

# Recherche magnétométrique

Max Guérout<sup>1</sup>

La magnétométrie consiste à mesurer le champ magnétique ambiant. Ce dernier est l'addition du magnétisme terrestre et du champ magnétique généré par la présence des masses ferreuses se trouvant dans le champ de détection.

## 1 - Champ magnétique terrestre

La terre peut-être considérée grossièrement comme un barreau aimanté, avec un pôle magnétique positif près du pôle géographique Nord et un pôle négatif près du pôle Sud.

Le champ magnétique terrestre n'est pas uniforme et varie d'un point à l'autre du globe. L'unité de mesure du champ magnétique étant le nanotesla (nT), le champ magnétique varie entre les valeurs de 60 000 et 20 000 nT. Il importe donc avant d'utiliser un magnétomètre de vérifier qu'il est bien étalonné pour la valeur moyenne du champ magnétique du lieu d'utilisation<sup>2</sup>.

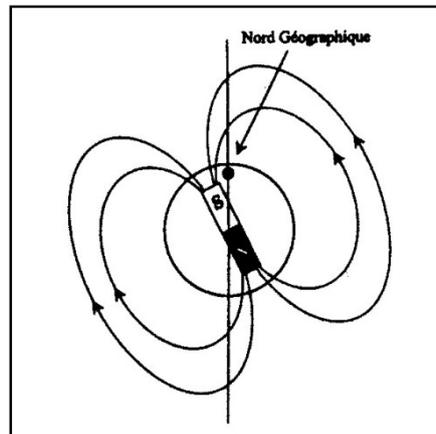


Figure 1 - Orientation du champ magnétique par rapport au Nord géographique

L'une des caractéristiques du champ magnétique est de ne pas être affecté par le milieu dans lequel il se manifeste. Cette caractéristique a une conséquence pratique importante :

---

<sup>1</sup> Groupe de Recherche en Archéologie Navale (GRAN) - Le texte qui suit est le résultat d'une collaboration étroite avec Hervé Blanchet, Président de la Société DRSM (Détection et Recherches Sous-Marines) avec qui nous avons mené une quinzaine de campagnes de prospections magnétiques en France métropolitaine, en Martinique, à Malte, en Algérie et au Chili et pour ce qui concerne le traitement mathématique du signal avec Bruno Wirtz Chercheur du Laboratoire de Mathématiques de la Faculté des Sciences et Techniques (Université de Bretagne Ouest) et C.N.R.S. U.M.R. 6205.

<sup>2</sup> Lors de prospections en baie de Valparaiso où le champ magnétique moyen est de 25 000 nT, nous nous trouvons en limite basse d'utilisation de notre magnétomètre SMM II. L'énergie reçue étant trop faible, le fonctionnement était perturbé. Après contact avec le constructeur, nous avons amélioré le fonctionnement du magnétomètre en abaissant la fréquence de répétition du signal. Le temps entre deux mesures étant plus long, l'énergie reçue était augmentée, aboutissant à un fonctionnement satisfaisant du magnétomètre, au prix cependant d'une fréquence de recueil des informations plus faible. La vitesse a donc été diminuée pour compenser ce petit inconvénient.

- une anomalie du champ magnétique générée par une masse de fer donnée est la même, à distance égale, que cet objet soit dans l'air, dans l'eau ou dans le sédiment ou dans une combinaison des ses trois éléments. La magnétométrie est donc adaptée à la recherche des épaves enfouies.

En un point donné la valeur du champ magnétique terrestre peut être affectée par un certain nombre de phénomènes naturels

### 1.1 - Variation diurne (marée magnétique)

Cette variation est due aux vents solaires qui se manifestent pendant la journée dans la magnétosphère.

Ce changement est lent de l'ordre de 1nT/minute et peut atteindre une valeur maximale de 100 nT. Il n'affecte pas la détection d'une anomalie. Il peut cependant compliquer la comparaison des valeurs du champ magnétique mesuré entre deux passages au même point à des moments différents ; il doit donc être pris en compte lors de l'établissement de cartes du champ magnétique. Les corrections à adopter peuvent être obtenues auprès des observatoires<sup>3</sup> qui fournissent sur demande un fichier informatique des variations diurnes du champ magnétique pendant la période considérée. Elles sont alors introduites dans les logiciels de traitement de la même manière qu'est introduite une marée dans des mesures de hauteur d'eau.

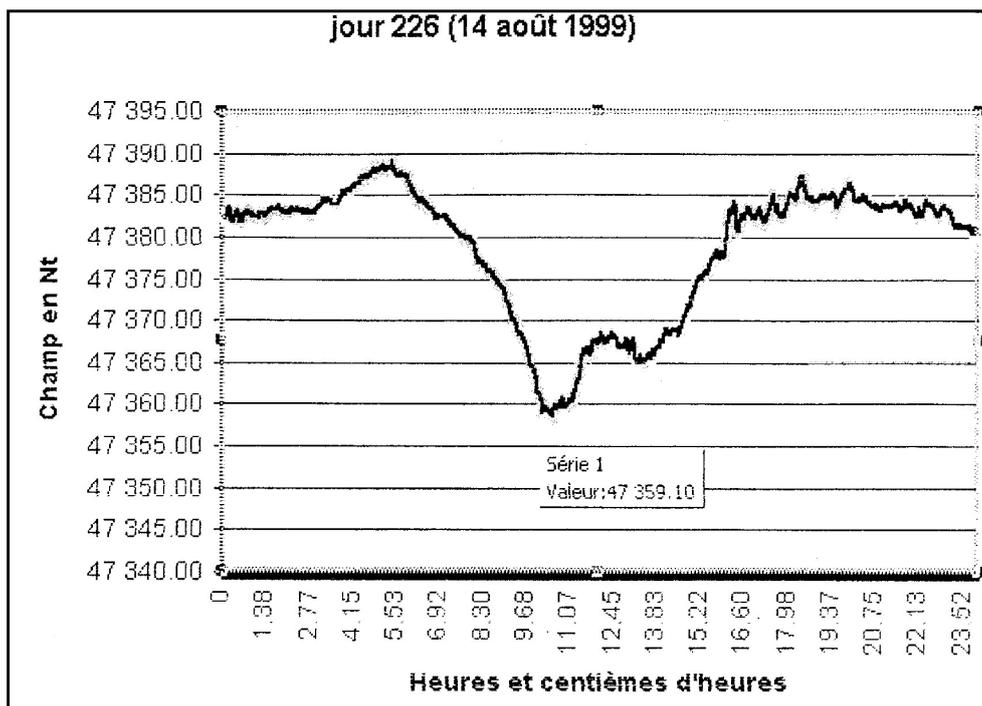


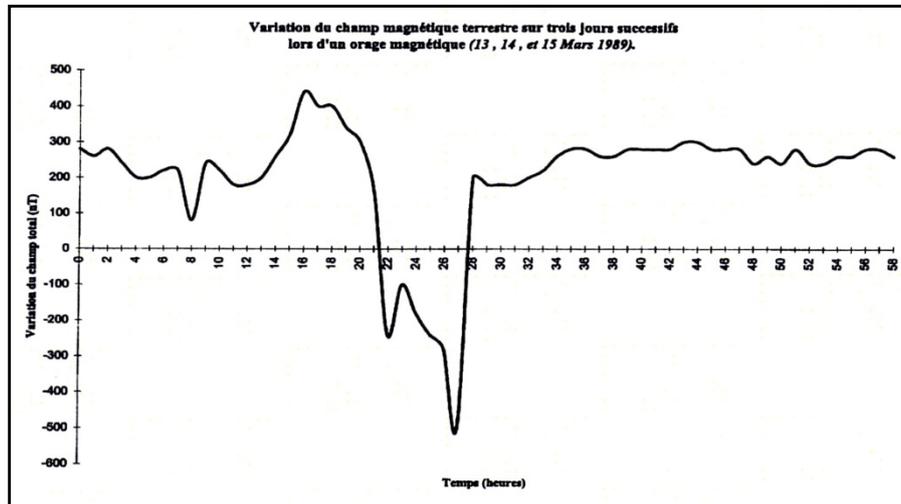
Figure 2 - Variations diurnes du champ magnétique. Courbe restituée à partir des fichiers informatiques fournis par l'observatoire de Chambon La Forêt

### 1.2 - Orages magnétiques

Ce phénomène est également lié à l'activité solaire et plus particulièrement aux éruptions qui se produisent à la surface du soleil. Ce sont des

<sup>3</sup> En France ces variations sont enregistrées pour l'Institut de Géophysique du Globe de Paris par l'Observatoire magnétique de Chambon-la-Forêt. En Italie par l'Observatoire magnétique de Aquila.

phénomènes relativement courts dont l'amplitude peut atteindre plus de 1000 nT. Ils représentent une gêne importante, mais peuvent toutefois comme les variations diurnes être mesurés par les observatoires, ce qui permet une correction ultérieure des mesures effectuées. Dans la pratique les orages magnétiques rendent impossible sur le moment, la conduite d'une prospection, ceux-ci étant le plus souvent perçus par l'exécutant comme un mauvais fonctionnement du magnétomètre.



**Figure 3** - Variation du champ magnétique terrestre sur trois jours successifs lors d'un orage magnétique les 13, 14 et 15 mars 1989)

Hormis ces deux phénomènes, dont il est possible de corriger les effets, le champ magnétique est stable, en conséquence :

- la valeur d'une anomalie mesurée à un moment donné restera la même à un autre moment à condition que tous les paramètres de mesure soient identiques. Il est donc possible d'établir des cartes du champ magnétique pour une zone donnée, sous réserve d'indiquer les paramètres de recherche utilisés pour la réalisation de ces cartes.

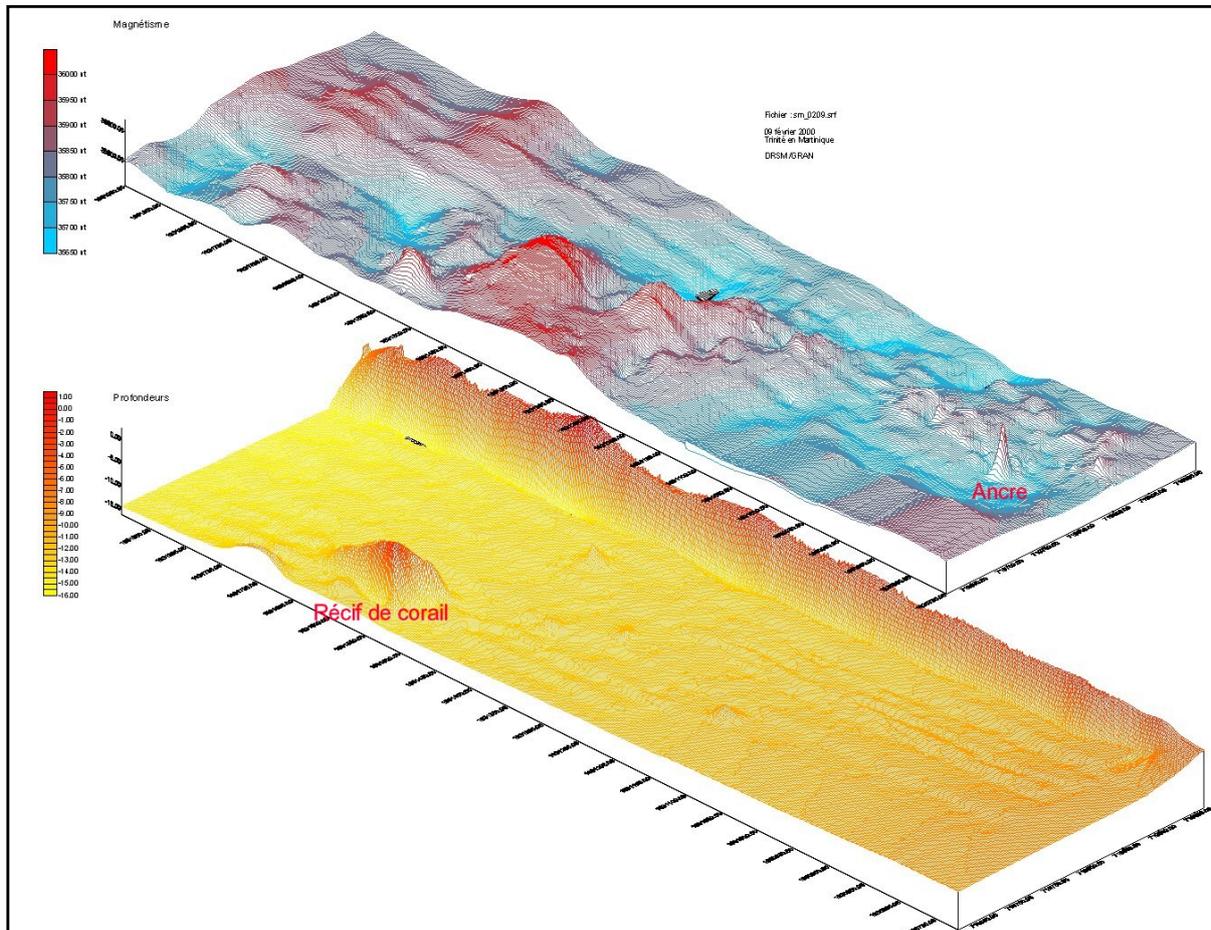
### 1.3 - Anomalies d'origine géologiques.

La susceptibilité magnétique des roches locales peut entraîner une anomalie du champ magnétique. Cette susceptibilité est due à la présence de magnétite dans les roches. Les roches volcaniques les plus basiques comme le basalte, et dans une moindre mesure le granit, peuvent aussi produire des anomalies. L'effet de ce type de roche se traduit pour une distance du fond constante de la sonde par un « bruit de fond » uniforme, toutefois ce dernier augmente si on rapproche la sonde du fond.

Les roches sédimentaires comme de calcaire, le corail ne produisent aucune distorsion du champ magnétique.

A cet effet s'ajoute des anomalies locales dues à la présence de failles géologiques. Si les roches environnantes sont riches en fer, il se produit parfois au moment du comblement de ces failles par circulation d'eau, une concentration de fer le long de celle-ci. La valeur des anomalies ainsi générées peuvent être importantes (jusqu'à 4 à 500 nT) voire très importantes (plusieurs milliers de nT) mais leur

variation dans l'espace est en général beaucoup plus lente que celle qui est générée par la présence d'une masse de fer ponctuelle ou quasi ponctuelle.



**Figure 4** - Restitution du champ magnétique en baie de Trinité (Martinique) (en haut) et de la bathymétrie (en bas). Le sédiment d'origine volcanique (très riche en magnétite) et les failles expliquent les variations chaotiques du champ magnétique. On voit par contre qu'au récif corallien qui apparaît sur la bathymétrie ne correspond aucune anomalie magnétique particulière, le corail n'étant pas magnétique. Malgré ces conditions difficiles on distingue une anomalie importante (400 nT) correspondant à une ancre enfouie dans le sédiment en position verticale. (GRAN/DRSM – Martinique – 2000)

Lorsque la valeur de l'anomalie géologique n'est pas trop importante on peut essayer de pallier l'inconvénient qu'elles représentent :

- En utilisant deux magnétomètres en même temps séparés de vingt à trente mètres et en procédant à la soustraction des champs mesurés, on ne conserve alors que les anomalies ponctuelles. Cette méthode utilisée par le LETI<sup>4</sup> est « coûteuse » car elle nécessite plus de matériel (au moins deux magnétomètres) et des logiciels de traitement spécifiques.

- Il est également possible, en étudiant finement le champ magnétique relevé au cours de chaque profil de mesure, de mettre en évidence la superposition d'anomalies géologiques et d'anomalies générés par un objet ponctuel.

<sup>4</sup> Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (CEA-Grenoble)

L'étude des cartes géologiques est donc un préalable indispensable à la préparation d'une prospection. Malheureusement les cartes géologiques en mer sont relativement rares et on devra parfois se contenter de consulter les cartes géologiques de la côte la plus proche.



**Figure 5** - Représentation en trois dimensions d'une anomalie géologique exceptionnelle détectée en août 1999 à l'ouvert du golfe du Morbihan au large de la presqu'île de Rhuys. Pour un passage du magnétomètre à 7,5 m du fond, cette anomalie bipolaire complexe atteint à sa valeur maximale 4 242 nT. L'anomalie qui se trouve sur une faille d'orientation Nord Ouest – Sud Est, est perceptible sur une longueur de 750 m.<sup>5</sup> (GRAN/DRSM – 1999)

## **2 - Le champ magnétique généré par une masse de fer**

### **2.1- Généralités**

---

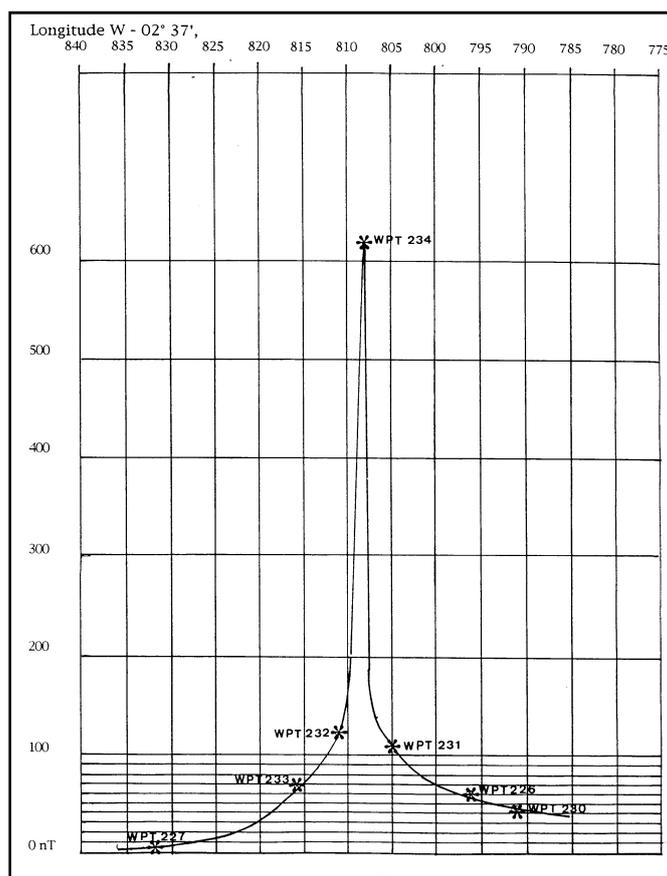
<sup>5</sup> Le substrat est composé de gneiss granitoïde et de roches magmatiques (granite tardimagmatique). L'ensemble est recoupé par un important accident cassant souligné par des filons de quartz. A ces filons sont souvent associés des minéraux contenant du fer (pyrite) ou de l'étain (cassiterite) ; il est patent que leur présence modifie localement le champ magnétique. L'accumulation de minéraux ferromagnésiens recristallisés dans les épontes [parois] des filons colmatant les fractures est d'origine pneumolitique, et suivant l'importance locale de la composante horizontale du rejet (métrique à plurimétrique), les quantités accumulées peuvent être importantes et de nature à induire une anomalie de l'importance de celle observée. (M. Nikodic, Docteur en Géologie)

L'anomalie du champ magnétique terrestre générée par un objet en fer a deux causes différentes, elle est due, d'une part au magnétisme induit et, d'autre part, au magnétisme rémanent de cet objet. Le magnétisme induit est proportionnel à l'intensité du champ magnétique terrestre du lieu et à la capacité de l'objet à accroître ce champ en se comportant comme un barreau aimanté (une propriété appelée susceptibilité). Le magnétisme rémanent est un magnétisme permanent dont l'orientation et l'intensité ont été acquises au moment de la fabrication et de l'usinage de l'objet, (par exemple : un navire conserve un champ rémanent fonction de son orientation au moment de sa construction).

## 2.2 - Distance de détection.

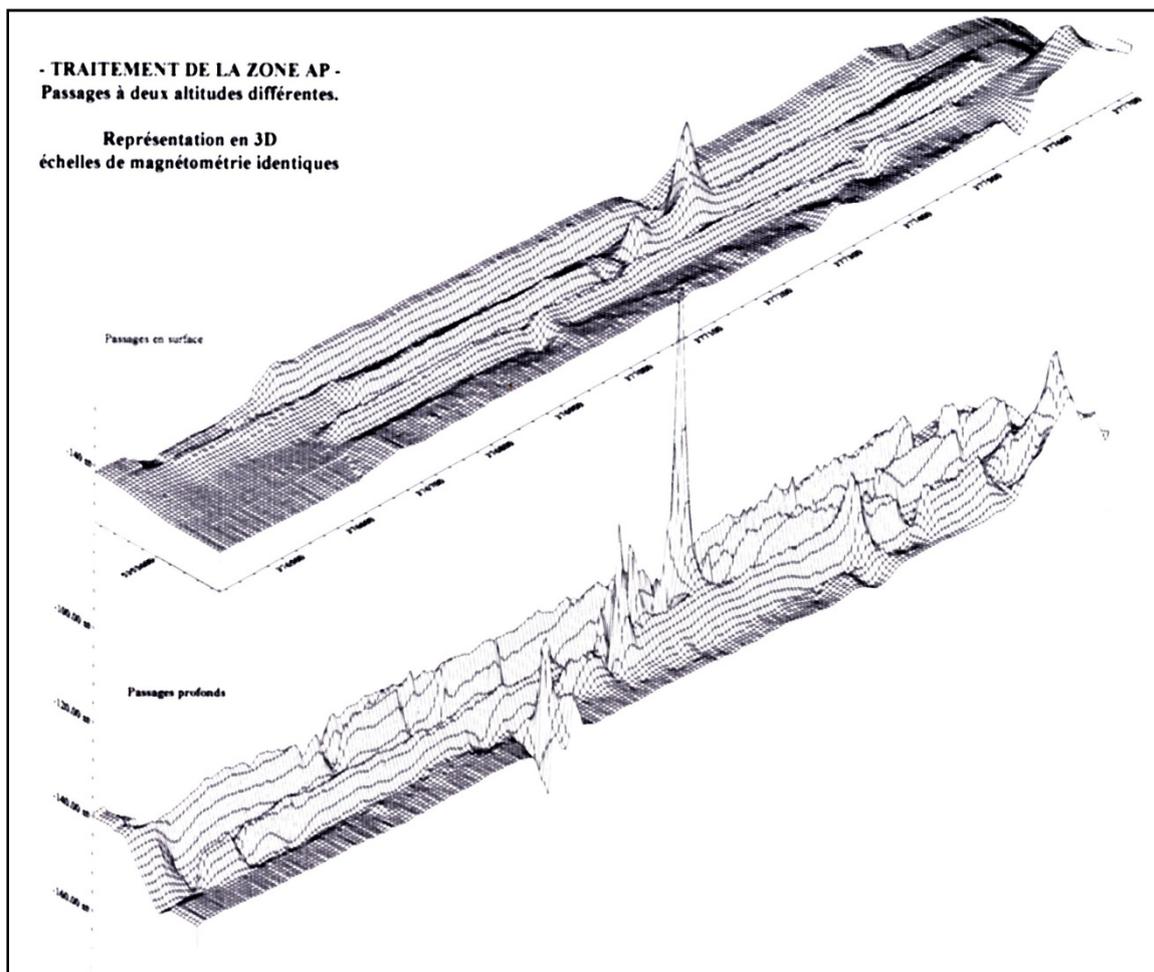
L'une des particularités physiques du champ magnétique qu'il importe de connaître lorsque l'on prépare une prospection, c'est que le champ magnétique créé par une masse de fer varie comme l'inverse du cube de la distance entre l'appareil de mesure et la masse en question. Traduit en termes simples, cela veut dire que le signal s'amortit très rapidement. Pour fixer les idées, si on double la distance, la valeur du champ induit est divisée par 8.

Cette donnée est primordiale pour définir l'un des paramètres importants d'une prospection : l'écartement entre les profils.



**Figure 6** - Coupe Est-Ouest de l'anomalie générée par l'épave de l'*Hermione* (1793) obtenue par sept passages parallèles successifs. 30/1000 de longitude représentent 40 mètres, on voit que la distance entre WPT 231 et WPT 232, les deux détections qui encadrent la valeur maximale de l'anomalie, n'est que d'environ 8 m<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> GUEROUT M., Rapport de mission : Recherche et identification de l'épave de l'*Hermione* (10 août – 10 septembre 1992)



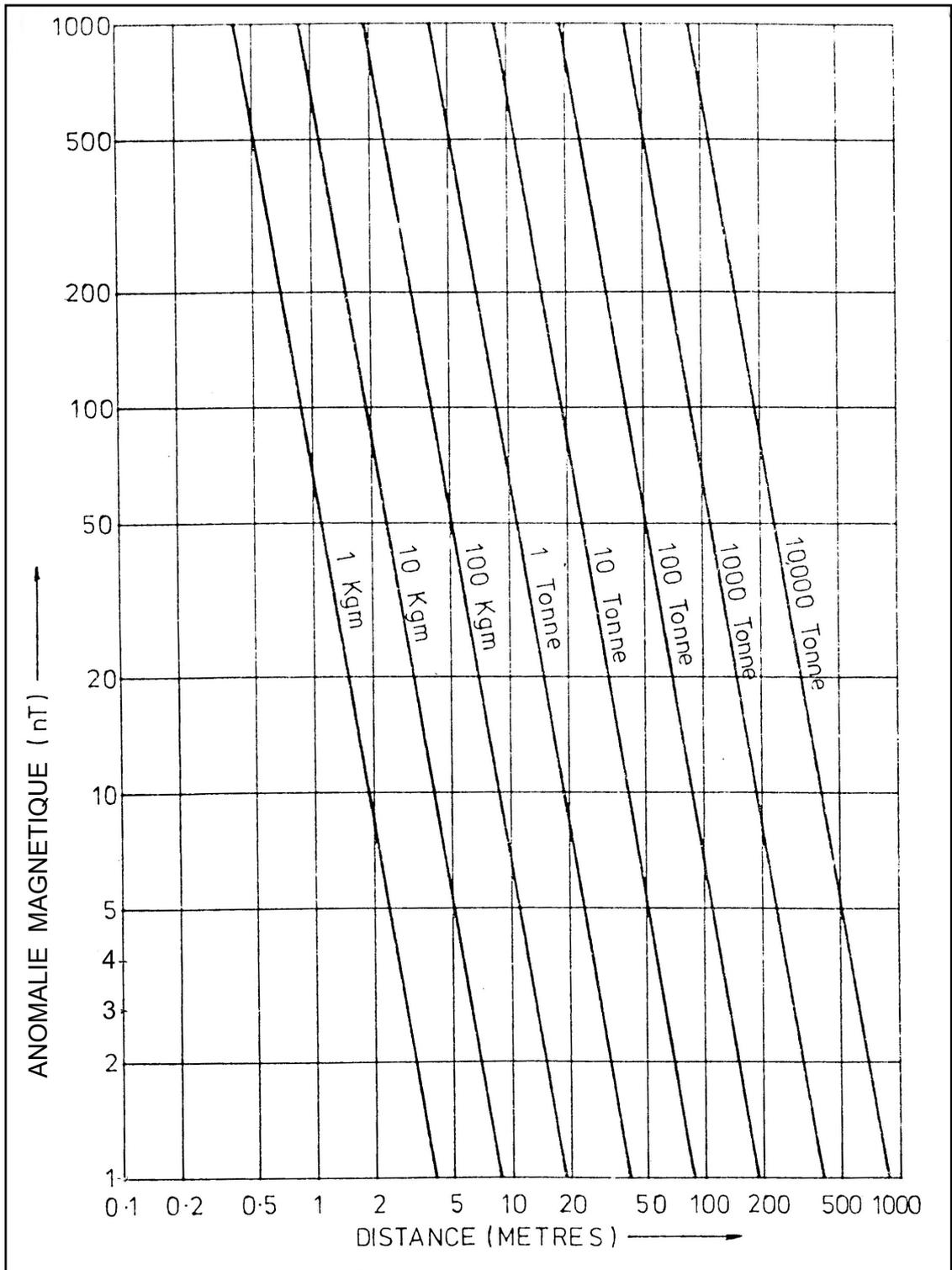
**Figure 7** - Représentation du champ magnétique pour deux passages à des altitudes différentes (10 m) sur le même profil<sup>7</sup>. Cette figure illustre bien l'influence de la distance de passage. (GRAN/DRSM – Avant Goulet de Brest – 2000)

Après une première détection, il peut être nécessaire de faire un passage de vérification en diminuant cette distance.

### 2.3 - Ordre de grandeur d'une anomalie magnétique

Il n'est pas inutile de donner quelques valeurs de manière à fixer les idées. Ces valeurs ont été effectivement mesurées à l'occasion de diverses campagnes de prospection. Les valeurs mesurées ne coïncident pas toujours avec les valeurs théoriques fournies par l'abaque de référence (figure 8). Cela tient d'une part, à la forme des objets détectés donc à la concentration plus ou moins grande de la masse de fer correspondante, mais aussi à leur orientation, à leur susceptibilité magnétique et à leur champ rémanent.

<sup>7</sup> Campagne de prospection dans l'avant goulet de Brest – 1999. Le pic principal correspond à une ancre.



**Figure 8** - Abaque donnant le poids d'un objet en fer en fonction de la distance de détection et de la valeur de l'anomalie

#### Ancres

- 1 - Ancre de 5,3 m de long, type jas de bois (2800 kg)  $\pm$  83 nT pour 21,1 m
- 2 - Ancre de 5,2 m de long, type jas de bois (2500 kg)  $\pm$  12 nT pour 23,1 m
- 3 - Ancre de 4,5 m de long, type jas de bois (1900 kg)  $\pm$  400 nT pour 8,5 m
- 4 - Ancre de 4,3 m de long, type jas de bois (1500 kg)  $\pm$  55 nT pour 8,2 m
- 5 - Ancre de 3,5 m de long, type jas de bois (750 kg)  $\pm$  46 nT pour 18,5 m

La valeur de l'anomalie générée par l'ancre n°3, si on la compare à celle de l'ancre n°4, s'explique par le fait que celle-ci se trouvait en position verticale dans le sédiment et que vue du magnétomètre la masse de fer se trouvait concentrée sur une même verticale (voir Figure 4). Les autres différences constatées tiennent en général à la valeur et à l'orientation du champ rémanent de chacune des ancres

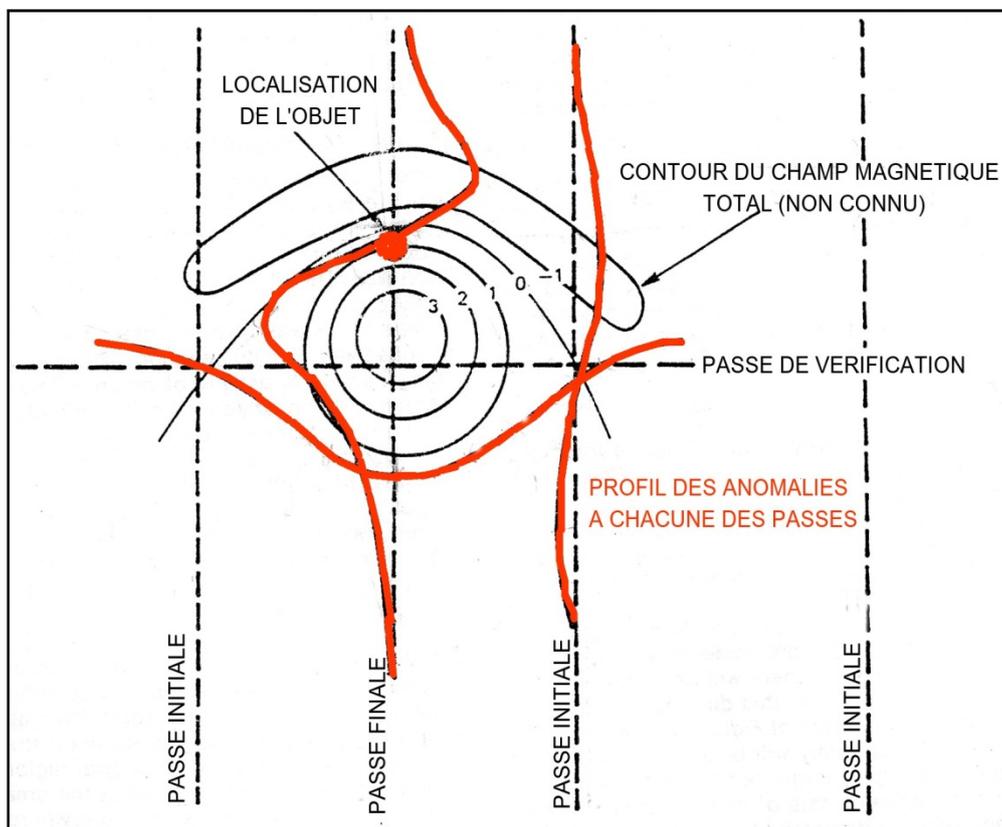
#### Epaves

- |   |                       |
|---|-----------------------|
| 1 - Epave du <i>Swansea Vale</i> (1310 t.)(1917)          | ± 3270 nT pour 14,1 m |
| 2 - Epave du cargo <i>Pen Hir</i> (1147 t.) (1935)        | ± 5540 nT pour 11,2 m |
| 3 - Epave du baliseur <i>l'Emile Allard</i> (474t.)(1943) | ± 1380 nT pour 19,3 m |
| 4 - Epave de la canonnière <i>Furieuse</i> (110 t.)(1918) | ± 5210 nT pour 10,3 m |
| 5 - Epave d'un navire de pêche avec guindeau et chaîne    | ±40 nT pour 14,0 m    |
| 6 - Epave d'un navire de pêche de 20 m de long            | ± 15 nT pour 9,7      |

#### Divers

- |   |                      |
|---|----------------------|
| 1 - Bouée de signalisation (danger isolé)                           | ± 15 nT pour 15,3 m  |
| 2 - Coffre de 5 m de diamètre et chaîne                             | ± 324 nT pour 11,9 m |
| 3 - Ponton de baignade : 7 fûts de 200 litres (150 kg) <sup>8</sup> | ± 26 nT pour 8,0 m   |
| 4 - Barbecue formé d'un demi fût de 200 litres (20 kg) <sup>9</sup> | ± 15 nT pour 5,0 m   |

### 2.4 - Forme du signal.



**Figure 9** - Représentation du champ magnétique total en présence d'un objet ferreux et du profil des anomalies (en rouge et rabattu de 90 degrés) correspondant à chacune des passes de recherche (représentées en pointillé noir).

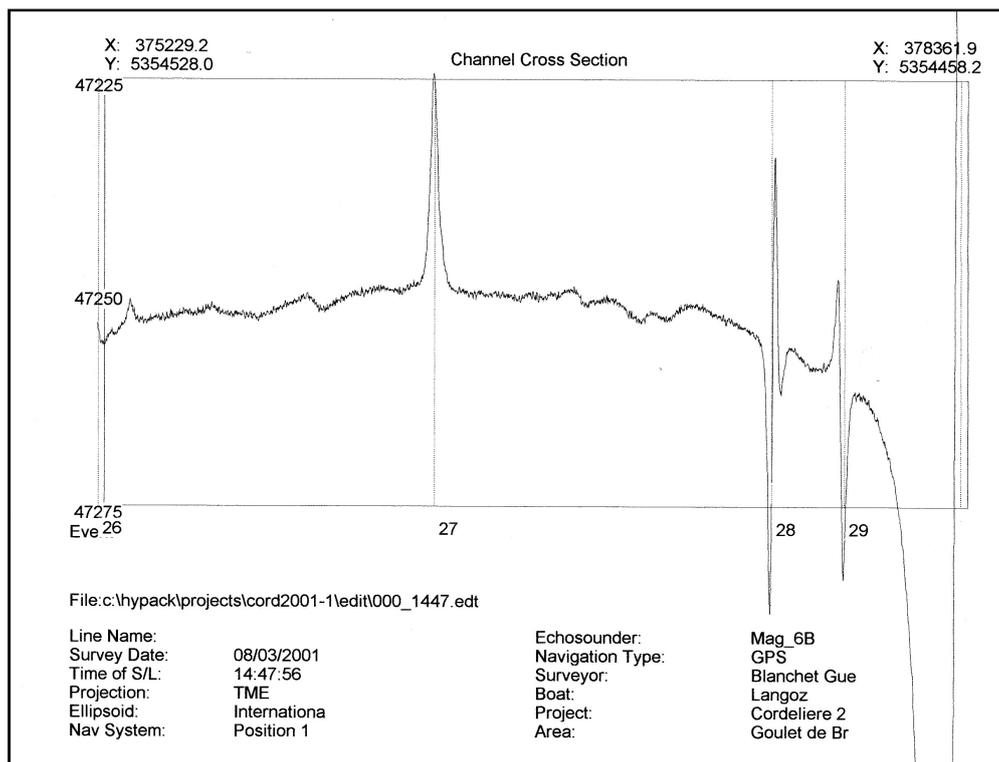
<sup>8</sup> Le poids estimé à la suite de l'examen par les plongeurs a été compris entre 150 et 200 kg, le calcul mathématique a donné 150 kg.

<sup>9</sup> Le poids de ce ½ fût identifié par plongeur a été évalué à 15 à 20 kg, le calcul a donné une masse de 23 kg.

La forme du signal mesuré est variable. Elle est fonction des caractéristiques de l'objet ferreux mais aussi, et surtout, de l'endroit où la trajectoire du magnétomètre coupe l'anomalie magnétique générée par cet objet.

Le signal correspondant peut être positif, négatif ou bipolaire.

Un signal bipolaire est soit dissymétrique (l'une des deux branches est plus grande que l'autre), soit équilibré. Ce dernier cas indique que le magnétomètre est passé à la verticale de l'objet détecté. La position de l'objet correspond au passage au point d'équilibre entre les deux branches.



**Figure 10** - Exemple d'anomalies : positive (27) ou bipolaires (28 et 29). Les anomalies 27 et 28 sont des anomalies générées par des câbles de transmission transatlantiques, et 29 (anomalie bipolaire non symétrique) par l'épave d'un bateau de pêche. (GRAN/DRSM - Avant goulet de Brest - 2001)

### 3 - Méthode de recherche.

#### 3.1 - Généralités.

Si une prospection systématique a pour but de rechercher des épaves et de les localiser avec précision, elle doit aussi permettre d'en démontrer l'absence dans une zone donnée.<sup>10</sup>

Ce dernier objectif est beaucoup plus difficile à atteindre qu'il n'y parait. La notion d'épave est en effet relative. Une absence de détection peut tenir non seulement à la taille de l'épave elle-même (plus précisément à la masse de fer qu'elle représente), mais également à la sensibilité des senseurs, au bruit de fond du signal

<sup>10</sup> On rejoint en cela une réflexion de La Pérouse à propos des voyages de découverte de James Cook : « Le hasard fait découvrir des îles aux plus ignorants, mais il appartient qu'aux grands hommes comme lui, de ne rien laisser à désirer sur les pays qu'ils ont vu ».

et aux paramètres adoptés pour la recherche : hauteur du magnétomètre au-dessus du fond, espacement des passes, vitesse, fréquence de répétition du signal émis.

Lorsque la recherche concerne une épave particulière, il importe d'avoir la meilleure connaissance possible de la masse de fer qu'elle représente et de sa répartition dans l'espace. Cette connaissance peut aller jusqu'à effectuer une simulation de l'anomalie induite (voir annexe 2). Cette analyse permettra de définir les paramètres de recherche à adopter mais également d'effectuer le tri des anomalies détectées et d'éliminer celles qui seraient significativement différentes de la cible recherchée.

Pour évaluer ensuite le taux de couverture obtenu vis à vis d'une cible donnée on doit pouvoir disposer à la fois d'un relevé des routes mais aussi des paramètres adoptés pour la recherche.

L'objectif d'une prospection est en définitive de fournir une cartographie du champ magnétique dans la zone donnée, mais aussi de conserver l'ensemble des données recueillies pour permettre une analyse ultérieure et le cas échéant de leur appliquer de nouveaux algorithmes de traitement qui seraient mis au point.<sup>11</sup>

### 3.2. - Le magnétomètre.

Les magnétomètres à protons modernes utilisent la résonance nucléaire (effet Overhauser). L'intérêt de ces magnétomètres réside dans le fait que la mise en forme du signal s'effectuant dans le poisson, le signal qui est transmis en surface par un coaxial est un signal numérique, beaucoup moins sensible aux brouillages qui affectent d'ordinaire les signaux analogiques.

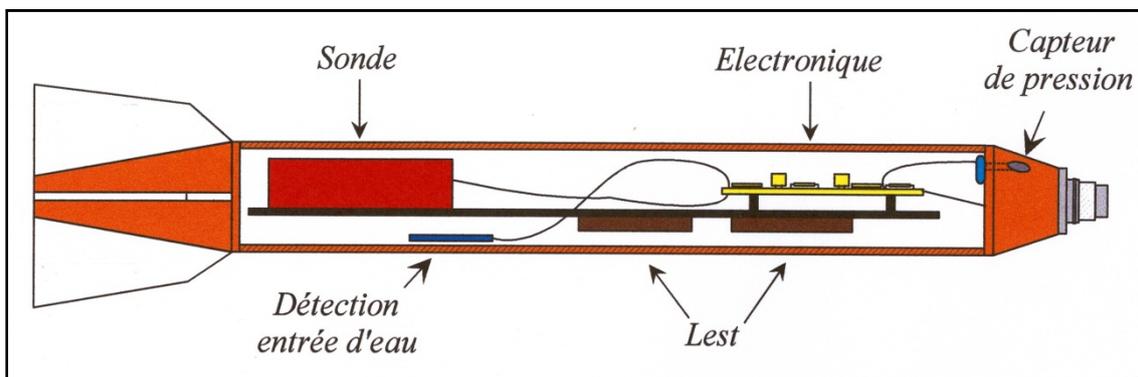


Figure 11 - Vue d'un magnétomètre en coupe

La sonde (poisson) du magnétomètre (figure 11) mesure 120 cm de long pour 13,5 cm de diamètre, est remorquée par un câble coaxial électro porteur, armé en fibre de Kevlar. L'ensemble exerce une traînée très faible sur le câble.

Une baie d'exploitation permet de gérer sur un écran rétro éclairé les informations transmises par le poisson : valeur du champ magnétique et immersion du poisson, et de visualiser les 15 à 20 dernières minutes de mesures.

Par souci d'économie certains modèles récents ont supprimé cette baie d'exploitation qui est remplacée par un ordinateur portable. Il reste toutefois très important de conserver la possibilité de visualiser en temps réel le champ magnétique et d'avoir la possibilité de préparer et suivre l'exécution de la mission sur

<sup>11</sup> C'est le cas des recherches effectuées à l'ouvert de Brest entre 1996 et 2001 dont les données conservées sont réexaminées à la lumière des algorithmes de traitement mis au point par Bruno Wirtz (UBO Brest) (voir annexe 2).

un ordinateur portable distinct de celui qui enregistre les données. Cette dernière fonction ne permet pas en effet un suivi continu de l'évolution du champ magnétique, la place disponible sur l'écran n'étant pas suffisante.

### 3.3 – Equipements associés

Le magnétomètre est associé à un système de navigation du type GPS et un sondeur. Ces données sont gérées par un logiciel spécialisé installé sur un ordinateur portable.

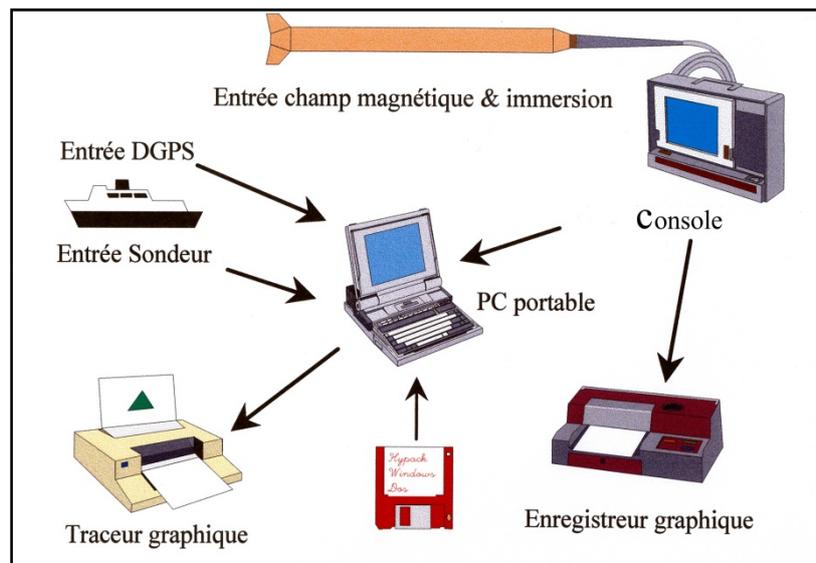


Figure 12 – Installation du matériel

On a tout intérêt à doubler cette gestion informatique d'un recueil manuel. En effet il n'est pas possible d'avoir une vue d'ensemble du travail en cours sur l'ordinateur qui effectue l'enregistrement des informations et seul un relevé graphique même approximatif permet de gérer la recherche, de décider des profils à entreprendre, d'analyser l'évolution d'une anomalie d'un passage à l'autre. Ce relevé graphique instantané permet aussi de s'abstraire des contraintes générées par la variation diurne du champ magnétique (figure 2) qui complique l'analyse de plusieurs détections d'une même anomalie obtenues à des instants différents.

Un autre ordinateur comportant une carte "scannée" de la zone et un programme de navigation permet de suivre la navigation. Cet ordinateur peut aussi permettre au barreur de suivre les routes ordonnées. La qualité du barreur et sa capacité à suivre avec précision les routes ordonnées sont les clés de la réussite d'une prospection.

Les trois systèmes utilisés simultanément permettent à la fois une grande sûreté, un suivi en temps réel des opérations, une restitution et un traitement ultérieur des données recueillies.

### 3.4. - Logiciel d'hydrographie

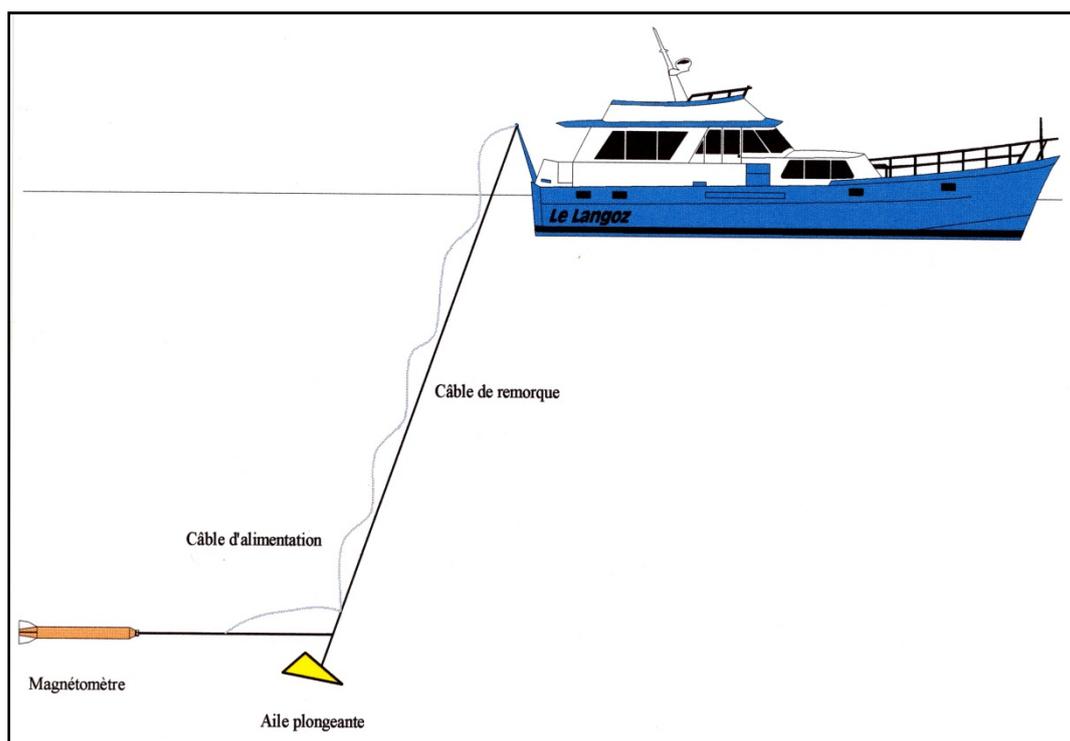
Le logiciel d'hydrographie permet de programmer une mission en choisissant les paramètres géodésiques, les limites de la zone de recherche, les routes suivies, la nature des capteurs de position, les différents sondeurs. En général

ce type de logiciel n'intègre pas de fonction magnétométrie mais ils sont facilement modifiables pour assurer cette fonction, c'est le cas du logiciel Hypack<sup>12</sup>.

Le logiciel permet d'enregistrer en continu l'ensemble des données, de les stocker puis après traitement par des logiciels adaptés de les restituer sous différentes formes : profils séparés, cartes d'iso valeurs en deux dimensions, représentations en trois dimensions.

### 3.5 – Mise en oeuvre

La mise en oeuvre d'un magnétomètre nécessite un abri de navigation permettant de mettre en place le matériel et les alimentations électriques correspondantes.



**Figure 13** – Mise en oeuvre du magnétomètre avec une aile plongeante

La vitesse de prospection est un compromis entre la durée de couverture d'une zone et la densité de la couverture. Les vitesses basses de 3 à 4 noeuds ont parfois l'inconvénient d'être proches des vitesses minimales des bâtiments et/ou des allures vibratoires.

Il importe aussi que le bâtiment ait une stabilité de route suffisante et que l'homme de barre soit apte à suivre les routes rectilignes qui lui sont ordonnées. Si les routes choisies sont Nord-Sud ou Est-Ouest, l'homme de barre peut utiliser directement les indications du récepteur GPS pour suivre sa route. Les routes à suivre peuvent aussi être présentées à l'homme de barre sur un écran d'ordinateur.

Un court apprentissage est nécessaire, mais pour un bon barreur l'adaptation est rapide.

La distance entre le magnétomètre et le navire remorqueur doit être suffisamment grande, le magnétomètre doit en effet être suffisamment éloigné des masses de fer se trouvant à bord. Sur un petit bâtiment cette longueur doit être au

<sup>12</sup> Logiciel Hypack de chez Coastal Oceanographics

moins de 15 à 20 m. En cas de perturbation brutale et répétée du signal, il faut augmenter la longueur de câble filé pour s'assurer que ces parasites ne sont pas dus aux masses de fer du remorqueur.

### **3.6 -- Choix des paramètres de recherche.**

#### - Choix des systèmes géodésiques, contrôle initial du positionnement.

L'exécution de la prospection en mer et la manipulation des données nécessitent que soient choisis avec rigueur les systèmes géodésiques employés tout en s'assurant que l'on dispose des moyens de conversion de l'un à l'autre. En effet la nécessité de travailler sur une carte marine impose l'utilisation du système de coordonnées géographiques dans un système de projection Mercator.

En règle générale les récepteurs GPS possèdent une bibliothèque des différents systèmes géodésiques utilisés dans le monde. L'opérateur peut ainsi choisir la géodésie voulue, celle de la carte marine par exemple. On pourra lire sur l'écran du récepteur GPS, les coordonnées dans le système géodésique sélectionné, mais celui-ci délivrera toujours ses messages vers le logiciel d'exploitation en coordonnées WGS 84. Il faut donc être conscient de cette différence pour éviter toute confusion.

L'ellipsoïde de référence généralement utilisé est maintenant le WGS 84. Les cartes marines donnent dans leur cartouche les corrections à appliquer pour passer de la géodésie locale à celle du WGS84.

Il est important après avoir choisi un système géodésique de travail, et l'avoir introduit dans le logiciel d'exploitation, de vérifier que la position du navire est correcte et que la zone à couvrir est située au bon endroit. Cette vérification doit être effectuée au début et à la fin de la mission mais aussi chaque fois que possible pendant la mission pour assurer la cohérence des données acquises.

#### - Réglage des décalages ("off-set")

Il s'agit d'afficher des réglages qui permettent de tenir compte du décalage entre la position des capteurs et les niveaux ou les points de référence correspondants.

Décalage dans la mesure des sondes : le capteur du sondeur est situé sous la surface, la sonde est donc systématiquement supérieure à celle qui est lue sur le capteur du sondeur, la distance entre la surface et l'immersion de la sonde doit être affichée.

Décalage dans la mesure de la position du magnétomètre : la position géographique prise en compte est celle de l'antenne du GPS différentiel, cependant le magnétomètre se trouve à une certaine distance en arrière et peut-être décalée par rapport à l'axe du bâtiment en fonction du point de remorquage choisi. Les décalages ("off-set") correspondants sont affichés ou vérifiés avant chaque passe de recherche, permettent d'enregistrer la position exacte du magnétomètre. Le logiciel calcule en temps réel la position du poisson en prenant en compte la longueur de câble filée et la trajectoire du navire.

Lors de l'affichage de ces décalages il est très important de vérifier le signe des valeurs introduites, donc le sens de ces décalages, car il s'agit d'une source fréquente d'erreur.

A l'instar des réglages de la géodésie, il est important de vérifier ces réglages pendant la phase de test au début de l'opération.

#### - Choix de l'immersion du magnétomètre.

Le choix de l'immersion du magnétomètre est un compromis entre l'amélioration du signal et la sécurité du poisson. L'immersion optimale est choisie avant chaque profil. On choisit en général une distance de passage au-dessus du fond comprise entre 5 et 15 m. Cette méthode présente un inconvénient si, comme c'est parfois le cas, le fond varie d'une manière importante au cours d'un profil, par exemple, au passage d'un sillon transversal.

Lorsque le fond est important, pour diminuer la distance de passage et améliorer la détection des anomalies le poisson du magnétomètre est équipé d'un dépresseur<sup>13</sup>. Ce dépresseur permet de faire plonger le poisson de manière à le maintenir à une distance de passage comprise entre 5 et 15 m du fond. L'immersion correspondante est réglée à chaque passe en fonction des profondeurs du profil entrepris.

#### - Choix de l'écartement entre les profils.

Cet écartement concerne les profils effectués au cours de la recherche initiale. Il s'agit de choisir un écartement entre les profils qui permette de détecter à coup sûr l'épave recherchée. L'écartement des profils est en général déterminé en augmentant de 50% la distance estimée de détection de l'objet cherché. La distance de détection d'un objet (voir abaque ci-dessus) est quant à elle fonction de la masse de fer de l'objet recherché et du seuil de détection du magnétomètre compte tenu du bruit de fond. Il s'agit de faire en sorte que l'anomalie dépasse d'une manière significative ce bruit de fond. Le bruit de fond est dû à la fois à l'appareil lui-même mais aussi à l'état de la mer.

Des profils de recherche intermédiaires pourront être effectués pour analyser ou localiser précisément l'origine d'une anomalie paraissant correspondre à la valeur recherchée.

#### - Choix de la fréquence d'acquisition des mesures.

Pour essayer d'augmenter le rendement des recherches la fréquence de recueil des informations peut être augmentée. La conséquence de cette modification est de permettre une vitesse du bâtiment plus grande, l'inconvénient est d'augmenter le volume des informations recueillies et d'allonger les temps de traitement des données. Cependant l'intérêt d'augmenter la fréquence d'échantillonnage est aussi, et surtout, l'amélioration de la qualité de la restitution des données acquises car dans ce cas, on diminue la distance parcourue entre deux acquisitions. Le lissage de la courbe de variation du champ obtenue dans ces conditions est alors amélioré.

### **4 - Restitution des données.**

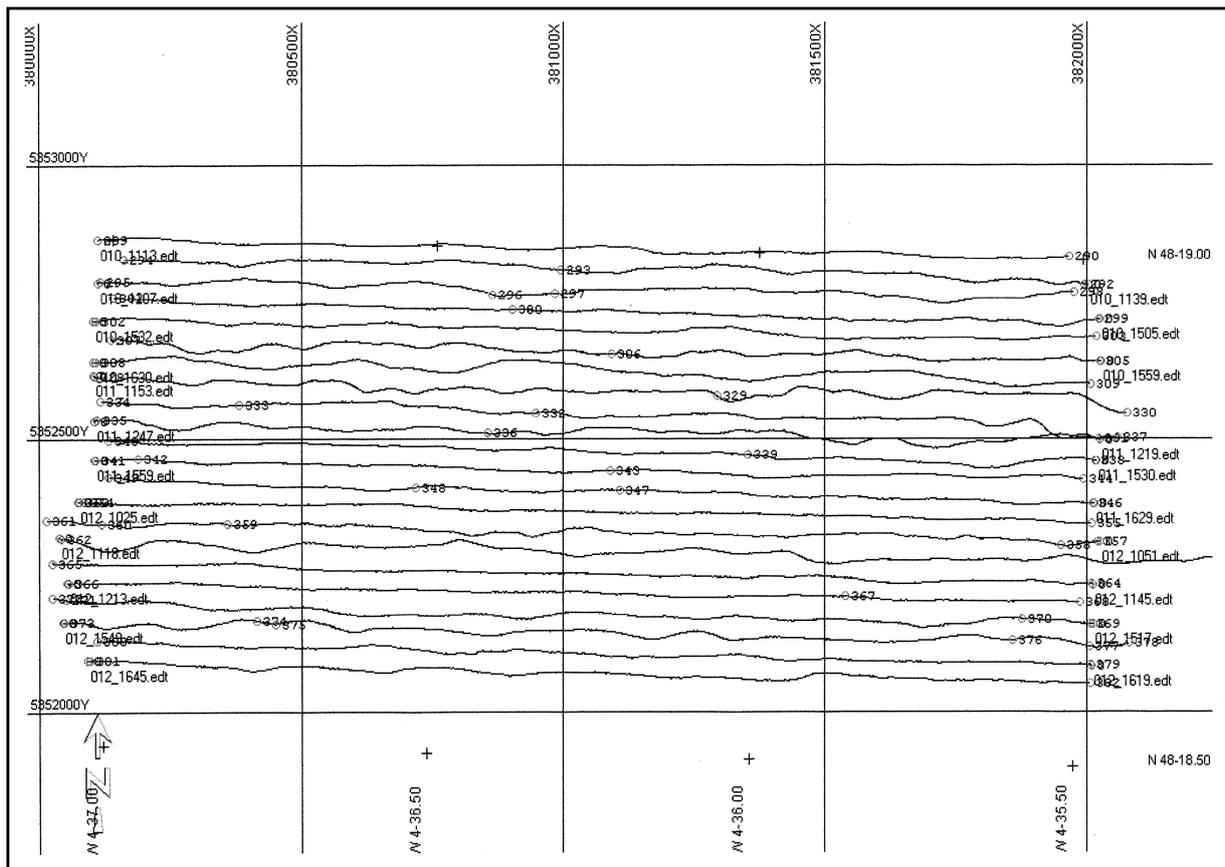
Les données peuvent être restituées sous plusieurs formes

#### **4.1 - Restitution des routes suivies (Figure 14)**

Cette restitution est importante dans la mesure où elle permet de vérifier la couverture de la zone et de détecter d'éventuels trous laissés par des écarts de navigation. Cette restitution implique que chaque profil reçoive un numéro de baptême qui permette de la localiser.

---

<sup>13</sup> Nous utilisons une aile 166 V FIN de ENDECO



**Figure 14** - Exemple de restitution des routes suivies. Les principales anomalies détectées y sont indiquées. (GRAN/ DRSM - Avant Goulet de Brest – 2001)

#### 4.2 – Restitution du champ magnétique le long de chaque profil

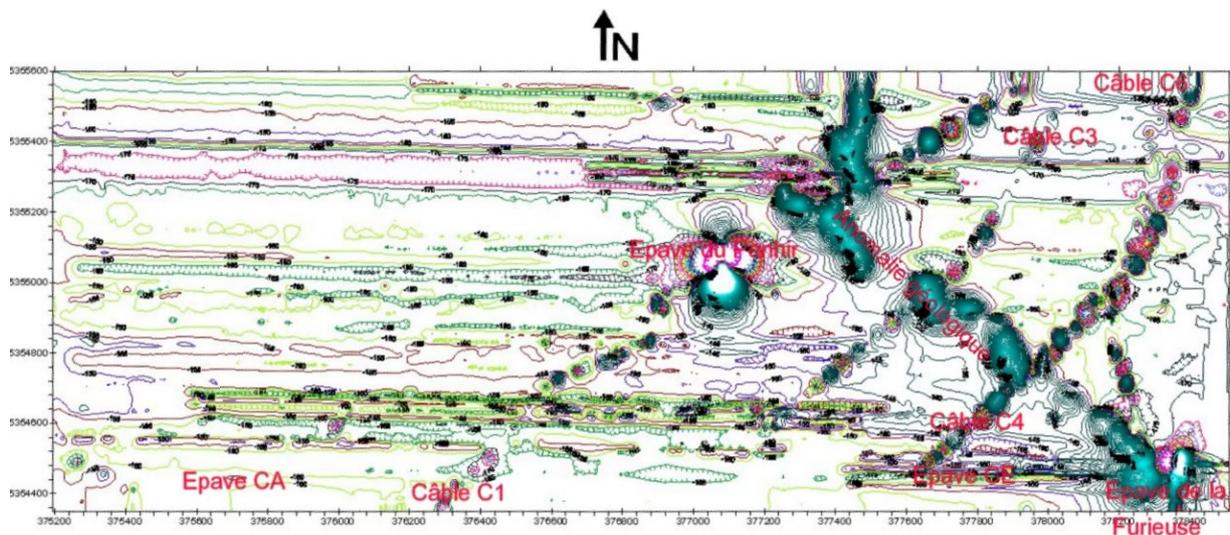
(Fig. 10).

Pour chacune des passes de recherche effectuées un profil permet de restituer la valeur du champ magnétique, le long de la route suivie. La route effectivement suivie par rapport à la route théorique peut également être restituée. Cette restitution permet une analyse fine de chaque détection et apporte le complément nécessaire au relevé manuel effectué pendant la prospection.

#### 4.3 – Restitution du champ magnétique brut en deux dimensions

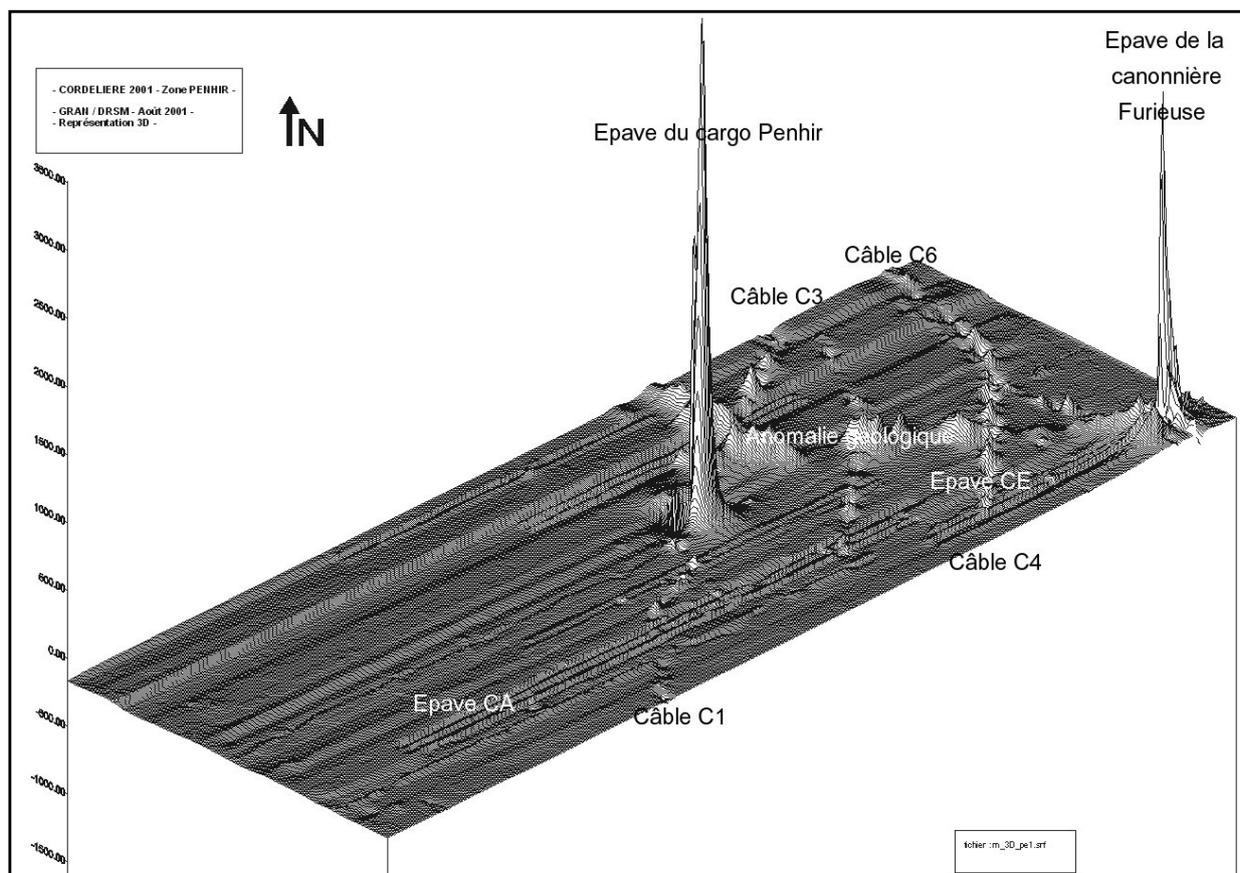
(Fig. 15).

Le champ magnétique apparaît sous forme de courbes d'iso valeurs, soit en noir et blanc, soit avec des échelles de couleur. L'intérêt de cette représentation est de pouvoir analyser la répartition des anomalies et de confirmer la présence d'anomalies ayant un développement spatial particulier : anomalie géologique liée à une faille ; câble ou conduite sous-marins. Elle permet enfin de donner des positions relativement précises de ces anomalies.



**Figure 15** - Restitution en 2D du champ magnétique (Zone située dans le Sud de l'anse Bertheaume à l'ouvert du goulet de Brest). On distingue outre deux épaves modernes (cargo *Pen Hir* et canonnière fluviale *Furieuse*, les anomalies générées par les câbles de transmission transatlantiques, et l'anomalie géologique correspondant à la faille qui va de Bertheaume à Camaret.(GRAN/ DRSM - Avant Goulet de Brest – 2001)

#### 4.4 – Restitution du champ magnétique brut en trois dimensions.



**Figure 16** - Restitution en 3D de la même zone que ci-dessus (Fig.15) CA et CE sont des épaves enfouies de petits navires de pêche. (GRAN/ DRSM - Avant Goulet de Brest – 2001)

Ce type de restitution est parlant et permet de comparer les anomalies entre elles même si le calcul des positions est plus difficile.

L'expérience acquise au cours d'une quinzaine de campagnes de prospection magnétométrique nous a amené à réfléchir à la meilleure manière de présenter le traitement des données recueillies. Une première solution, adoptée au cours des prospections effectuées à l'ouvert du Goulet de Brest entre 1996 et 2001 a été de présenter le champ magnétique mesuré en deux dimensions avec courbes d'iso valeurs du champ, et en trois dimensions.

Ce type de représentation était accompagné d'une part, d'un plan des routes suivies, d'une bathymétrie de la zone et, d'autre part, d'une restitution de la valeur du champ magnétique mesuré au cours de chacune des lignes suivies pendant la prospection.

Les deux premiers types de représentation ont chacun leur avantage : la représentation en trois dimensions donne une meilleure perception d'ensemble du champ magnétique dans une zone donnée et, en particulier, une meilleure appréciation des valeurs relatives des différentes anomalies ; la représentation en deux dimensions donne par contre une meilleure idée de la localisation de ces anomalies.

Cependant, ce qui est représenté dans ces restitutions n'est qu'une valeur mesurée du champ magnétique et non la réalité physique du phénomène. Il s'agit d'une valeur relative du champ magnétique fonction des paramètres de recherche adoptés et pour l'essentiel de la distance de passage du magnétomètre au-dessus du fond et des objets détectés. En conséquence, si ces méthodes de représentation permettent de localiser certaines des anomalies les plus importantes et d'avoir une idée générale du champ magnétique de la zone, comme par exemple la localisation d'anomalies d'origine géologiques, elles ne fournissent pas de données permettant d'avoir la possibilité d'analyser les anomalies détectées et en particulier, d'évaluer les masses ferreuses correspondantes et leur profondeur d'enfouissement.

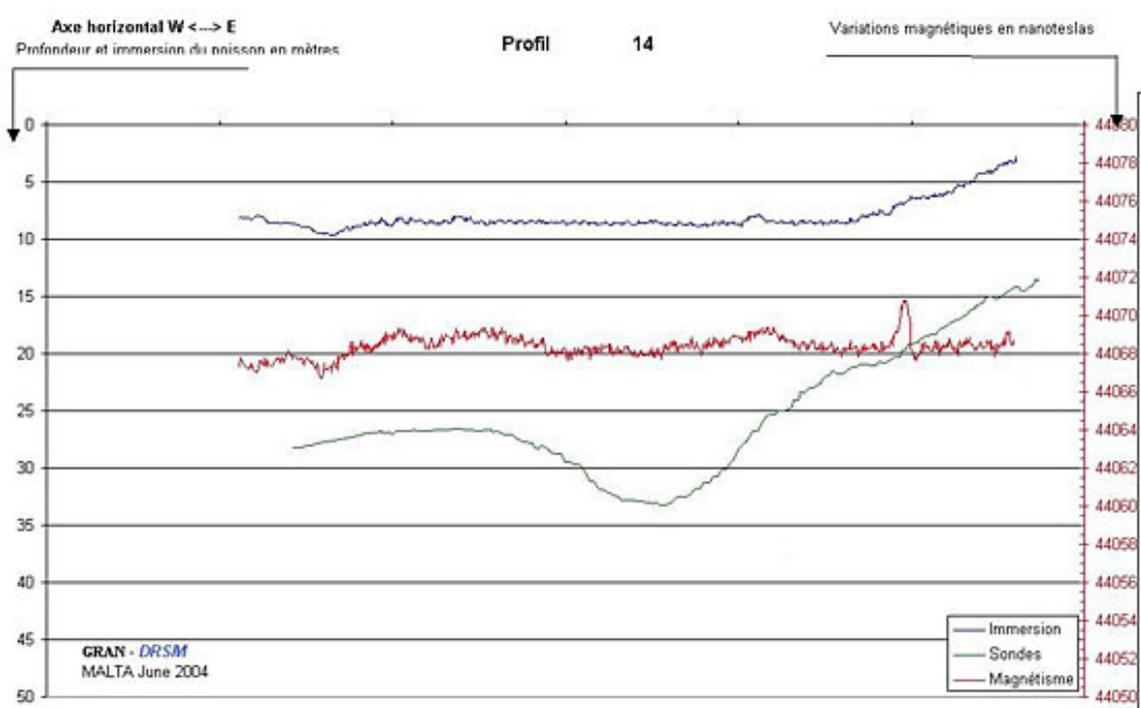
C'est au cours d'une prospection effectuée en Baie de Valparaiso en novembre 2002 où placés devant la nécessité d'intégrer les mesures effectuées dans une base de données géo référencée (SIG), nous avons été amenés à définir la meilleure manière d'alimenter cette base en données physiques absolues ou à tout le moins analysables.

En coopération avec Hervé Blanchet (DRSM)<sup>14</sup>, il a été défini un type de représentation où figurent à la fois la valeur du champ magnétique mesuré, l'immersion du magnétomètre (poisson) et la bathymétrie instantanée, permettant de connaître à chaque instant la distance de passage du magnétomètre au-dessus du fond et la valeur du champ magnétique correspondant.

Ce profil étant effectué le long d'une ligne de prospection graduée en positions projetées sur l'axe des X, il est nécessaire de se reporter à la restitution du graphique des routes suivies pour connaître la position exacte de l'anomalie.

---

<sup>14</sup> Détection et Recherche Sous-Marine (DRSM)



**Figure 17** - Graphique représentant une ligne de prospection. Pour des raisons de confidentialité, les positions (normalement inscrites en haut du graphique) ont été enlevées. (GRAN/ DRSM – Malte – 2004)

La courbe noire représente l'immersion du magnétomètre

La courbe verte la bathymétrie

La courbe rouge la valeur du champ magnétique.

Sur la droite, on voit une anomalie du champ magnétique qui correspond à la présence d'une masse de fer sur le fond ou bien enfouie dans le sédiment. La distance de passage de la sonde au-dessus du fond est égale à la valeur de la profondeur diminuée de l'immersion du magnétomètre soit :  $20 - 7,5 = 12,5$  mètres.

La valeur de l'anomalie (entre les valeurs maximales) est de 4 nano teslas.

Si l'on se reporte à l'abaque fournissant la valeur probable de la masse de fer détectée, on peut évaluer celle-ci à environ 100 kg. Il faut cependant se souvenir que les valeurs indiquées par ces abaques ne sont qu'indicatives.

### 5 - Corrections apportées aux mesures magnétiques.

Les données magnétiques brutes mesurées ne permettent ni de restituer d'une manière cohérente le champ magnétique local sur une zone étendue, ni de procéder à une analyse fine et à une comparaison des anomalies entre elles. Deux facteurs importants nous en empêchent :

- le plus important est la distance de passage du magnétomètre par rapport au fond. L'anomalie magnétique d'un objet ferreux varie, nous l'avons vu, comme l'inverse du cube de la distance, elle est donc très sensible à la distance de passage. D'un profil de recherche donné à un profil voisin<sup>15</sup>, la distance entre le magnétomètre et le fond n'est pas toujours la même, soit à cause de la marée, soit parce que le magnétomètre se trouve à une immersion différente (réglage différent de l'immersion). On se rend bien compte de ces différences en regardant la restitution des valeurs magnétiques brutes et l'aspect irrégulier (en tôle ondulée) de

<sup>15</sup> Sur de grandes zones de recherche, le temps écoulé entre deux passes peut atteindre une heure.

la valeur du champ magnétique dans le sens des profils de recherche (Figure 16 en particulier).

- le second facteur concerne les variations diurnes du champ magnétique (marée magnétique). En effet le champ magnétique varie en fonction de la hauteur du soleil. Ces variations enregistrées par l'Institut de Géophysique du Globe de Paris : Observatoire magnétique de Chambon-la-Forêt, sont fournies pour toute la durée d'une prospection, elles peuvent atteindre 40 à 50 nT et sont susceptibles de perturber l'analyse du champ magnétique d'un objet mesuré au cours de différents profils de mesure. Les données recueillies sont corrigées de ces variations.

L'application de certains algorithmes de calcul permet cependant de résoudre en partie ces difficultés (voir annexe 2).

## Annexe 1

### Evaluation de la masse de fer d'une épave : exemple de la *Cordelière*

Il est d'abord nécessaire de revenir sur l'armement d'une nef de 500 tx, tel qu'il est décrit par Antoine de Conflans en 1516 (Jal, 1842, p.42) :

"Pour armer une nef de 500 tonneaux est requis l'artillerie qui s'ensuit :

"Est besoing au belle de la nef. Deux canons serpentins. Deux grandes couleuvrines et deux bastardes qui font six belles pièces pour la belle.

Plus au chasteau-gaillard Deux couleuvrines moyennes, Deux canons serpentins et six faulcons qui serviront tant au chasteaulx que dans les basteaulx tant aux descentes que a lever ou mectre les ancrs. C'est le tout saize pièces de fonte : Quatre canons, deux grandes couleuvrines, quatre bastardes et six faulcons qui sont les saize dessus dicts.

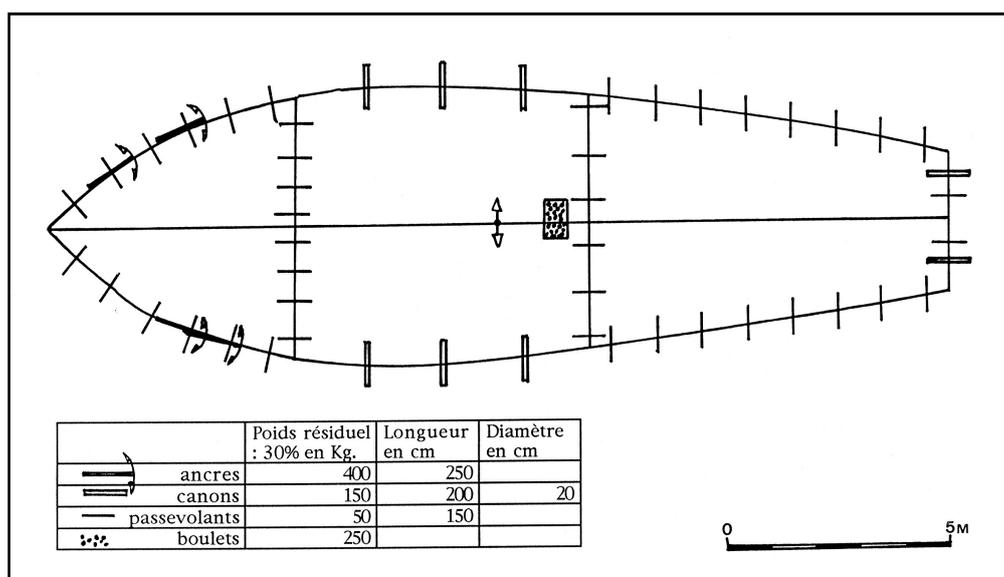
Plus six canons perriers pour les porteaulx, Deux au chasteau derrière et deux aux coustés du mast lesquels seront de fer.

Item plus est besoing a la dicte nef quarante huit passevolans de fer tirans plombets, chaicune à trois bouettes vingt-quatre au chasteau derrière huit par bande six au fronteau et deux sur le gouvernail qu'on mect aucunes foys dans les basteaulx quant on descend à terre.

Des autres vindtquatre au chasteau devant huit a chaicune bande ey huit sur les bittes qui sont vingtquatre, le tout en fer.

Item est besoing à la hune ung canon perrier a vingt-quatre boestes et dix hacquebutes a crochet pour ladicte hune; et c'est le moins qu'on peult faire a ladicte nef touchant ladicte artillerie."

Cette description nous a permis de faire un plan assez précis de la disposition de l'artillerie à bord de la *Cordelière* en tenant compte de l'ancre mouillée et perdue au moment de l'appareillage.



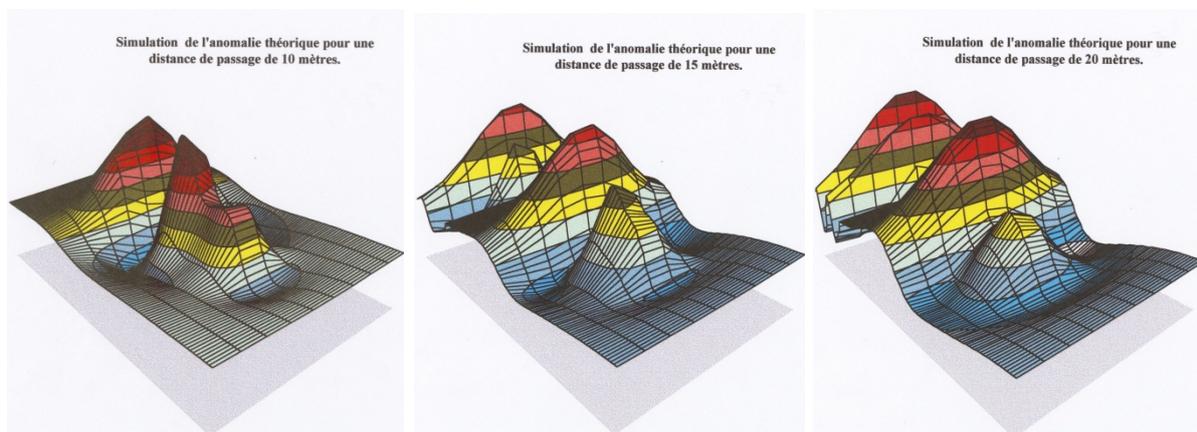
**Figure 18** - Disposition de l'artillerie et des ancres

Nous avons ensuite évalué la masse résiduelle de fer en nous basant sur l'expérience que nous avons acquise à ce sujet lors de la fouille d'une épave

contemporaine : la *Lomellina* coulée en Méditerranée en 1516. Les effets de la corrosion diminuent la masse de fer initiale. Pour donner un exemple, les éléments de la coque de la *Lomellina* étaient fixés par des clous en fer, mais aucun d'eux n'avait subsisté. Par contre les objets pesants : canons et ancres avaient gardé une proportion de fer relativement importante (50 à 60 %). Les boulets quant à eux étaient restés presque intacts, car ils avaient été fabriqués avec du fer natif.

Le plan ainsi établi a été confié aux ingénieurs de la société Thomson Marconi pour modéliser les anomalies générées par l'épave aux différentes distances de passage.

La modélisation effectuée (Figure 19) nous permet de voir que l'épave nous donne un signal supérieur à 10 nT sur une largeur 35 m pour une distance de passage au-dessus de l'épave inférieure à 15 m. La présence probable de deux épaves côte à côte nous a conduit à choisir un écartement de 37 m, soit 2/100 de minute de latitude.



**Figure 19** - Simulation de l'anomalie pour des distances de passage de 10, 15 et 20 m

## Annexe 2

### Traitements mathématiques : Procédés Magsalia et Sybaris. (texte rédigé par Bruno Wirtz<sup>16</sup>)

La pratique de la prospection magnétique exige a priori une très grande rigueur dans le positionnement des appareils, car la valeur de la grandeur magnétique mesurée dépend, plus que pour d'autres mesures, de la position de l'instrument par rapport aux anomalies. Cette étroite relation entre l'instrument et la source magnétique a pour conséquence une mise en œuvre délicate de la prospection magnétique dans le milieu marin. Les courants, le frottement solide sur liquide, la tension des câbles tractant le poisson et transportant des impulsions électriques dans l'eau salée, constituent autant d'obstacles à l'obtention de résultats cohérents et conformes à la réalité du fait physique.

Cependant, comme le sonar ne va pas au-delà du fond de la mer et que les ondes électromagnétiques ne pénètrent pas le milieu conducteur qu'est l'eau de mer. La mesure du champ magnétique reste l'un des rares moyens d'investigation du fond marin et de la zone proche située au dessous du fond. De ce fait, le repérage d'épaves ou d'objets dont la masse de fer est importante est facile et presque immédiat par la simple détection d'une anomalie. La présence de cette anomalie magnétique suffit souvent au commanditaire de la prospection. Cependant cette localisation doit être confrontée à la réalité de l'environnement. La question est alors posée de la masse de fer de l'objet détecté et de sa profondeur d'enfouissement. La réponse à ces questions conditionne évidemment les moyens à mettre en œuvre pour une exploration d'épave ancienne.

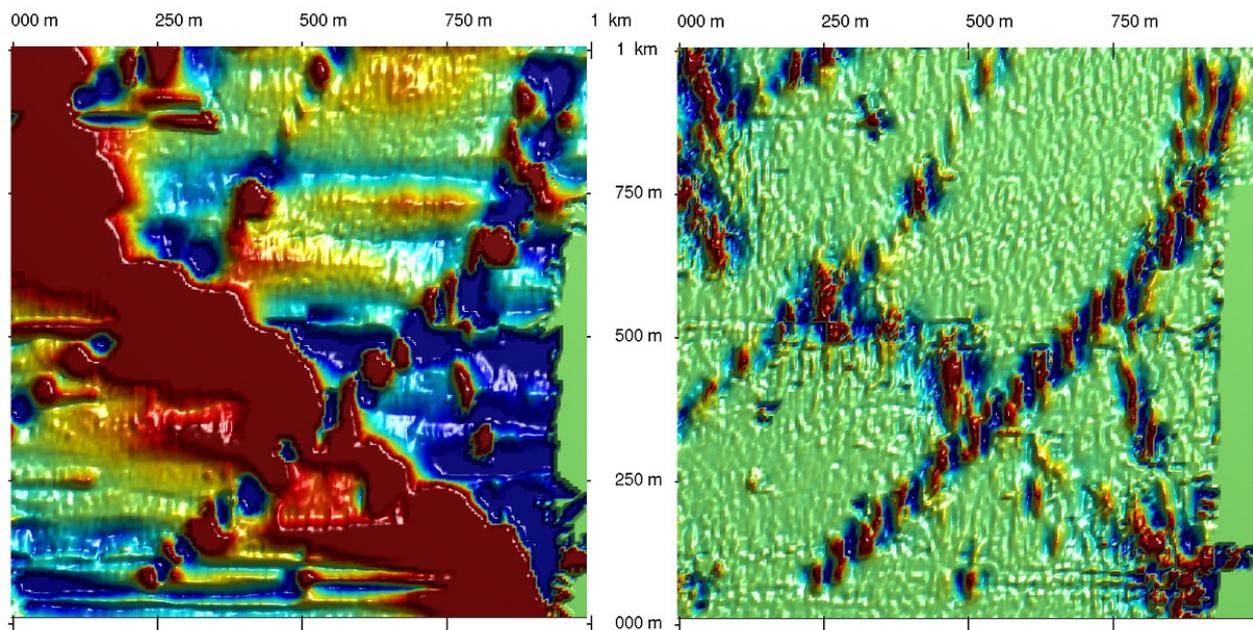
Le problème ainsi posé se transforme en problème algébrique selon un processus simple. La représentation simplifiée de l'espace sous forme de sphères magnétiques presque ponctuelles placées sur une maille parallélépipédique, a pour conséquence que la grandeur magnétique observée est la somme, pour toutes ces sphères voisines, des contributions de chacune au champ magnétique. En prenant autant de sphères que de points de mesure du champ, on forme ainsi un système où le nombre d'équations est égal au nombre d'inconnues. Les conditions sont donc requises pour que ce système admette une solution unique. Cependant, si la maille virtuelle est serrée, deux sphères voisines produisent des champs qui se ressemblent beaucoup. Ce phénomène d'instabilité est un obstacle à la résolution numérique du problème.

Le procédé Magsalia résout partiellement ce problème pour les champs magnétiques et le gradient vertical du champ magnétique. Son nom (Mag pour magnétisme et Salia pour rappeler le nom latin de la rivière Seille) rappelle qu'il a été mis au point dans le cadre du projet « Briquetage de la Seille ». Ce procédé a été plusieurs fois confronté à la réalité du terrain, avec succès. Son originalité est de remplacer une partie du calcul algébrique par des algorithmes basés sur des idées de géométrie projective, de faire comme si l'infini était un nombre comme un autre. Cependant, si

---

<sup>16</sup> Bruno Wirtz Chercheur du Laboratoire de Mathématiques de la Faculté des Sciences et Techniques (Université de Bretagne Ouest) et C.N.R.S. U.M.R. 6205.

ce procédé est bien adapté aux mesures terrestres ou aéroportées, la difficulté de la prise de mesure dans l'eau apparaît très clairement dans le cas des mesures en mer. Le lissé impeccable des mesures terrestres où s'égrènent les anomalies ponctuelles fait place, pour la donnée marine, à des cartes dont le relief semble creusé par les sillons d'un labourage intensif. Le procédé Sybaris (Système barycentrique d'interpolation du signal), est conçu pour corriger les défauts de mesure inhérents au milieu marin, comme la différence de profondeur, l'effet de marée, le différentiel d'ombrage sur les routes sud/nord et nord/sud. De la sorte, le signal qu'il produit est inversible selon le procédé Magsalia et produit une information claire issue d'une donnée apparemment trouble mais bien enregistrée. Les images récemment produites montre un gain d'ordre 10 ou 100 dans le repérage d'anomalies magnétiques. Le procédé appliqué aux prospections effectuées par le GRAN à l'ouvert de Brest (figure 20 ci-dessous) doit être validé par des plongées de vérification qui constitueront le baptême du feu de la méthode pour ce qui concerne le milieu marin.



**Figure 20** - Exemple d'application de la méthode : à gauche mesures du champ magnétique corrigées des variations diurnes, relevées au cours de la campagne 2001 du GRAN et à droite après traitement des données corrigées par le procédé SYBARIS en 2007. Les deux diagonales SO/NE sont des câbles sous-marins ; les anomalies orientées grossièrement SE/NO correspondent à l'anomalie géologique générée par la faille Bertheaume/Camaret.