateur nucléaire
- un câble assurant le remorquage du poisson à une distance suffisante du bateau, pour rendre négligeables les effets magnétiques du bateau, ce câble assurant également la transmission de signaux
- un ensemble d'exploitation, à bord, comportant essentiellement un fréquencemètre et l'enregistrement graphique.

Ce système existe en plusieurs versions :

- a) une version faible profondeur destinées à l'exploration des zones côtières, estuaires de rivières, chenaux d'accès etc ...

Prévu pour une navigation en surface ou avec une immersion faible, cet ensemble a comme principal mérite un faible encombrement ; tout l'équipement poisson, câble, appareil de mesure pouvant sans difficulté être transporté dans un coffre de voiture.

b) une version grande profondeur

Le poisson, prévu pour une immersion maximale de 2000 mètres, a une longueur de 2,15 m et 0,21 m de diamètre. Il pèse 65 kilos à l'air (figure 4). Il est tracté par un câble coaxial à double armure et garnie de plomb. L'immersion du poisson est réglée par la longueur du câble filé et la vitesse du bateau. A titre d'exemple, avec 50 m de câble et 8 noeuds, l'immersion est de 9 m, avec 250 m de câble et 4 noeuds elle est de 65 m.

Le câble transmet l'alimentation du poisson et assure la remontée du signal nucléaire. Poisson et câbles sont réalisés avec des matériaux amagnétiques.

A bord, le matériel d'exploitation comporte un magnétomètre différentiel et un équipement de transmission radio permettant une réception du signal nucléaire émis par une station de référence installée à terre. L'enregistrement se fait sous forme graphique en temps réel. Une acquisition numérique des mesures sur bandes perforées permet un traitement ultérieur des résultats.

B - Magnétomètre et gradientmètre horizontal (DAM 250)

L'ensemble comporte schématiquement les mêmes éléments que précédemment. On distingue également un véhicule sous-marin, un câble de remorquage et un ensemble d'exploitation à bord.

Le véhicule sous-marin a une longueur de près de 4 mètres et pèse 400 kgs à l'air ; prévu pour opérer à une immersion maximale de 200 mètres il est doté de :

- deux capteurs, placés au bout de deux ailes, permettant la mesure du champ et du gradient horizontal
- d'un capteur de pression pour indication de l'immersion
- d'un sondeur vertical pour indication de l'altitude au-dessus du fond

- d'un sondeur horizontal pour détection d'obstacles
- d'un moteur de commande des allerons permettant de faire plonger ou remonter le poisson.

Il est possible de faire des mesures à altitude constante, pour détecter de petits objets ferromagnétiques ou des mesures à immersion constante, grâce à ce poisson remorqué par un câble dont la longueur peut varier entre 100 et 500 m, en jouant sur la vitesse du bateau et la position des allerons qui règlent facilement l'immersion. Un câble de remorquage multiconducteurs lie le poisson au bateau, où l'exploitation des résultats se fait au moyen d'un magnétomètre pour la mesure du champ et d'un magnétomètre différentiel pour celle du gradient. Cet ensemble a été conçu initialement pour des problèmes de localisation sans station de référence au sol. La mise en oeuvre de cet ensemble nécessite un bâtiment possédant des moyens de mise à l'eau et de récupération du poisson, ainsi qu'un touret susceptible de recevoir le câble.

C - Gradientmètre vertical et magnétomètre différentiel

Cet ensemble comporte comme précédemment un véhicule sous-marin, un câble de remorquage et un ensemble d'exploitation.

Le véhicule sous-marin comporte, en-dessous d'un poisson remorqué appelé poisson relais, un gréement souple maintenu vertical grâce à une aile de plongée. A ce gréement sont fixés deux poissons du même type que celui présenté dans le cadre du poisson remorqué grande profondeur (figure 6). Ces poissons sont espacés de 5 mètres, distance qui pourra être augmentée sans difficulté (figures 7, 8, 9). Les signaux nucléaires et diverses informations sont multiplexés par une électronique incorporée dans le poisson relais et transmis par un câble unique au bateau. Là, encore, l'immersion du véhicule est réglée par la longueur du câble et la vitesse du bateau. A bord, deux magnétomètres différentiels numériques assurent la mesure du gradient vertical et une mesure différentielle de champ, grâce à une station de référence au sol et une infrastructure radio. Les informations sont

visualisées par enregistrement graphique. Un dispositif de traitement des résultats, incorporant champ, gradient vertical, paramètres de navigation sera réalisé après la phase d'expérimentation du dispositif qui se poursuit actuellement.

4.3. Exemples

Utilisant le "magnétomètre remorqué" équipé du poisson faible profondeur, le laboratoire de magnétométrie du C.E.N-G a effectué, pour le compte de diverses sociétés, des repérages permettant la récupération d'épaves ou de matériel. Citons, par exemple, la localisation d'un bateau coulé au XIIIème siècle entre la Sicile et la Tunisie ou celles de filins, ancres, têtes de dragues et outillages divers perdus à Fos-Sur-Mer, au Havre ...

D'autre part, il peut être intéressant de faire l'étude systématique d'un secteur, pour acquérir des renseignements d'ordre géologique ou, plus simplement, pour rechercher toutes les épaves d'une zone, dans la phase préparatoire à un travail en mer tel que le dragage d'un chenal, un aménagement portuaire, l'installation d'une plate-forme etc ... Notre Laboratoire a ainsi effectué la détection des débris d'une épave dans l'estuaire de l'Adour et a participé, avec la Marine Nationale, à une cartographie magnétique au large de Brest. L'équipement utilisé dans ce dernier exemple était le magnétomètre remorqué équipé du poisson grande profondeur. Les figures 10 et 11 représentent les anomalies dues à l'épave du "MAGDEBOURG" en Irroise, à des distances de 60 et 300 mètres.

5 - CONCLUSION

Les mesures magnétiques en mer nécessitent un maillage serré lorsqu'on désire résoudre des problèmes de localisation d'objets magnétiques. Cette exigence sévère, liée à la rapidité de

la décroissance des effets magnétiques avec la distance, impose une exploration systématique et des campagnes longues. Par des mesures différentielles de champ magnétique, exploitant des capteurs haute sensibilité, il est possible d'augmenter la maille d'exploration et de gagner beaucoup de temps ou de repousser beaucoup plus loin les limites de détection.

Par des mesures de gradient, le déplacement du bateau est rentabilisé au maximum et des informations précises sont obtenues sur les caractères des sources.

Plusieurs dispositifs haute sensibilité permettent de travailler dans une large gamme de profondeur et de résoudre des problèmes qui vont du plus simple au plus complexe. Ces dispositifs, en constante amélioration, devraient, dans un proche avenir, contribuer à une meilleure connaissance des fonds marins.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ABRAGAM A., COMBRISSEON J., SOLOMON L., 1957
C.R Académie des Sciences Paris - 245, 157-160

- [2] SOLOMON L. 1958
Journal de Physique 19, 617-680

- [3] ABRAGAM A. 1961
Les principes du magnétisme nucléaire, 1ère édition PUF, 346

- [4] AYANT Y. 1955
Théorie quantique CNRS Paris Chap. III GRIVET 49-88

- [5] BONNET G. 1962
Annales de Géophysique 18, 62-91 et 150-178

- [6] SALVI A. 1961
Magnétomètre absolu à résonance magnétique nucléaire.
Thèse Grenoble

- [7] LANDESMAN A. 1959
Journal de Physique 20, 937.

- [8] BRIERE R., LEMAIRE H. RASSAT A., 1964
Tetrahedron Letters 27, 1775-1780

- [9] SALVI A. 1970
Revue de Physique Appliquée 5, 131-134.

- [10] SALVI A. 1971
Colloque International sur l'Exploitation des Océans
Bordeaux - Thème IV-11.

- [11] SALVI A., LEMERCIER D., LEMERCIER P., ROBACH F., 1973
Geophysical Prospecting 21, 704-715.

LISTE DES FIGURES

Figure n° 1 : Loi de décroissance des effets magnétiques en $1/r^3$

Figure n° 2 : fréquencemètre numérique

Figure n° 3 : Poisson faible profondeur

Figure n° 4 : Poisson grande profondeur

Figure n° 5 : DAM.250 - Gradientmètre horizontal

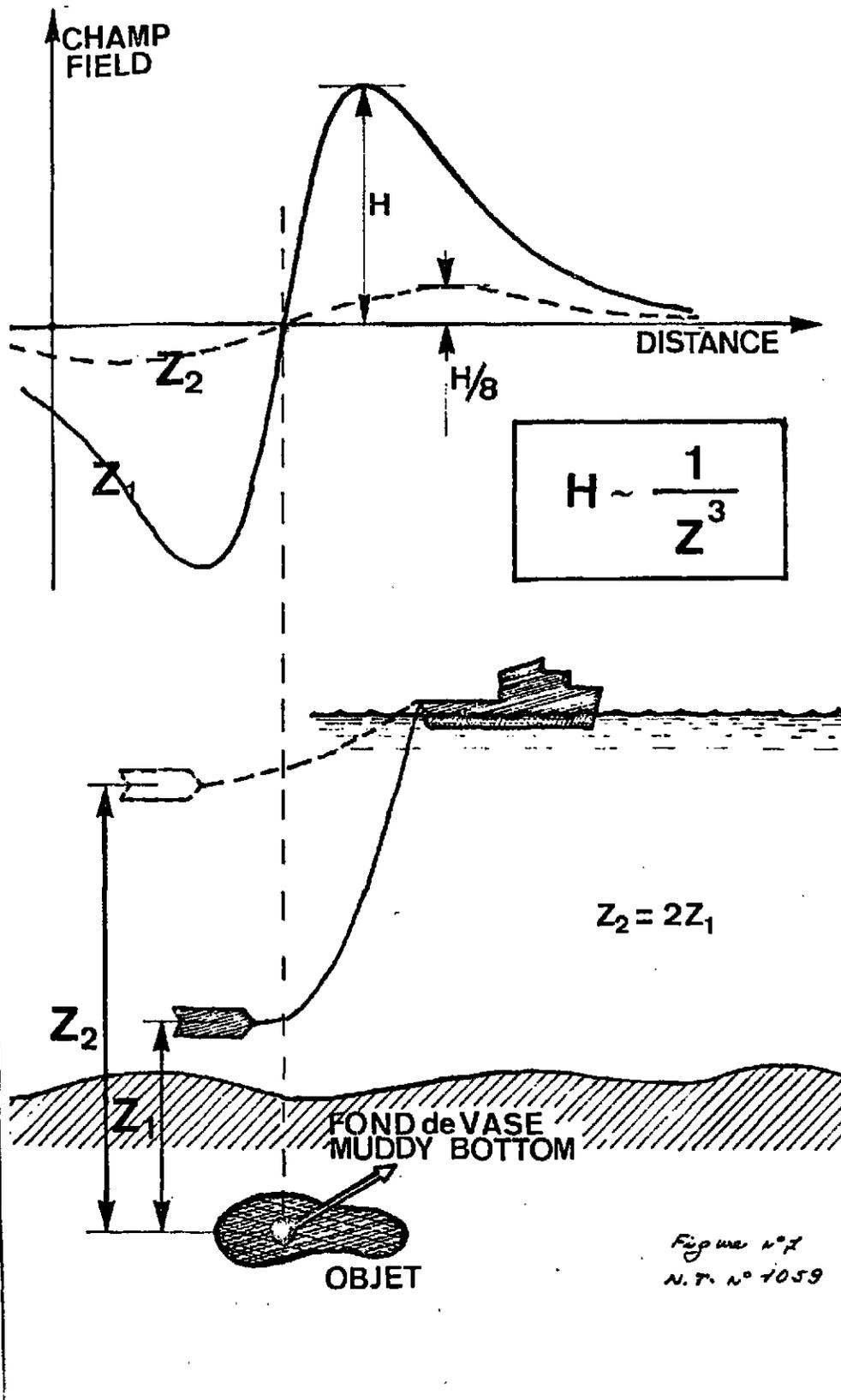
Figure n° 6 : Vue d'ensemble du gradientmètre vertical

Figure n° 7 : Gradientmètre vertical

Figure n° 8 : Poisson relais

Figure n° 9 : Aile plongeante

Figures n° 10 et 11 : Anomalies associées à l'épave du "Magdebourg"



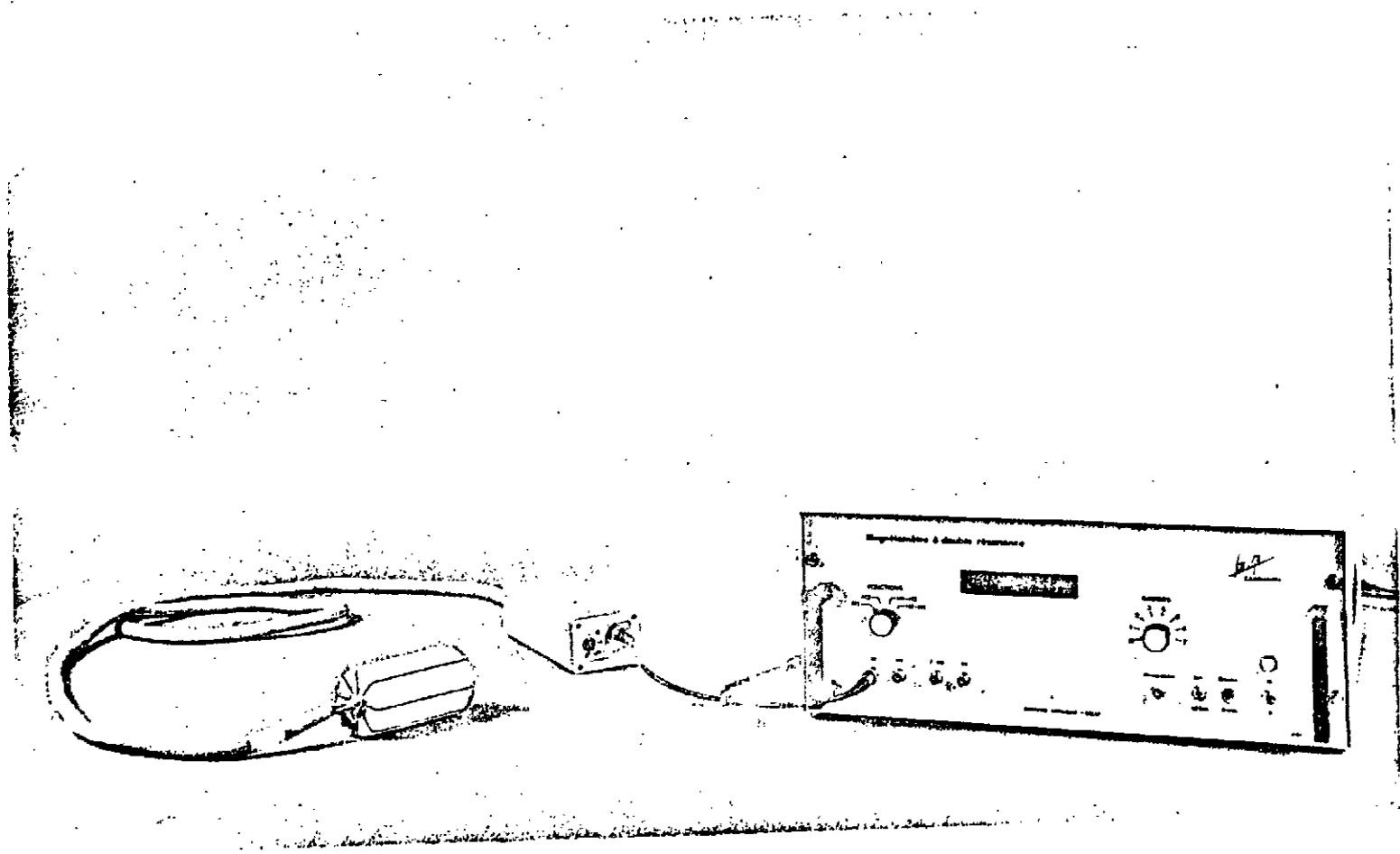


Fig: n° 2 PHOTO n° 5425

65010 LN
E. N. 2006

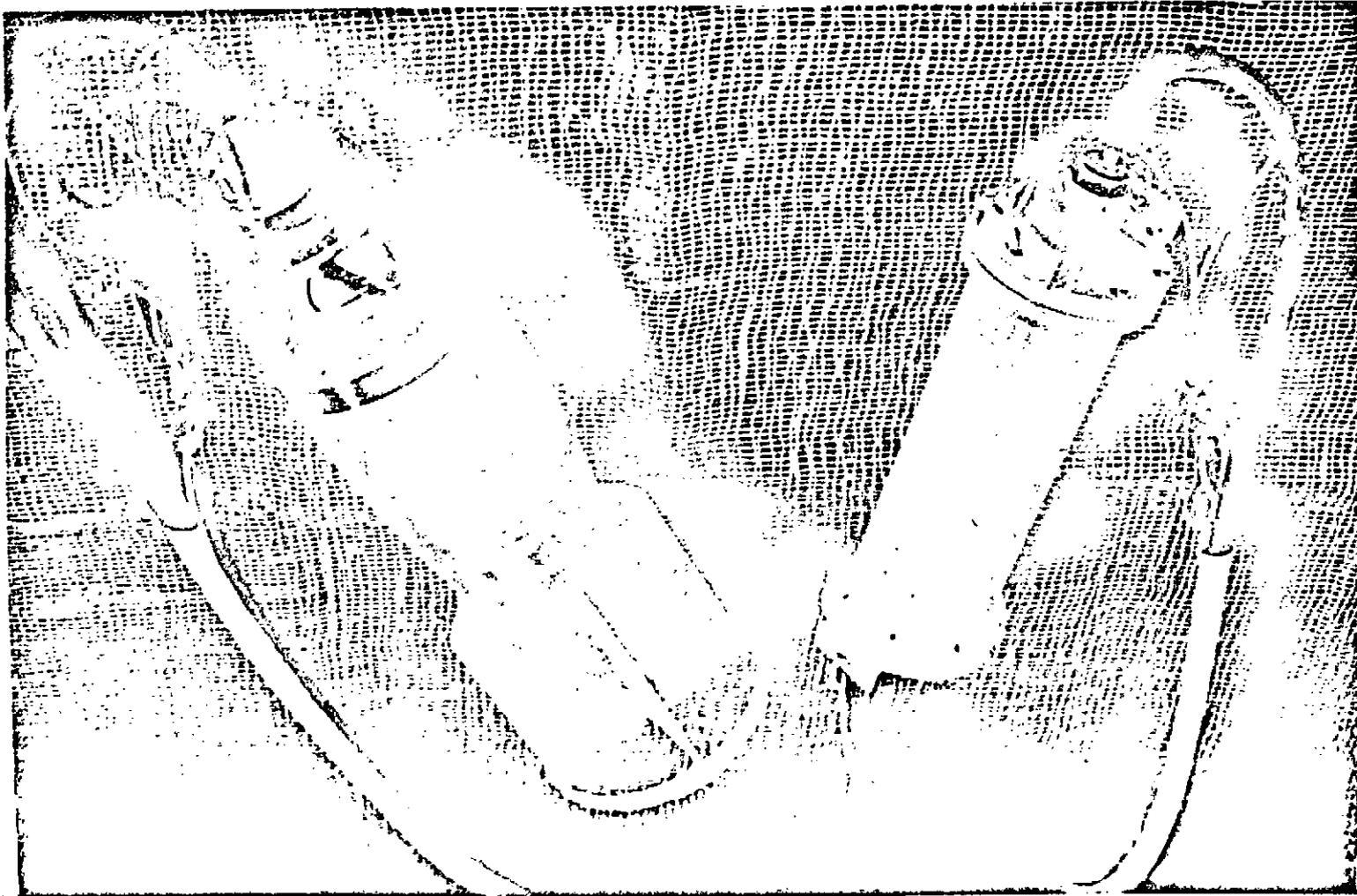


Figure 4
IT. N° 1059

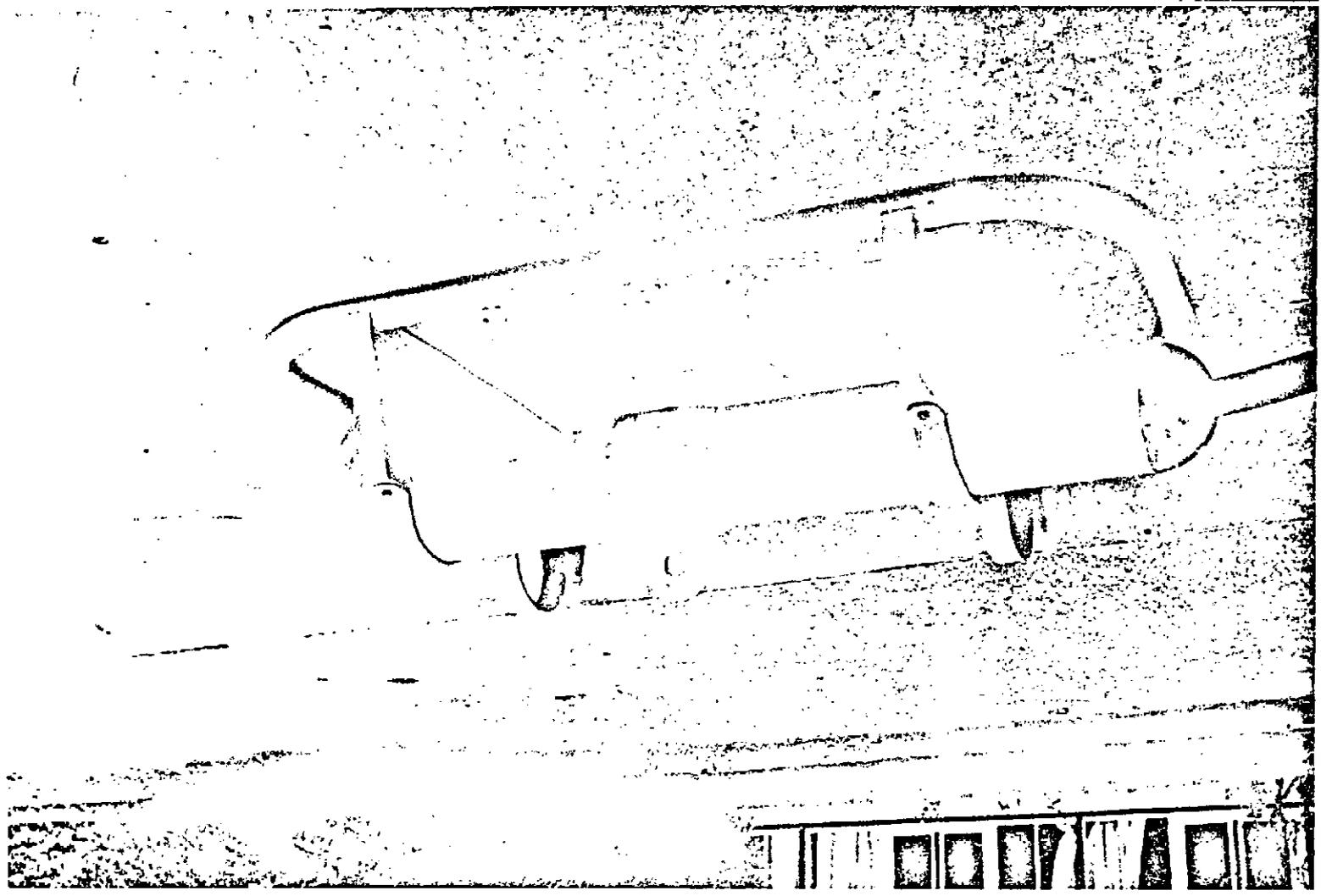


Figure 5
N.T. 201059



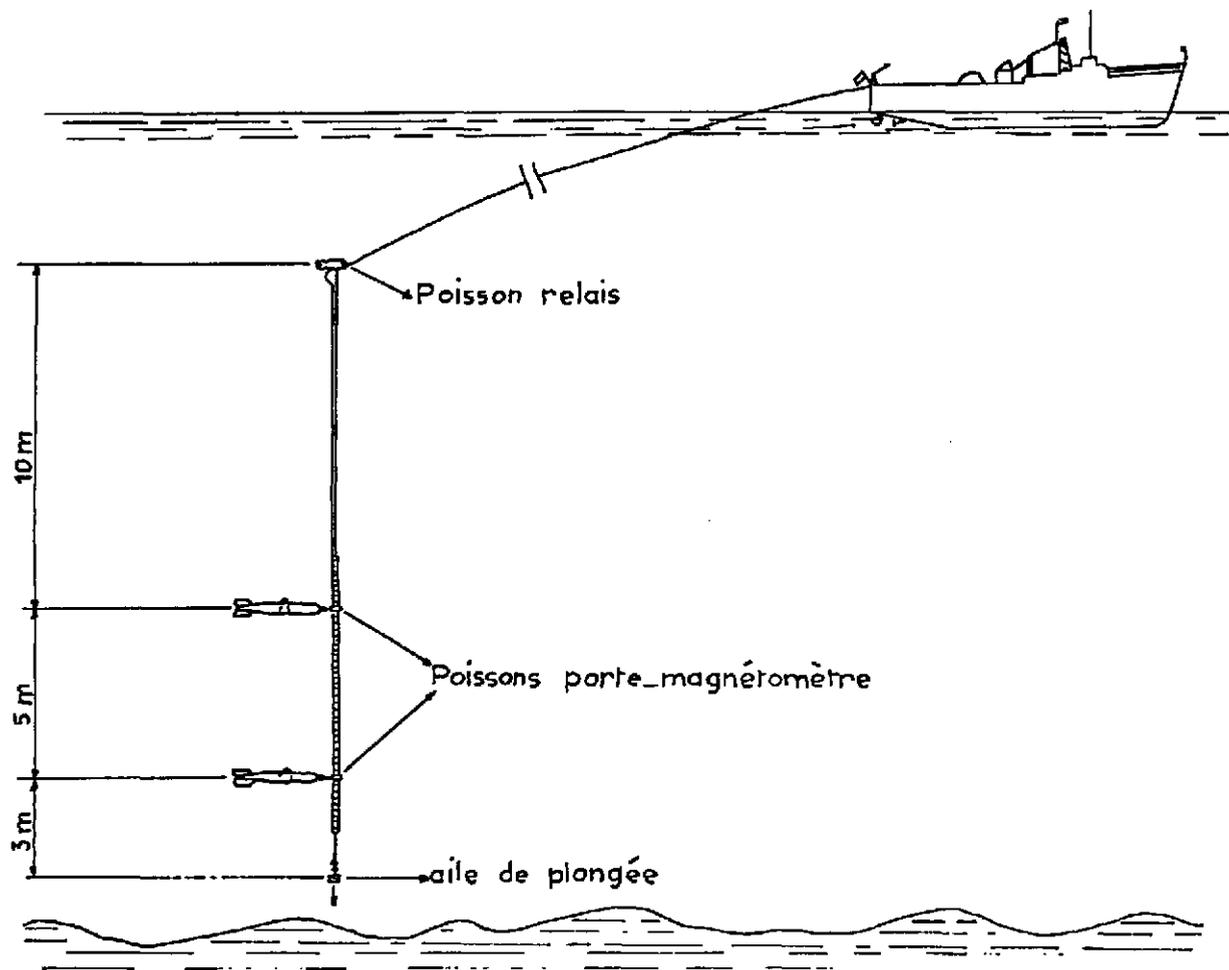


Figure n° 6
N.T. n° 1059

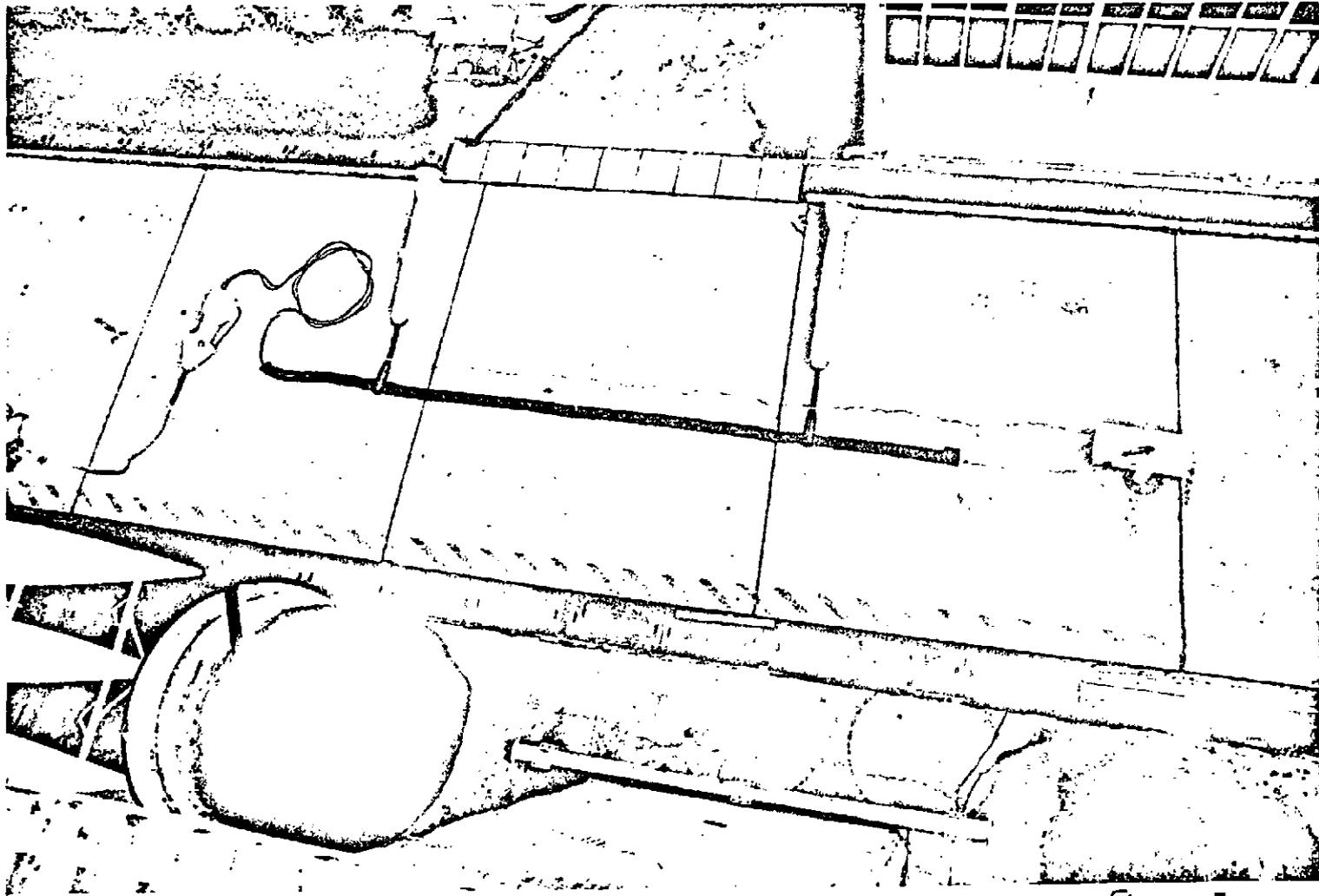


Figure 7
N.T. N° 1059

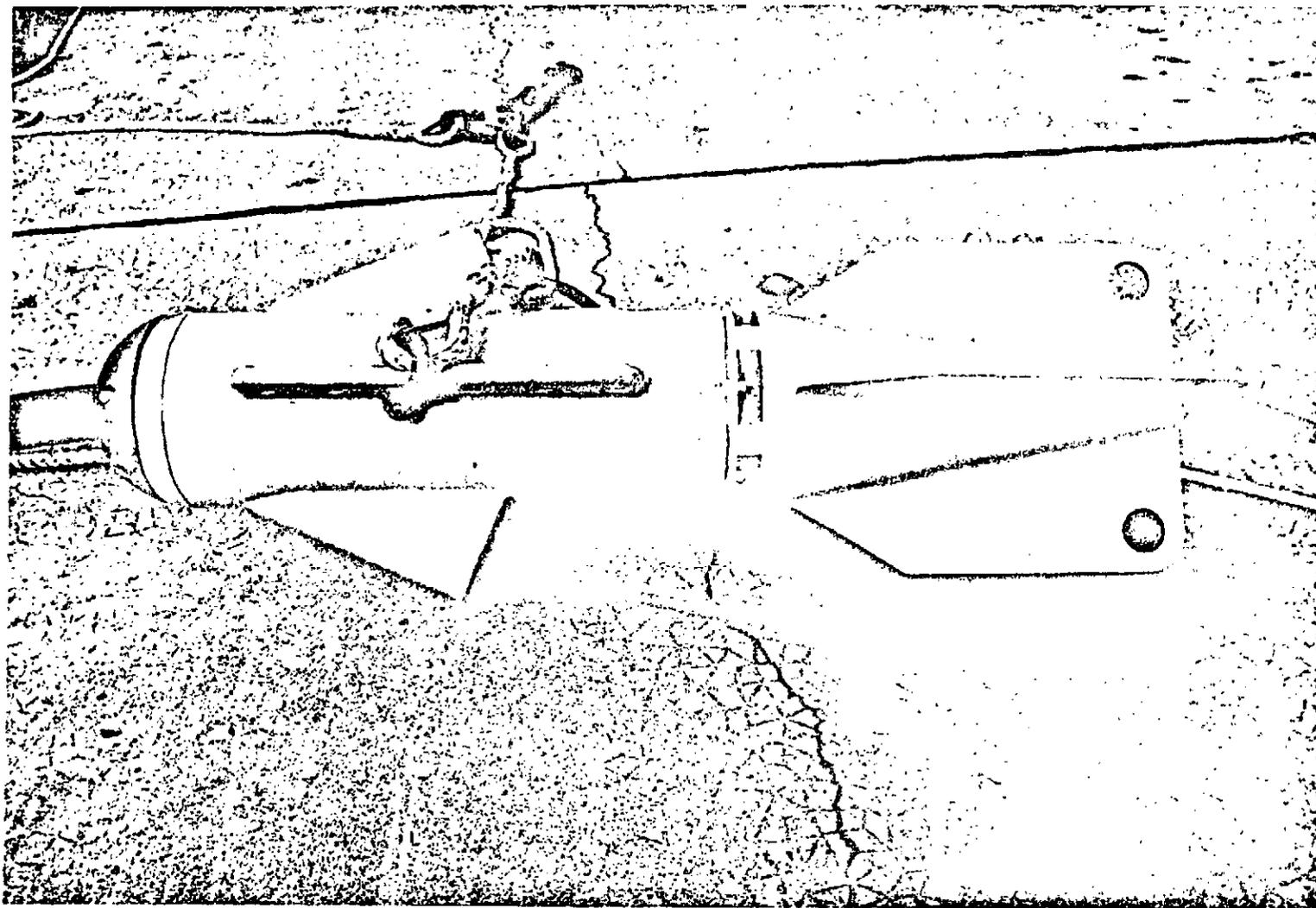


Figure 8
N. T. N° 1059

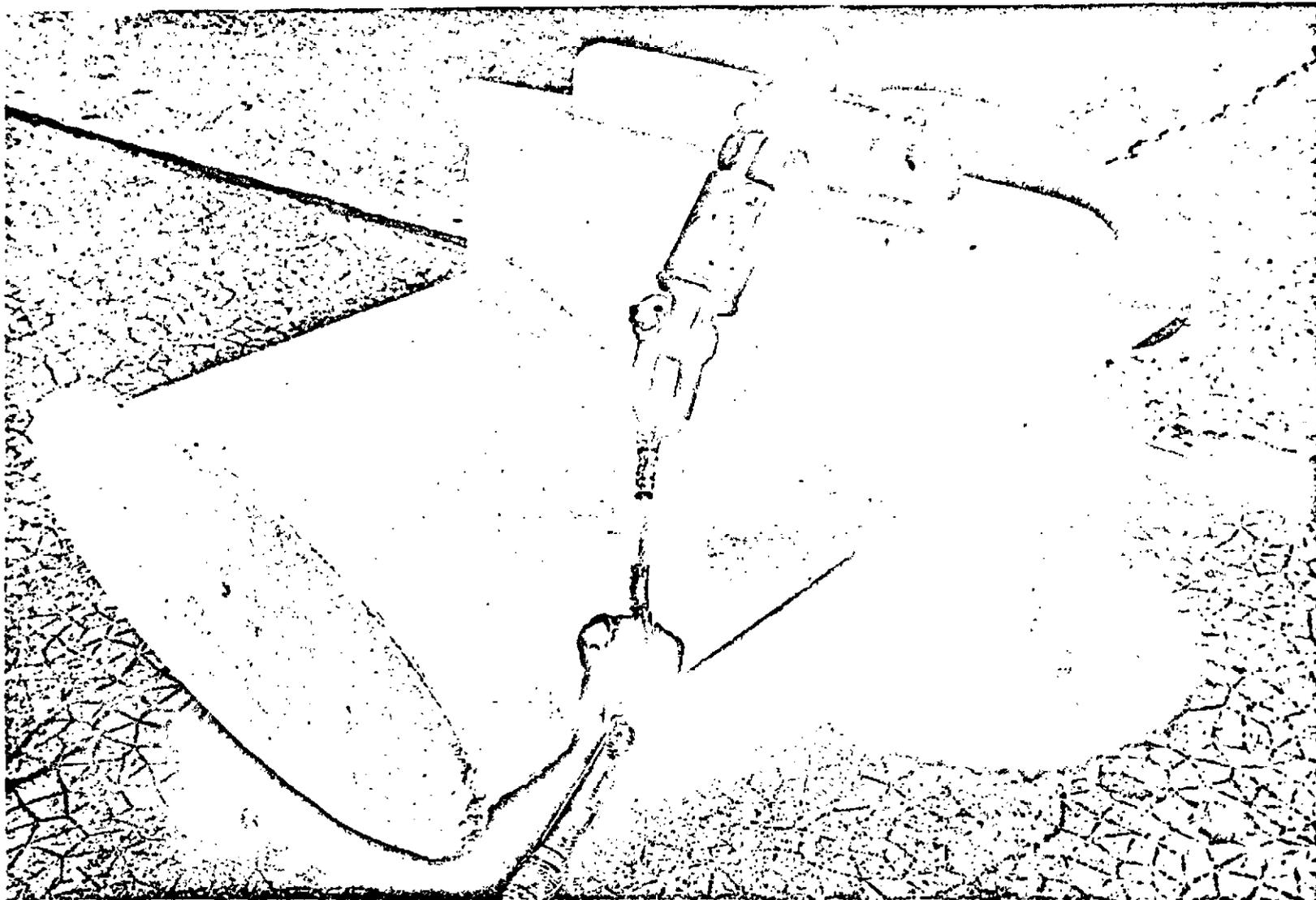
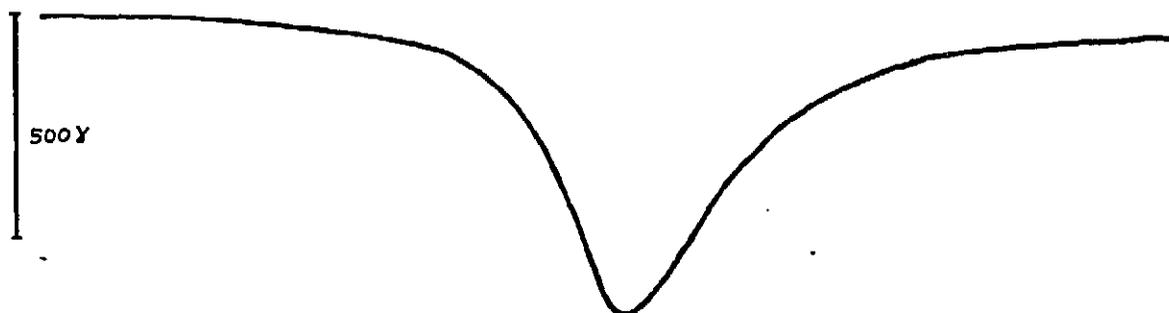


Figure 9
N.T. N° 1059



Distance estimée de l'épave = 60 m en abord

Figure 20



Distance estimée de l'épave = 300 m en abord

Figure 21

N.T. n° 1053