

CLASSIFICATION DES SIGNAUX MAGNETIQUES TBF SOUS CONTRAINTE DE DECISION

QUINQUIS André - LATOUR Philippe

D.C.N BREST - Service G.E.S.M.A 29240 BREST Naval

RESUME

Dans cette communication, nous présentons le développement et l'évaluation des performances d'une nouvelle méthode d'analyse des signaux magnétiques TBF, permettant la classification de l'onde analysée sous contrainte de décision au plus tôt, à partir de l'identification d'un jeu de paramètres dans un ensemble fermé.

Le signal auquel nous nous intéressons est un signal vectoriel (au sens euclidien) à trois composantes représentant le champ magnétique créé par une masse ferromagnétique en déplacement et observé au cours du temps en un point de l'espace.

Cette source est modélisée soit par un dipôle magnétique, soit par un ellipsoïde uniformément aimanté.

La méthode étudiée repose sur la connaissance d'un espace vectoriel des signaux magnétiques (au sens de HILBERT) pour lequel nous avons su développer une base orthonormale de représentation permettant la génération analytique exacte des signatures de modèle dipolaire ou ellipsoïdal.

Le principe de traitement est établi selon une méthode projective dans cet espace. Celle-ci consiste en la comparaison des énergies de projection des signaux observés, incluant le bruit géomagnétique naturel parasite, sur l'ensemble des bases de représentation possibles dépendantes elles-mêmes des paramètres à identifier.

Après avoir présenté le problème et les hypothèses retenues, nous présentons la chaîne de traitement du classificateur, et des résultats de simulation à partir desquels il a été possible d'évaluer les performances théoriques de cette méthode d'analyse.

Par ailleurs les résultats d'une analyse statistique menée sur un grand nombre de scénarios possibles nous a permis d'établir une mesure de l'efficacité de la chaîne de traitement vue comme l'aptitude de la méthode à classifier les ondes reçues.

SUMMARY

This paper presents the development and the estimated performances of a new ULF magnetic signal analysis method allowing the possibility to classify the analysed wave under sooner decision constraint from the identification of a given set of parameters.

The signal is a three components vectorial signal which represents the magnetic field created by a moving ferromagnetic body and observed by a fixed sensor.

The body is assumed to be modelised either by a dipole or an uniformly magnetized ellipsoid.

The method described in this study is based on a known magnetic signal space of which has been built an orthonormal basis that makes possible to have an exact analytical generator of the dipolar or ellipsoidal signals.

The signal processing principle is built according to a projective method in this space. It lies in the comparison of the projection energy of the observed signals, including natural geomagnetic noise, over all possible basis related to the parameters to be identified.

I - INTRODUCTION

Le problème de la détection et de localisation d'objets magnétiques immergées, ou non, a fait l'objet de plusieurs études visant à mettre au point des systèmes dont l'information est ensuite traitée à partir d'algorithmes plus ou moins complexes.

Ce travail a pour objectif de mettre au point une nouvelle procédure de calcul des paramètres de source (Cf. § II) à partir de l'enregistrement de ses signaux magnétiques caractéristiques appréhendés au cours du temps par un capteur fixe.

After the description of the problem and the assumption we have made, we present the processing set and the simulation results from which we have estimated the theoretical performances of the method

By another way, results from a statistical analysis which has been conducted with a large number of possible scenarios have allowed us to evaluate the effectiveness of the algorithm seen as a measure of the fitness of the method to classify the received waveforms.

Dans ce contexte, un nouvel axe de recherche s'est porté sur la construction d'un espace vectoriel des signaux magnétiques. Cet espace permet l'analyse des signaux conformément à un modèle adopté (modèle dipolaire ou ellipsoïdal) et donc la détermination des paramètres de la source (vitesse, aimantations, localisations temporelle et spatiale ..).

Le problème d'estimation ou de classification se double ici d'une contrainte supplémentaire: Il nous faut estimer les paramètres au plus tôt, c'est à dire avec seulement la connaissance d'une partie de l'observation, afin de pouvoir prendre une décision au plus tôt quant à sa classification.



II - PRESENTATION DU PROBLEME

Nous supposons que l'objet à identifier suit une trajectoire rectiligne et nous faisons l'hypothèse que celle-ci est parallèle à un axe d'un repère géométrique euclidien de référence (figure 1).

Dans le cas d'un signal magnétique observé et induit par un objet en déplacement selon une trajectoire rectiligne et parallèle à l'axe Oy, les coordonnées x et z des différents points de mesure sont des constantes et y est la seule variable.

$$\text{En posant } D = \sqrt{x^2 + z^2} \text{ et } u = \frac{y}{D} = \frac{V \cdot (t - t_0)}{D}, \text{ où } V$$

désigne la vitesse de déplacement de l'objet ferromagnétique, et t_0 le temps qu'il mettra pour atteindre le plan π , on montre que chacune des composantes du champ magnétique est une combinaison linéaire des fonctions $f_0(u)$, $f_1(u)$, $f_2(u)$. [1]

Dans l'hypothèse où l'objet est assimilé à un dipôle les trois fonctions sont appelées les fonctions d'ANDERSON. Elles sont doublement paramétrées en V/D et t_0 . Elles sont indépendantes et appartiennent à un espace fonctionnel d'ordre 3 sur lequel on définit une norme et un produit scalaire. On définit alors une base de fonctions orthonormées d'ordre 3.

Le développement de l'expression du champ magnétique suivant les moments dipolaires équivalents de la source est généralement effectué avec l'hypothèse d'un objet ayant les dimensions à peu près du même ordre de grandeur dans toutes les directions.

Ce développement est valable en dehors de la sphère contenant tout l'objet. Dans le cas où l'objet est de forme très allongée, ce développement n'est pas intéressant car il ne permet des calculs que pour des points en majorité loin de l'objet.

Dans le cas d'un objet allongé, on a intérêt à chercher un développement valable non pas en dehors d'une sphère centrée sur l'objet mais en dehors d'un ellipsoïde centré sur l'objet.

Il faut donc effectuer les calculs, non pas en coordonnées cartésiennes, mais en coordonnées ellipsoïdales.

Ainsi, de la même façon que pour le dipôle, on peut exprimer le champ magnétique induit par un ellipsoïde sous forme de combinaison linéaire de trois fonctions indépendantes. Une de ces fonctions s'écrit:

$$h_0(u, v) = \frac{1}{r_1 r_2 r^3 \left(1 - \frac{v^2}{r^2}\right)}$$

$$\text{où } r_1 = \sqrt{1 + (u - v)^2} \text{ et } r_2 = \sqrt{1 + (u + v)^2}$$

et où $v = c/D$ désigne rapport de la demi focale de l'ellipsoïde et de D.

Les trois fonctions génératrices sont présentées sur la figure 2.

A partir des fonctions indépendantes $h_0(u, v)$, $h_1(u, v)$, $h_2(u, v)$, on peut également construire une base orthonormée H_i ($i = 0, 1, 2$). Mais contrairement au dipôle, il n'est pas possible de calculer cette base de manière analytique.

La source que l'on cherche à détecter ou à localiser voire même à classifier est caractérisée par un ensemble de paramètres que l'on peut scinder en deux sous-ensembles. Le premier sous-ensemble θ^0 contient les paramètres générateurs des fonctions élémentaires (V, D, t_0 , c), réunis en deux variables réduites ($u = V/D$, $v = c/D$). Le second regroupe ξ^0 les aimantations M_x , M_y et M_z et les différentes distances de localisation spatiale x et z.

On peut écrire:

$$B(\theta^0, \xi^0) = A(\xi^0) h(\theta^0)$$

$$\text{où } \theta^0 = \left\{ u = \frac{V}{D}, t_0, v = \frac{c}{D} \right\} \text{ et } \xi^0 = \{ M_x, M_y, M_z, x, z \}$$

où h représente l'ensemble des trois fonctions génératrices.

III - PRINCIPE

Le problème de décision auquel nous avons à répondre est celui de la classification d'une réalisation d'un processus aléatoire lié au phénomène utile. Le processus est rendu aléatoire par la présence de bruit supposé additif.

Nous disposons d'une certaine connaissance de l'information qui nous intéresse. Nous disposons d'un ensemble de fonctions génératrices de l'espace des signaux. Ces fonctions dépendent de l'espace des paramètres θ .

Le traitement de la décision adopté repose sur la projection du signal mesuré (signal utile + bruit) sur les bases génératrices. La méthode d'estimation des autres paramètres caractéristiques de la source est basée sur les différents résultats de projection et est développée dans [3].

Le traitement consiste à réaliser la projection de l'observation (de paramètres θ^0) sur les fonctions de base, générée à partir d'un ensemble de paramètres θ et à maximiser un critère en décrivant l'ensemble des paramètres possibles.

Le critère retenu est la maximisation de l'énergie projetée. D'après les principes du filtrage adapté, cette énergie sera maximale lorsque les paramètres θ seront le plus proche possible (au sens d'une certaine métrique) de θ^0 , c'est à dire adaptés au type de signal que l'on recherchait.

Une composante du signal (vectoriel à trois composantes) reçu s'écrit :

$$S_i(t) = \sum_{j=0}^2 a_{ij} h_j(\theta^0)$$

où θ^0 désigne le triplet de paramètres générateurs de l'observation.

où les a_{ij} sont les coefficients de la matrice A et $h_j(\theta^0)$ sont les trois fonctions génératrices du signal du modèle ellipsoïdal élaboré à partir de l'ensemble des paramètres θ^0 .

L'énergie totale du signal est donnée par

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^2 \langle S_i(t), S_i(t) \rangle$$

où $\langle a(t), b(t) \rangle$ désigne le produit scalaire de $a(t)$ et de $b(t)$.

L'énergie ε du signal s'écrit :

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \sum_{k=0}^2 a_{ij} a_{ik} \langle h_j(\theta^0), h_k(\theta^0) \rangle$$

L'énergie totale ε' recueillie après projection s'écrit :

$$\varepsilon' = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \sum_{k=0}^2 a_{ij}^2 \langle h_j(\theta^0), H_k(\theta) \rangle^2$$

Cette structure est équivalente à celle d'un filtre adapté à un signal connu dans un bruit décorrélé.

Néanmoins signal et bruit sont fortement corrélés. Le bruit prépondérant est le bruit atmosphérique qui présente une allure spectrale basse fréquence. Il nous faut définir une procédure qui puisse décorréler les deux signaux inclus dans l'observation.

L'expression de filtrage adapté est alors obtenue en calculant l'expression:

$$S_k^t(\theta^0) \Gamma_B^{-1} H_j(\theta)$$

$-\Gamma_B^{-1}$ représente l'inverse de la matrice de covariance du bruit parasite à la mesure, que l'on suppose être estimée préalablement pendant une phase où il n'y a pas eu de signal utile.

L'expression $S^t \Gamma^{-1} H = S^t (\Omega^{-1})^t \Omega^{-1} H$ nous permet de scinder le traitement à effectuer sur X pour détecter H. Elle peut s'interpréter comme étant le produit scalaire $S_b^t H_b$ où :

$$* S_b = \Omega^{-1} S \text{ est l'observation blanchie.}$$

* $H_b = \Omega^{-1} H$ est le motif recherché modifié après passage dans le filtre de blanchiment.

L'opérateur de blanchiment est donc équivalent à $\Gamma^{-1/2}$ (racine carrée de la matrice inverse de covariance du bruit).

IV - ALGORITHME (figure 3)

La première opération consiste à estimer la matrice de covariance du bruit Γ . Afin d'améliorer le rapport signal sur bruit et d'éliminer la totalité du bruit en dehors de la bande utile des signaux classifiables, les signaux sont filtrés par un filtre passe-bande d'ordre 2. L'estimation de Γ dure tant que le signal utile est absent de l'observation. Cette estimation sera d'autant meilleure que la tranche temporelle qu'occupe le bruit seul est longue.

Dès que le signal apparaît (instant déterminé à partir d'un critère de détection), on fige la matrice inverse de covariance afin d'en extraire l'opérateur de blanchiment. L'observation est ensuite blanchie puis projetée sur les bases générées à partir d'un triplet de paramètres θ choisi dans l'ensemble de tous les triplets possibles, filtrées et blanchies par le même opérateur. En bout de chaîne de traitement on ne sauvegarde que le triplet ayant engendré le maximum d'énergie projetée, afin d'extraire les autres paramètres propres de la source.

La suite du traitement consiste à saisir de nouveaux échantillons (informatifs sur la source) et à répéter le traitement (sans estimation de l'opérateur de blanchiment).

V - RESULTATS

Les figures 4, 5, 6 représentent respectivement les erreurs d'estimation sur u , t_0 , v en fonction du pourcentage de signal reçu et pour différents rapports signal sur bruit (variant de 4 à 26). Le rapport signal sur bruit est défini par le rapport de l'amplitude maximale du signal et de l'écart type du bruit dans la bande utile des signaux.

Ces erreurs d'estimation décroissent au fur et à mesure que le rapport signal sur bruit ou que le pourcentage de signal analysé augmente. Le manque de simulations réalisées à ce jour ne nous permettent pas de conclure de manière définitive. Néanmoins ces résultats laissent à penser qu'il est possible d'obtenir une estimation correcte de u avec moins de 50 % du signal si le rapport signal sur bruit est supérieur à 10.

De même quel que soit le rapport signal sur bruit considéré, la localisation temporelle de l'objet se concrétise avec environ 50 % de la forme d'onde (passage dans le plan vertical du capteur).

Quant à l'estimation de v , même si elle demeure imprécise avant analyse de 60 % de la forme d'onde, on obtient une estimation satisfaisante à partir du traitement de plus d'informations.

VI - EVALUATION DE LA METHODE

La méthode de traitement présentée ci-dessus est une méthode de classification. Elle peut être vue comme une classification "morphologique" des formes d'ondes observées. Pour évaluer les performances de celle-ci et donc donner une "mesure" d'efficacité, nous avons développé une analyse statistique élaborée à partir des considérations de la théorie de la décision appliquée pour ce contexte au cas multi-hypothèses.

Le problème de décision auquel nous avons à faire est le suivant: Parmi N valeurs du paramètre multidimensionnel θ pris dans un espace Θ partitionné en classes, nous devons décider à partir d'une réalisation d'un phénomène engendré par ce paramètre à quelle classe il appartient. Pour notre application, l'espace Θ n'est pas facilement probabilisable, θ ne peut pas être considéré comme un élément aléatoire mais comme un paramètre inconnu. La méthode de décision mise en place est donc un modèle non Bayésien. Nous disposons, pour résoudre ce problème, d'une fonction de décision élaborée à partir de la fonctionnelle ϵ_{ij} qui est

l'énergie totale de projection d'un signal de paramètre θ_i sur une base de paramètre θ_j . Cette fonction est rattachée à la situation (H_i, δ_j) où δ_j est la décision de retenir la classe contenant le paramètre θ_j .

Sur un grand nombre d'épreuves M , on évalue le taux de mauvaise décision t_{ij} . S'il est fort ceci revient à dire que le signal de paramètre θ_i est un signal "fortement" proche d'un signal de paramètres θ_j . S'il est faible, on conclut qu'il est facilement discriminable au regard du signal de paramètre θ_j .

$$\text{On calcule alors le taux global } T_i = \sum_{k=1, k \neq i}^N t_{ik} \text{ qui}$$

exprime la séparation du signal de paramètre θ_i vis à vis de tous les signaux.

$$\text{Enfin, on évalue le risque global } R = \sum_{i=1}^N T_i \text{ qui}$$

exprime le "pouvoir séparateur" de la méthode (ou aptitude à pouvoir discriminer les signaux entre eux) vis à vis de la "morphologie" des signaux à traiter. Cette dernière quantité permet d'obtenir une mesure d'efficacité de la méthode.

Remarque: Le coût de décision α_{ij} rattaché à la décision (H_i, δ_j) est pris égal à 1 et ce quel que soit la distance (au sens d'une certaine métrique) $\|\theta_i - \theta_j\|$.

Les résultats statistiques obtenus sont présentés sur les figures 7 (résultat acquis sans traitement préalable sur les signaux) et 8 (résultat acquis après traitement (filtrage passe-bande et filtrage de blanchiment)). Ils représentent la distribution selon les valeurs de u et de v possibles du taux de bonne décision.

Par commodité nous avons préféré calculer le "risque" global de bonne décision. Sans traitement préalable, il s'élève à 0.41 pour l'ensemble des signaux lorsque le rapport signal sur bruit est égal à 18. Il atteint 0.75 lorsque l'observation est traitée par la chaîne de traitement complète. Cette mesure d'efficacité exprime que, statistiquement, dans 75 % des cas les signaux sont correctement identifiés, tous paramètres confondus.

[1] PRETET G " Méthodes de détermination du moment magnétique dipolaire équivalent d'un sous-marin à partir des signaux magnétiques comportant des termes d'ordre quelconque" Rapport GESMA 1202. 1980

[2] PRETET G " Champ magnétique créé par un objet de forme allongée" Rapport GESMA 1151. 1980

[3] QUINQUIS A " Classification des signaux magnétiques TBF sous contrainte de décision". Thèse de doctorat nouveau régime (Université de BREST). 1989

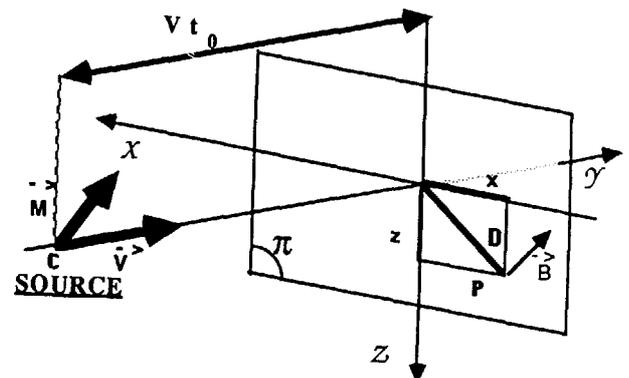


FIGURE 1 : Schéma de principe

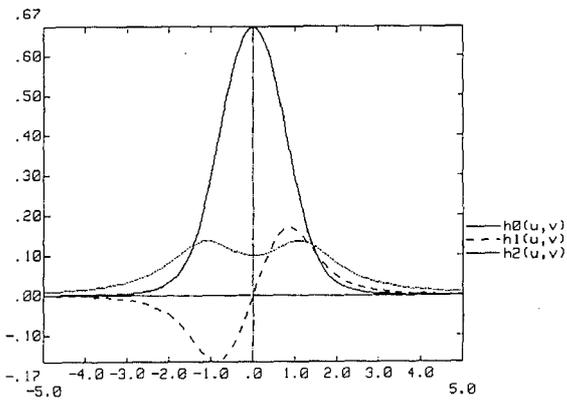


FIGURE 2 : Fonctions génératrices du modèle ellipsoïdal

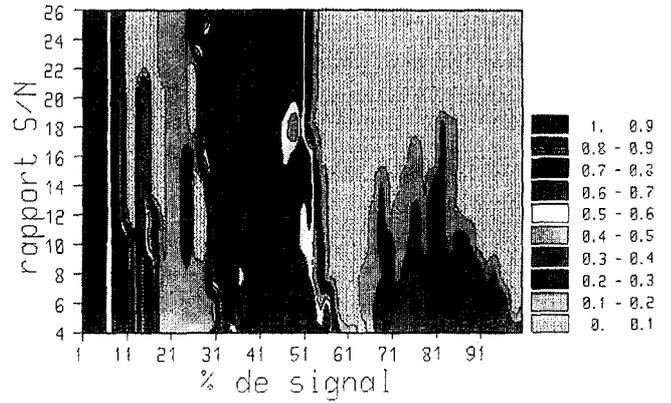


FIGURE 6 : Estimation de v en fonction du pourcentage de signal reçu et pour différents rapports signal sur bruit

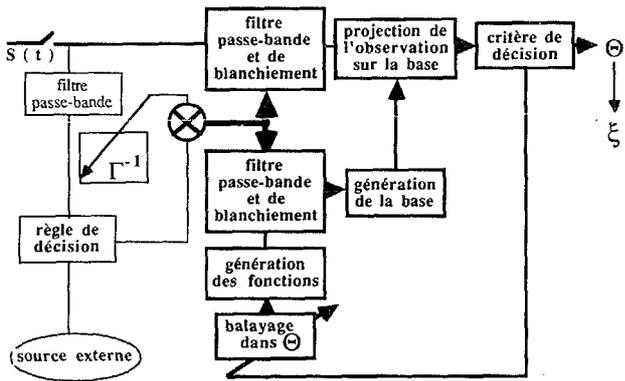


FIGURE 3 : Synoptique de traitement

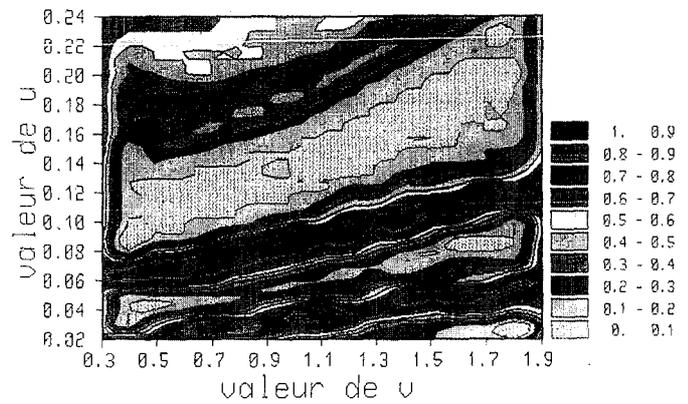


FIGURE 7 : Taux de bonne classification sans traitement préalable du signal noyé dans un bruit coloré pour un rapport signal sur bruit égal à 18

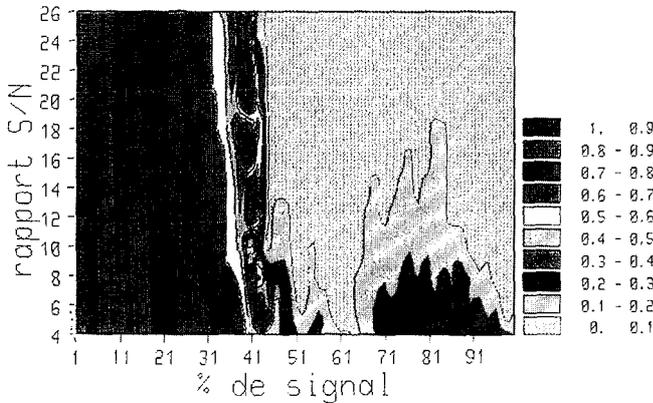


FIGURE 4 : Estimation de u en fonction du pourcentage de signal reçu et pour différents rapports signal sur bruit

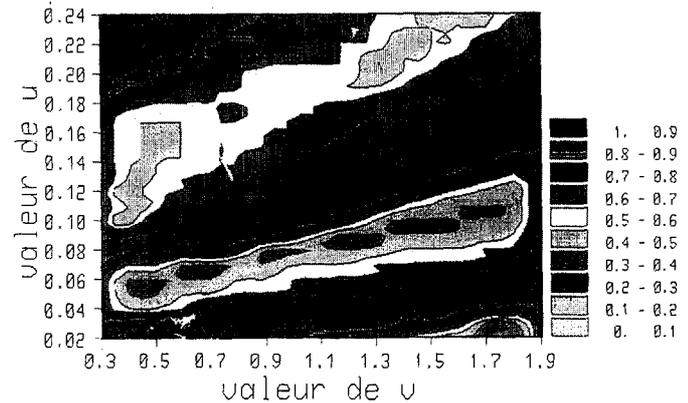


FIGURE 8 : Taux de bonne classification après traitement du signal noyé dans un bruit coloré pour un rapport signal sur bruit égal à 18

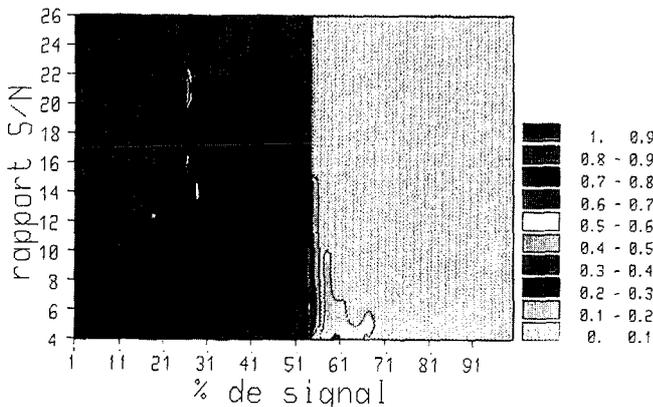


FIGURE 5 : Estimation de t_0 en fonction du pourcentage de signal reçu et pour différents rapports signal sur bruit