

COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 21 JUIN 75

DETECTION MAGNETIQUE EN MER
Etude d'amélioration des méthodes
de détection et de localisation

MM. P. GRANDJEAN* & G. PRETET**

* Commission d'Etudes Pratiques de la Guerre des Mines (Marine Nationale)

** Groupe d'Etudes Sous Marines de l'Atlantique (DCAN BREST)

RESUME

Après avoir rappelé les principes de la détection magnétique en mer et décrit un équipement particulier permettant la mesure du champ magnétique et de son gradient horizontal, on décrit une méthode d'analyse des anomalies magnétiques.

La construction de ces anomalies est faite à partir d'un modèle magnétique simplifié et permet l'étude des caractéristiques principales des anomalies. Ces caractéristiques sont ensuite utilisées pour améliorer la détection et la localisation en opération de recherche en mer.

SUMMARY

After having shortly reminded the principles of magnetic detection at sea and given a description of an equipment measuring the magnetic field and his horizontal gradient, the authors describe a method of magnetic anomalies analysis. A simplified magnetic model is used to compute these anomalies and study their principal characteristics. these characteristics are employed to improve the detection and the localisation during operations at sea.



DETECTION MAGNETIQUE EN MER
Etude d'amélioration des méthodes
de détection et de localisation

INTRODUCTION

Dans l'ensemble de la détection en mer d'objets divers (épaves, engins enfouis, oléoducs, têtes de forage...) la détection magnétique possède une place particulière. Il n'existe actuellement aucun moyen rentable autre que les moyens magnétométriques pour détecter des objets ferromagnétiques à travers une épaisseur importante de sédiments. La détection magnétique appliquée au cas des objets de petite taille enfouis a amené à développer nos connaissances pour utiliser au mieux les équipements existants actuellement. La détection magnétique connaît des limitations importantes car les intercepts ne sont jamais très grands, mais il ne reste pas moins que :

-La probabilité de détection est très élevée
-On peut avancer avec une quasi-certitude que l'objet détecté a été fabriqué par l'homme.

-Après examen des signatures on peut éliminer un certain nombre d'entre elles ne correspondant pas aux objets recherchés.

Nous allons essayer de dégager les particularités de ce type de détection et ses possibilités après avoir rappelé brièvement le principe de la détection magnétique et décrit sommairement les équipements utilisés.

1 - PRINCIPE DE LA DETECTION MAGNETIQUE EN MER.

Tout objet ferromagnétique crée dans son voisinage une déformation des lignes de force du champ magnétique terrestre, qui en l'absence de perturbation est uniforme. Si on se déplace le long d'une trajectoire rectiligne au voisinage du corps on peut observer cette déformation des lignes de force ou cette "anomalie du champ magnétique terrestre" en mesurant l'un des paramètres caractéristiques de ce champ. Avec des moyens mobiles de détection on mesure l'intensité du champ en un ou en plusieurs points. On a ainsi en se déplaçant la variation de l'intensité du champ dans l'espace suivant les trajectoires décrites par les points de mesures et en faisant la différence des mesures aux différents points on peut également obtenir la variation du gradient du champ suivant certaines directions. Si on connaît

certaines caractéristiques des anomalies du champ provoquées par les objets que l'on recherche il est possible d'obtenir une très grande efficacité et sûreté de détection.

2 - MOYENS DE DETECTION MAGNETIQUE EN MER

Nous ne décrirons ici que les moyens mis en oeuvre au Groupe d'Etudes Sous-Marines de l'Atlantique (GESMA) et plus particulièrement un équipement très intéressant par ses possibilités : le véhicule remorqué DAM 250 (Détecteur d'Anomalies Magnétiques). Il s'agit d'un véhicule remorqué par câble dont on peut faire varier l'immersion grâce à des ailerons de plongée et qui est équipé de différents sondeurs pour la navigation et de deux magnétomètres pour la mesure des caractéristiques du champ magnétique ambiant. Les caractéristiques principales de ce véhicule sont les suivantes (voir figure 1)

Longueur hors tout :	3,7 m
Largeur hors tout :	2,6 m
Masse :	525 Kg
Poids dans l'eau :	85 daN

Equipement : 1 sondeur frontal d'alarme, 1 sondeur vertical pour la mesure de l'altitude au-dessus du fond, 1 capteur d'immersion, 2 magnétomètres placés aux extrémités d'une aile en Delta et permettant de mesurer le champ magnétique et son gradient dans le plan horizontal suivant la direction perpendiculaire à celle du déplacement du véhicule.

Le véhicule est piloté depuis le bâtiment grâce à un pupitre de commande.

Les deux magnétomètres équipant le véhicule sont des magnétomètres à Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) à précession entretenue mis au point par le laboratoire de magnétométrie du L.E.T.I. (Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble). Dans le véhicule ne sont montés que les oscillateurs nucléaires (sonde, amplificateur de boucle, oscillateur VHF) qui fournissent un signal dont la fréquence est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique ambiant (2000 Hz environ pour le champ magnétique terrestre en France). A bord les variations de fréquence de ce signal sont converties



DETECTION MAGNETIQUE EN MER
Etude d'amélioration des méthodes
de détection et de localisation

en variations de tension grâce à un fré-
quencemètre à hautes performances. Sur un
enregistreur graphique on enregistre si-
multanément les variations de champ vues
par les deux magnétomètres, leur différen-
ce et les paramètres de navigation, altitu-
de, immersion du véhicule et coordonnées
de localisation du bâtiment. L'ensemble de
ces informations permet éventuellement, si
la zone a été totalement couverte, de tracer
des cartes de champ. L'étude de ces cartes
de champ ou même simplement des principales
caractéristiques des signaux enregistrés
permettent comme nous le verrons par la
suite d'obtenir de nombreux renseignements
sur les objets ferromagnétiques posés sur le
fond ou enfouis dans la zone explorée.

3 - ANOMALIES MAGNETIQUES CREEES PAR LES CORPS FERROMAGNETIQUES

Il est très important, pour utiliser au
mieux les possibilités de l'équipement dé-
crit au paragraphe précédent, de bien con-
naître les anomalies magnétiques créées par
les objets que l'on cherche à détecter.
Cette connaissance peut être obtenue soit
par des mesures expérimentales, soit par
des calculs théoriques, soit par une combi-
naison des deux .

3-1 - Rappel sommaire de magnétisme

Nous ne précisons ici que les points uti-
les à l'exposé.

Unités : Nous adopterons comme unité d'in-
tensité du champ magnétique le gamma (γ)
qui vaut 1 nanotesla (1 nT), le Tesla étant
l'unité du système MKSA rationalisé. L'in-
tensité moyenne du champ magnétique terres-
tre en France est de l'ordre de 46000 γ .

Tout corps ferromagnétique placé dans le
champ magnétique terrestre possède :

- une aimantation "dure" ou "permanente"
qui dépend de son histoire magné-
tique, mécanique, thermique, etc... anté-
rieure.
- une aimantation "douce" ou "induite" qui
ne dépend, à un instant donné, que du champ
ambiant.

Pour des corps de forme géométrique simple
(sphère, ellipsoïde, cylindre indéfini ...)

et homogènes ces aimantations sont unifor-
mes. Dans le cas de l'ellipsoïde l'aimanta-
tion induite n'est parallèle au champ exté-
rieur que si ce champ est dirigé suivant
l'un des axes principaux de l'ellipsoïde.
Dans le cas d'un corps de forme quelconque
et non homogène le calcul de l'aimantation
est très complexe. Cependant si le corps
possède un minimum de symétries et si on se
place à des distances grandes par rapport
aux dimensions du corps (en principe deux
fois la plus grande dimension du corps) on
constate expérimentalement que l'on peut
remplacer, pour les calculs, le corps par un
ellipsoïde de révolution dont le volume est
égal à celui du corps. On peut alors repré-
senter l'aimantation permanente par trois
vecteurs dirigés suivant les axes princi-
aux de l'ellipsoïde équivalents M_P^L , M_P^T , M_P^V
et l'aimantation induite par trois vecteurs
dirigés suivant les mêmes axes M_I^L , M_I^T , M_I^V .
Les vecteurs du type M_P sont constants et en
particulier indépendants de l'orientation du
corps dans le champ magnétique terrestre; les
vecteurs du type M_I sont proportionnels à la
composante du champ magnétique ambiant sui-
vant l'axe considéré. Le calcul de l'anoma-
lie magnétique créée dans l'espace par le
corps se ramène alors à celui de la varia-
tion de l'intensité du champ sous l'action
de six moments dipolaires centrés en tout
point de l'espace quand on connaît les six
moments équivalents.

3-2 - Détermination des moments dipolaires équivalents à l'aimantation d'un corps ferromagnétique

Théoriquement si on connaît les caractéris-
tiques de l'ellipsoïde, la perméabilité ma-
gnétique μ du métal du corps on peut calcu-
ler la valeur des trois moments induits.
Pour les moments permanents on ne peut faire
que des hypothèses. En fait dans le meilleur
des cas, celui où le corps est bien défini,
on connaît mal le volume si le corps est
complexe et pratiquement pas la perméabili-
té... Dans la pratique on est donc conduit
à utiliser le maximum de résultats expéri-
mentaux obtenus sur le corps lui-même quand
cela est possible ou sur des corps voisins
dans l'autre cas. Nous ne nous étendrons pas



DETECTION MAGNETIQUE EN MER
Etude d'amélioration des méthodes
de détection et de localisation

ici sur les techniques de mesures ni sur les méthodes d'exploitation pour la détermination des différents termes des aimantations. Ces techniques et ces méthodes sont bien connues et couramment utilisées au GESMA. Les mesures sont faites sur des stations en mer pour les navires et sur une chaîne de mesures à terre pour les corps divers dont la masse peut aller jusqu'à 2 tonnes. Dans les deux cas on utilise des magnétomètres directs et on utilise les propriétés de symétrie et les effets de cap pour séparer et chiffrer les différents termes de l'aimantation.

3-3 - Calcul de l'anomalie magnétique

Il suffit de calculer en tout point de l'espace le champ magnétique engendré par les six moments dipolaires centrés puis de composer vectoriellement ce champ avec le champ terrestre pour déterminer en tout point l'intensité du champ résultant (paramètre que l'on mesure avec les magnétomètres à RMN). Ce calcul long et fastidieux ne présente pas de difficultés de principe et peut être effectué par l'ordinateur. Un tel programme de calcul a été mis au point sous deux formes différentes à la CEPGM (Commission d'Etudes Pratiques de la Guerre des Mines) et au GESMA. On peut en déduire des surfaces isoanomales dans l'espace, des courbes isoanomales dans un plan horizontal quelconque ou des signatures suivant des trajectoires données. (Des exemples de surface sont donnés figures 2 et 3 dans le cas d'un cylindre d'acier de 2 mètres de long et de 0,5 mètres de diamètre).

4 - EXPLOITATION DES CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES ANOMALIES MAGNETIQUES POUR AMELIORER LA DETECTION ET LA LOCALISATION

Pour obtenir la meilleure efficacité possible d'un équipement tel que le DAM 250 décrit au paragraphe 2, il importe de dégager les caractéristiques essentielles des anomalies de l'objet que l'on espère détecter et localiser.

4-1 - Détection

Pour détecter il faut que le niveau du signal obtenu soit supérieur au seuil de discrimination des capteurs. Ce seuil doit être supérieur au "bruit" propre des capteurs (de l'ordre de $1/20$ de γ) et aux bruits parasites divers dus aux mouvements du véhicule, à la géologie de la zone, aux fluctuations temporelles du champ magnétique terrestre. Suivant les conditions, ce seuil peut être de 0,5, 1, 2 ou 5γ . Il faut signaler ici l'intérêt du montage différentiel qui permet d'éliminer en grande partie les signaux parasites dus à la géologie de la zone où aux variations temporelles du champ, ces signaux étant toujours à gradient faible contrairement aux signaux fournis par des objets très localisés.

Si on connaît la carte de l'anomalie dans le plan de mesure et le seuil de détection on peut en déduire l'intercent de l'équipement donc la distance entre "rails" de navigation pour obtenir une détection certaine. En fait même si on admet que les caractéristiques de l'objet sont bien connues il existe un certain nombre d'éléments qui ne permettent pas de déterminer la carte d'anomalie d'une manière absolue. En effet, l'altitude du véhicule au-dessus de l'objet est mal connue (fluctuation de navigation du véhicule, enfouissement possible de l'objet dans le sable ou la vase du fond) et son orientation en principe inconnue.

Une méthode originale particularisée à la détection magnétique a été mise au point pour calculer les probabilités de détection d'objets de caractéristiques magnétiques données. Pour ce faire un programme sur ordinateur a été mis au point. Il permet, compte tenu des paramètres connus, des cas les plus défavorables pour les paramètres inconnus et enfin de paramètres purement aléatoires, de calculer une probabilité de détection minimum en fonction de la distance en abord ou entre deux rails ou encore une probabilité minimum moyenne étendue à toute une zone que l'on traite avec un espacement de rail donné. Cette méthode consistant à calculer une probabilité minimum est beaucoup plus satisfaisante pour l'esprit que les méthodes conventionnelles utilisées



DETECTION MAGNETIQUE EN MER
Etude d'amélioration des méthodes
de détection et de localisation

dans la détection dans d'autres domaines. Il s'agit en fait de la probabilité pour que le capteur pénètre dans un volume autour de l'objet à détecter à l'intérieur duquel la détection est certaine, compte tenu d'un certain seuil. Ce volume est déterminé indépendamment de la situation de l'objet puisque à priori on a choisi le cas le plus défavorable. Il en résulte une sous-estimation de la probabilité de détection mais on arrive ainsi à une grande sûreté de détection. Cette méthode s'adapte particulièrement bien au cas de la détection magnétique pour laquelle la notion de détection certaine dans un volume donné est bien définie surtout lorsque l'on travaille avec deux capteurs montés en différentiel.

4-2 - Localisation

Lorsque l'on a obtenu un signal de détection sur un objet (un "contact") le problème est de définir la localisation de cet objet d'une manière aussi précise que possible. On peut utiliser ici les renseignements fournis par l'étude des anomalies magnétiques. Pour toute signature magnétique obtenue sur une trajectoire passant dans la zone d'anomalie il existe un certain nombre d'éléments caractéristiques - maximum positif et négatif - passage par zéro - gradient transversal. L'étude de ces différents éléments permet de donner avec une bonne précision la position de l'objet.

L'étude de la trajectoire des points remarquables des anomalies quand l'altitude du véhicule et l'orientation de l'objet varient (figure 4) permet de constater que, sous nos latitudes, l'objet se trouve toujours situé entre le maximum positif et le zéro de l'anomalie.

L'étude du gradient horizontal permet de préciser la direction où se trouve l'objet par rapport au rail et la distance de passage en abord. En utilisant deux ou trois passes dans la zone où l'on a eu un contact on peut ainsi, à partir des études ci-dessus, donner avec une très bonne précision la localisation de l'objet (figure 5).

4-3 - Identification

Il faut noter que d'après les caractéristiques des signatures obtenues pendant les levées magnétiques sur zone, en particulier valeur relative des maximums et du gradient, il est possible de distinguer des objets de tailles différentes. Identifier par contre dans une zone très encombrée, un objet particulier parmi d'autres de tailles voisines paraît beaucoup plus délicat sinon impossible.

5 - CONCLUSION

Nous avons essayé dans cet exposé de faire le point des possibilités de la détection magnétique lorsque l'on utilise un équipement particulier permettant d'obtenir simultanément la variation du champ magnétique et du gradient transversal sur une trajectoire donnée. L'étude des anomalies magnétiques permet d'exploiter, avec le maximum de profit, les possibilités de cet équipement. Les méthodes, dont le principe a été décrit dans cet exposé, ont été utilisées par les auteurs dans le cadre de campagnes de mesures effectuées en 1974 (voir figure 6 un exemple d'enregistrement obtenu). Les excellents résultats obtenus l'ont été au prix d'un travail souvent long et fastidieux. L'avenir de ces méthodes ne peut être que dans l'automatisation du traitement des informations, ce qui nécessite une centralisation des données (route bâtiment, navigation poisson, mesures du champ et du gradient magnétique) sur bande magnétique par exemple et un traitement sur ordinateur.



DETECTION MAGNETIQUE EN MER
 Etude d'amélioration des méthodes
 de détection et de localisation

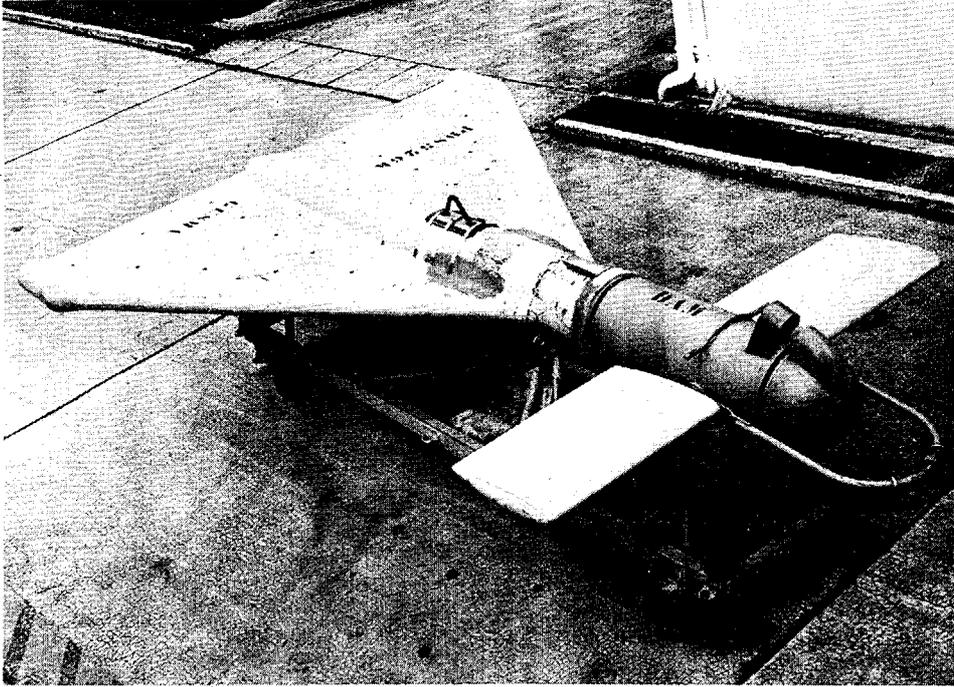


Fig. 1 - Véhicule remorqué détecteur d'anomalies magnétiques (DAM 250)

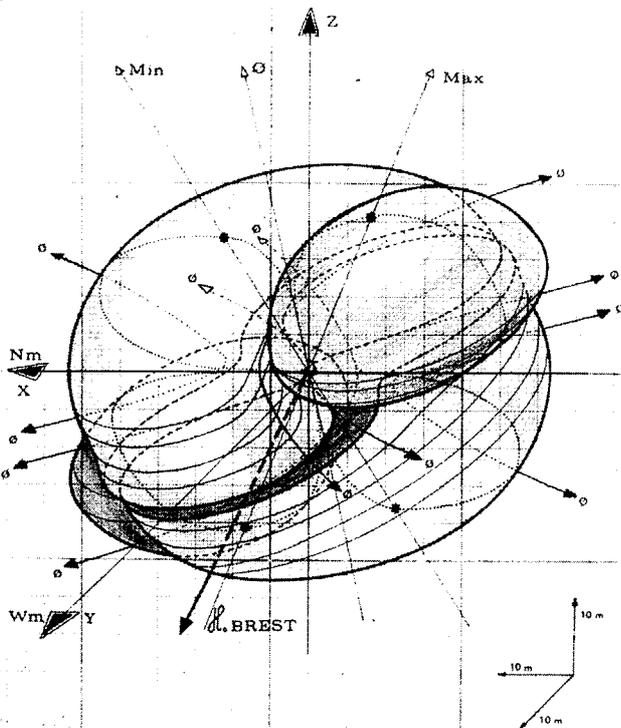


Fig. 2 - Surfaces isoanomales
 autour d'un cylindre en acier
 (L = 2,00 m Ø 0,5 m)

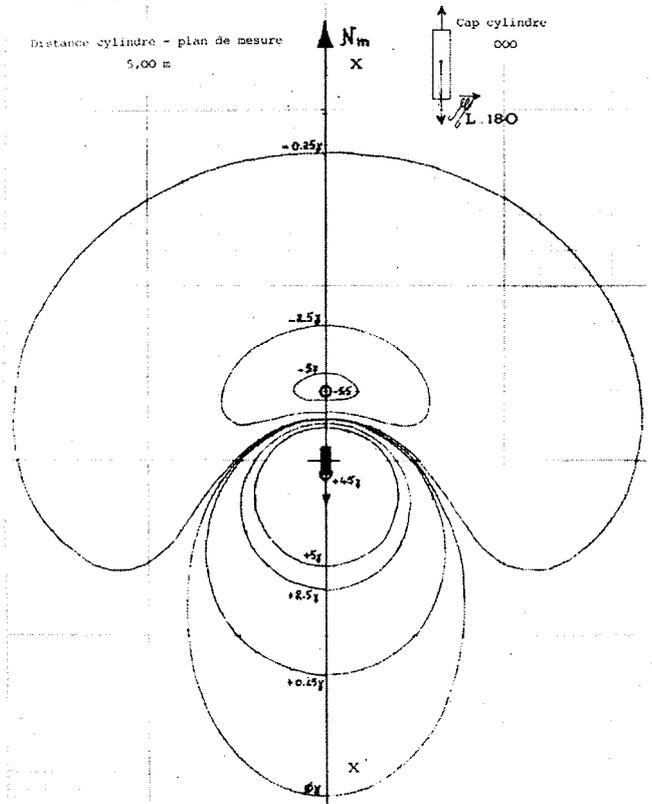


Fig. 3 - Courbes isoanomales
 dans le plan à 5 m au-dessus du
 cylindre



DETECTION MAGNETIQUE EN MER
 Etude d'amélioration des méthodes
 de détection et de localisation

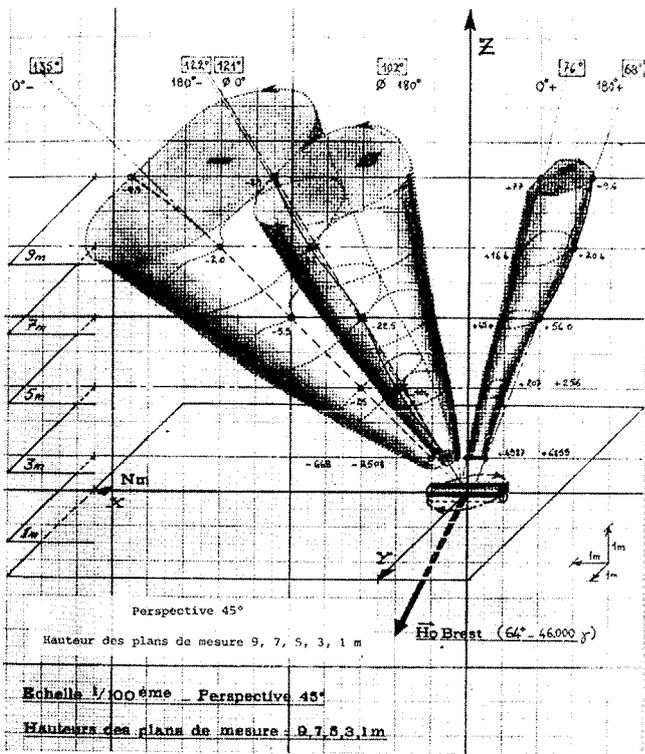


Fig. 4 - Trajectoires des joints remarquables de l'anomalie (MAX - MIN - ZERO) pour une rotation du cylindre de 360°

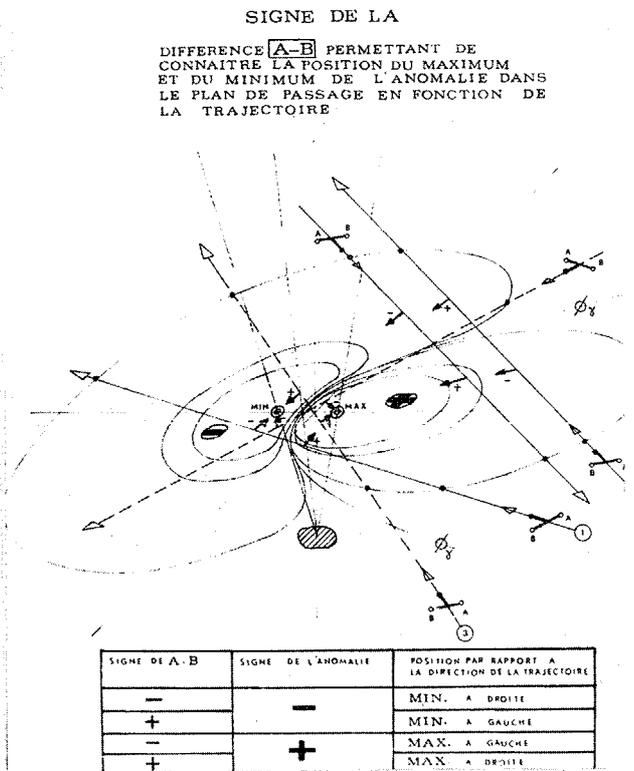


Fig. 5 - Utilisation de l'information gradient pour la localisation de l'objet

