



SYSTEME MULTI-EXPERT POUR LA SURVEILLANCE OCEANIQUE A PARTIR D'UN RESEAU DE MAGNETOMETRES HAUTE SENSIBILITE

Stéphane GUEDON, Bruno FLAMENT, Roland BLANPAIN

LETI (CEA - Technologie Avancées) DSYS - CEN/G - 85X
F 38041 Grenoble Cedex
E-mail: guedon@dsys.ceng.cea.fr

RÉSUMÉ

Le travail décrit dans cet article a été guidé par les besoins de prise en compte de toute l'information disponible, afin d'aider l'opérateur à prendre les meilleures décisions dans le cadre de la surveillance sous-marine par réseau de capteurs RMN. Nous présentons notre approche de planification des tâches pour la résolution d'un problème complexe tels l'apprentissage des bruits, la séparation optimale des sources et la détection. Le contrôle du séquençement des méthodes de résolution nous permet de garder les avantages d'un système à base de connaissance sans les inconvénients tels les temps d'exécution trop longs et leur manque d'efficacité pour des modèles complexes. L'organisation des tâches s'effectue de façon réactive suivant les modifications de l'environnement opérationnel. Une étude cognitive est menée auprès des experts des domaines concernés. L'architecture "BlackBoard" répond à notre problème de modélisation. Raisonner pour planifier nécessite la prise en compte de critères extraits des caractéristiques mises en évidence à l'aide d'outils standards de traitement du signal

ABSTRACT

The work described in this article has been conducted by the needs to take into account all the available information to help operator to take optimal decisions with an RMN magnetic sensors network for undersea exploration. Tasks planification is used for the resolution of complex problems such as noise learning, source splitting and detection. A scheduler of the resolution methods allows to keep the advantages of a knowledge base system without its drawbacks (high processing times and lack of efficiency for complex models). Tasks managing is reactive to the modifications of the operational environment. A cognitive study has been held with experts on their own field. The BlackBoard, an AI architecture, is used to modelise problem resolution. Reasoning for planification involves the definition of several criteria. Each of these criterion is defined by features extracted from signal data with standards signal processing algorithms.

1. INTRODUCTION

Pour la surveillance d'une zone de mer au large ou à proximité des côtes, on dispose en réseau un ensemble de magnétomètres RMN (Résonance Magnétique Nucléaire) haute sensibilité. A la détection d'un signal utile dans un ensemble de bruits perturbant les mesures [BL79][FL92], sont associés les problèmes de prise en compte de toute l'information disponible et de séquençement des algorithmes de traitement des signaux magnétiques, spécifiques à l'état des phénomènes étudiés. Or seul l'expert du domaine est capable hors des contraintes opérationnelles (stress, temps réel...), d'extraire l'information utile et de décider opportunément de la meilleure stratégie de traitement à adopter. En outre, il sait optimiser ces choix pour chaque situation géographique et géométrique imposée au réseau. Par contre, l'opérateur sur site, même entraîné, ne peut pas intégrer quantitativement et qualitativement toutes les informations relatives au réseau et à son environnement et prend ainsi des décisions sous-optimales. Aussi nous proposons un système multi-expert d'assistance à l'opérateur qui permettra à terme, d'appréhender le problème de la détection dans sa globalité; nous nous sommes limités dans un premier temps au problème de choix des traitements à appliquer aux signaux magnétiques en vue de la réduction de bruit puis de la détection d'une anomalie. Notre approche est architecturée "BlackBoard" et développée sous T.R.A.M. [K084]. Nous expliquons tout d'abord ce qu'est l'organisation des tâches de traitement dans un tel cas, puis comment on envisage la modélisation de la connaissance experte et enfin on explique la façon dont on a conçu le premier système de surveillance.

2. ORGANISATION DES TACHES

L'organisation des tâches (travaux déterminés que l'on doit exécuter pour la surveillance d'une zone de mer) permet de définir les meilleures séquences d'actions pour atteindre un objectif assigné. On appelle ces séquences des plans d'action. Ceux-ci sont conçus hors ligne par concertation des experts sur le problème de la détection magnétique. On décompose la résolution de ce problème en cinq objectifs à atteindre. Le premier concerne la prise en compte de toute l'information disponible pour améliorer la précision des résultats de traitement et pour permettre de prendre les meilleures décisions pour la planification des tâches. Le second est la gestion du temps. On se place dans le cadre de fonctionnement en boucle fermée. En contexte opérationnel, les signaux à interpréter par notre système ont un flux d'arrivée régulier et doivent être traités dans une fenêtre temporelle ajustable. Le troisième, plus dépendant de l'application et donc sensible aux événements extérieurs, concerne l'apprentissage des bruits en prenant pour hypothèse l'absence d'anomalie magnétique. La présence d'une anomalie magnétique provoque l'interruption du plan en cours et la transition vers le quatrième objectif: la détection. Le mécanisme d'interruption est constitué d'une sauvegarde préalable des résultats des traitements sur les signaux nommés références bruit-seul. L'objectif final d'aide à la décision nécessite la résolution du problème de communication entre l'opérateur et le système; saisie du complément d'information demandé par l'opérateur et affichage des caractéristiques, critères et déductions fournis par le système multi-expert.

L'enchaînement de ces plans d'action nécessite un processus décisionnel réactif pour, à la fois permettre un fonctionnement en temps établi et raisonner pour planifier. Le diagramme des états de



notre système correspond aux différents objectifs et combinaisons que peut prendre le système de surveillance (fig 2.1).

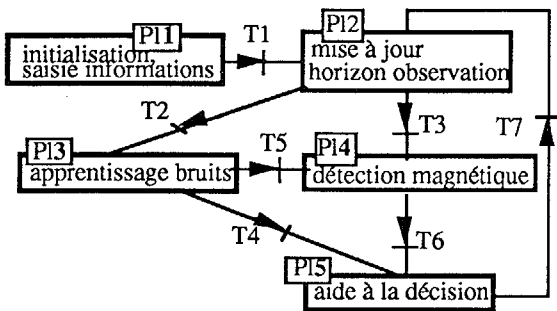


figure 2.1: diagramme des états du système de surveillance

On transite d'un plan à l'autre si l'objectif de résolution précédent a soit été atteint ou bien n'est plus valide. Chaque plan tente de résoudre un problème particulier en décomposant celui-ci en sous-problèmes résolus par des sous-plans. Ces sous-plans sont choisis suivant les besoins du système. Chaque sous-plan exécute une séquence de tâches unitaires. La tâche unitaire est un algorithme de traitement, d'analyse des flux de données ou une procédure de rendu ou de saisie des informations. En traitement du signal, ne serait-ce que pour calculer un estimateur de la Densité Spectrale de Puissance, plusieurs algorithmes sont possibles. Ces algorithmes sont caractérisés par leur contexte d'application, leur complexité, et par leur apport ou modification sur la connaissance de l'environnement. La hiérarchie de spécialisation d'activation des algorithmes définit la taxonomie d'activation de la tâche [CH93].

La constitution d'une bibliothèque de tâches unitaires consiste à identifier dans les raisonnements complexes, la factorisation des méthodes ou procédures de résolution. Leurs enchaînement dépend du contexte d'activation c'est à dire des événements intervenant sur la zone. Il est donc nécessaire de pouvoir modéliser cette connaissance et qu'elle soit partagée par les différentes sources de connaissance du système, que sont les méthodes et procédures attachées à une tâche.

3. MODELISATION DE LA CONNAISSANCE EXPERTE

La modélisation informatique des connaissances de l'expertise, se réalise à partir de l'acquisition des connaissances puis à partir de la construction d'un récepteur, aussi nommé : système multi-expert. L'acquisition des connaissances se décompose en deux phases. La première est la modélisation créatrice des connaissances des différents experts; ce que l'on appelle: les modèles de résolution, les stratégies de traitement et le contrôle. L'organisation des tâches résulte de cette étude. Les plans et sous-plans ne peuvent pas être considérés comme indépendants de la connaissance. L'analyse et l'interprétation d'un signal peuvent dépendre de l'objectif assigné au système de surveillance. Par exemple, la nature des caractéristiques extraites d'un signal différent suivant que l'on cherche à résoudre le problème d'apprentissage des bruits ou de la détection d'une composante dipolaire dans le signal. Il est donc nécessaire d'avoir une approche cognitive globale pour rendre le raisonnement pertinent. La seconde phase concerne le recueil des connaissances établi à partir du modèle élaboré. Les points développés lors des débats avec les experts sont décidés après observation des dépendances entre les concepts mis en oeuvre, des imprécisions ou des contradictions. Un concept définit la structure commune à plusieurs objets; un objet est la modélisation d'une entité sous la forme d'une liste de couples: attribut, valeur. L'investigation cognitive dont nous venons de faire référence, est effectuée auprès des experts du laboratoire (traitement du signal, physique, géophysique, électromagnétisme,

océanographie, détection sous-marine ...). De cette étude émergent trois aspects de la connaissance:

- Le premier concerne la connaissance du milieu dans lequel évolue le réseau de bouées. Ceci inclut les informations sur certains phénomènes ne comportant aucune ambiguïté, ainsi que sur la configuration du réseau de capteurs (effets endogènes, géométrie, situation géographique) et l'a priori sur la cible considéré comme hypothétique. Cette connaissance est mise à jour par fusion en temps et en espace des différentes données disponibles sur le réseau et de tout autre renseignement.
- Le second concerne l'analyse des signaux dans les domaines temporel, spectral et interspectral. Cette analyse s'appuie sur des algorithmes standards éprouvés mettant en évidence des propriétés sur chaque signal reçu et des propriétés intercapteurs. L'extraction de caractéristiques à partir de l'analyse des signaux et leur interprétation est un point essentiel à la bonne sélection des traitements aval (fig 3.1) et à la détermination de critères représentant le niveau de difficulté a priori de détection. Pour simplifier dans une première approche, nous avons choisi de ne pas faire intervenir le temps dans le choix des traitements.

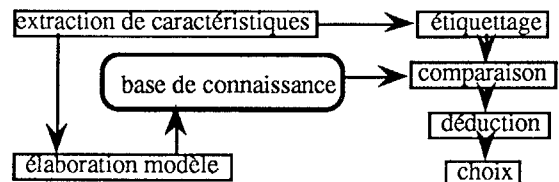


figure 3.1: synoptique de raisonnement pour la planification.

- Le troisième concerne la connaissance des algorithmes de traitement spécifiques aux signaux magnétiques. Nous disposons d'une bibliothèque décrivant le nom des algorithmes, leurs paramètres entrée-sortie, leur domaine d'application, leur condition d'emploi: *SI* (croyance) *ALORS* (action), leur complexité et leur influence sur l'expertise. En effet l'activation d'un algorithme ou d'une simple procédure, appelés source de connaissance, est conditionnelle aux premier et second aspects de la connaissance et son déclenchement provoque l'ajout ou la modification de données de la base de connaissance.

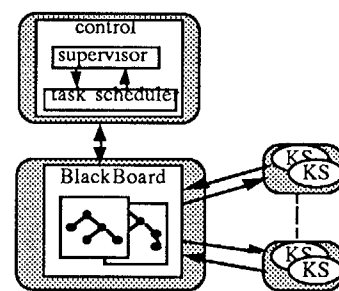


figure 3.2: l'architecture "BlackBoard" de TRAM.

L'architecture "BlackBoard" (fig 3.2) semble être tout à fait adaptée à notre problème de modélisation de la connaissance experte [PA82]. En effet, les sources de connaissance (KS) symbolisent les méthodes que l'on a répertoriées. Celles-ci sont regroupées autour d'objectifs communs et composent les tâches. Ces dernières sont séquencées par le contrôleur. Celui-ci fonctionne sur deux niveaux: le premier, le "superviseur", sélectionne un groupe de tâches dont la collaboration conduit à la résolution d'un sous-problème; le second, le sélectionneur de tâche, choisit les séquences de tâches à l'aide d'opérateurs logiques et de façon opportuniste, rend activable la méthode la mieux adaptée à la tâche en cours. Le "superviseur" gère les plans d'action et le séquenceur, les sous-plan d'action et les méthodes. Les KS communiquent au

travers de la base de connaissance orientée objet appelée "BlackBoard".

Le "BlackBoard" représente la base de connaissance. C'est une zone d'enregistrement dans laquelle les concepts ont une structure orientée objet, comportant d'une part la structure principale qui regroupe les composantes d'un vecteur particulier et d'autre part, des attributs propres au déclenchement des sources de connaissance ainsi qu'à l'explication du raisonnement. Les relations entre les concepts définissent les dépendances entre les objets de la base. Par exemple, un réseau comporte des renseignements monocapteur et le graphe non orienté acyclique (fig 3.3) est le modèle hiérarchique de la base de connaissance. Au plus haut de la hiérarchie il y a tout l'environnement; puis les renseignements sur les phénomènes marins, la géologie locale, les phénomènes géomagnétiques, sur la cible et la configuration du réseau; au plus bas, sont enregistrés les résultats fournis par les analyses monocapteur et intercapteurs. On peut ainsi vérifier la compatibilité des valeurs de certaines composantes entre deux niveaux différents de la hiérarchie.

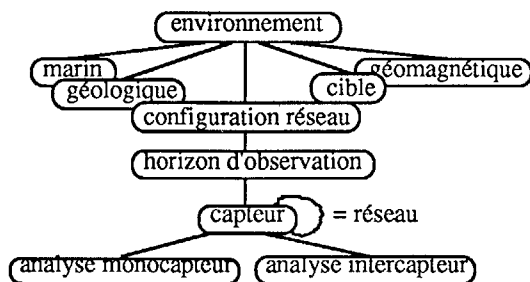


figure 3.3: modélisation hiérarchique de la base de connaissance du système de surveillance.

4. SURVEILLANCE

Nous allons décrire une exécution du système de surveillance pour une configuration du réseau et un problème donnés.

Dans l'hypothèse binaire, on doit décider à partir du réseau de magnétomètres de la validité des hypothèses suivantes:

$$H_0: r = b_{\text{géomag}} + b_{\text{géol}} + b_{\text{rés}}$$

$$H_1: r = b_{\text{géomag}} + b_{\text{géol}} + b_{\text{rés}} + \text{sigu}$$

Dans les hypothèses H_0 et H_1 , plusieurs bruits interviennent dans la mesure, tels le bruit géomagnétique, le bruit géologique et le bruit résiduel. Ceux-ci ont leurs propres caractéristiques [FL92]. Dans l'hypothèse H_1 , on suppose la présence d'un signal utile *sigu* dont les paramètres sont inconnus ou hypothétiques (type de la cible, position géographique, direction...). Certains renseignements a priori sur la cible peuvent éventuellement être fournis.

Afin de développer les stratégies de résolution du problème de détection, on identifie cinq phases par lesquels le système peut transiter (fig 2.1). Nous décrivons celles-ci plan après plan dans les paragraphes ci-après. On se place dans l'hypothèse suivante: le réseau comporte cinq capteurs RMN placés en barrage sur une étendue de mer. A l'initialisation, on suppose l'absence de cible dans cette zone pour une période de trois heures. De plus, on dispose de deux capteurs en mer référence bruit-seul. Cette dernière hypothèse devra être vérifiée. Les effets endogènes sont négligeables et le réseau est fixe.

La première phase consiste à travers une interface ergonomique, à saisir tous les renseignements fournis par l'opérateur, tels: l'environnement géologique, géographique, magnétique, marin et la configuration du réseau avec éventuellement l'a priori sur la cible. Ce plan n'est effectué qu'à l'initialisation du système. Une fois terminé, on transite vers la

phase de mise à jour de l'horizon d'observation et d'acquisition des mesures magnétiques. Un nombre variable d'échantillons est lu dans une fenêtre glissante de largeur déterminée notamment par les intervalles de variation de certains paramètres de la cible et par l'objectif de résolution assigné au système; Le déplacement de la fenêtre d'observation des signaux est choisi important dans le cas d'une demande de caractérisation fine des bruits, dans l'hypothèse H_0 . En l'absence d'information, le déplacement est choisi de façon à permettre au système de rendre un avis sur la détection même dans le cas de variations rapides de l'environnement magnétique. Les échantillons sont ensuite filtrés par un passe-bande de butterworth [BL79].

L'objectif suivant est l'apprentissage des bruits (fig 2.1 plan -3-). Le système copie le comportement humain pour l'analyse des signaux. Les variations les plus lentes sont éliminées. La méthode la plus appropriée au contexte, pour estimer la Densité Spectrale et Interspectrale de Puissance [MA87] du bruit, est choisie par le contrôleur dans la hiérarchie de spécialisation des algorithmes, pour la tâche considérée. A partir des résultats de traitements précédents sont extraits les critères de choix pour la planification. Nous présentons à titre d'exemple, certains critères qui ont pour but de décider a priori, de la difficulté de détection sur la zone observée:

- (r1) Quel est le qualificatif associé à la concordance entre l'activité magnétique sur la zone [JA89] et les prévisions météorologiques magnétiques?
- (r2) L'activité géomagnétique est-elle très forte, moyennement forte ou assez faible?
- (r3) Compte-tenu de l'a priori sur la cible et de la mesure de densité spectrale de puissance du bruit, est-ce que le Rapport Signal à Bruit est favorable à une bonne détection ?
- (r4) A partir de quelle distance d'un capteur à la cible, est-il difficile d'effectuer une bonne détection?

L'emploi de tels critères nécessite pour un système de déduction, de prendre en compte l'incertitude sur les événements ainsi que l'imprécision des informations. Le but de l'agrégation de tous les faits perçus par le système est de qualifier correctement les critères pour faire le meilleur choix de traitement. La représentation des faits est uniforme et fait référence à la théorie des ensembles flous [ZA65]. Le mécanisme d'induction est une particularité de l'inférence sur des événements imprécis. Nous ne développerons pas ce point dans la suite de cet article et pour plus d'informations relatives à la théorie, on se reportera à la thèse de Nafarieh Asghar [NA88].

La discordance (r1) nous renseigne sur la présence de bruits perturbateurs autres que le bruit géomagnétique. Le raisonnement par réfutation permet d'éliminer certaines hypothèses de phénomènes perturbateurs.

La conjonction des résultats de déduction (r1 & r2 & r3 & r4) nous renseigne sur la difficulté a priori de détection et ainsi, de la nature des traitements aval à appliquer aux signaux.

L'analyse du critère normalisé de cohérence [GA92] spatiale en fréquence γ_{xy} (3.1), nous renseigne sur la validité de calcul des fonctions de transfert intercapteurs ou d'une présence anormale sur l'une des deux voies [MA87] :

$$\gamma_{xy} = \int_{\nu} \frac{S_{xy}(\nu)}{\sqrt{S_{xx}(\nu) \cdot S_{yy}(\nu)}} d\nu \quad \gamma_{xy} \in [0,1] \quad (3.1)$$

S_{xy} désigne la densité interspectrale de puissance entre deux signaux x et y ; S_{xx} désigne la densité spectrale de puissance du signal x .

Dans le cas où la cohérence spatiale en fréquence ne s'avère pas satisfaisante, alors le plan courant est interrompu pour effectuer le plan de détection. Les fonctions de transfert calculées à partir des



vecteurs propres de la densité interspectrale de puissance S_{xy} ne sont plus valides. On ne retiendra alors que les fonctions de transfert formées à partir des signaux enregistrés précédemment.

Un point important du contrôle de l'apprentissage est la vérification des hypothèses fournies par l'opérateur au cours du plan -1-. En effet, la sélection des références bruit-seul effectuée par l'opérateur (plan-1-) peut être remise en cause: si la conjonction des cohérences spatiales en fréquence entre le capteur supposé référence bruit-seul et ses voisins, n'implique pas un bon facteur de cohérence mutuelle, alors le système peut avertir l'opérateur et infirmer l'hypothèse.

Dans le cas où l'apprentissage du bruit est encore nécessaire, le système reboucle vers l'acquisition de nouvelles données (plan -2-). Dans le cas contraire, le plan -4- tente de résoudre le problème de la détection.

La détection d'un signal utile s'effectue sur les tranches des signaux nouvellement acquises. A partir des instances de la base de connaissance, le système doit choisir la meilleure méthode à appliquer aux signaux pour séparer le bruit du signal utile (fig 4.1).

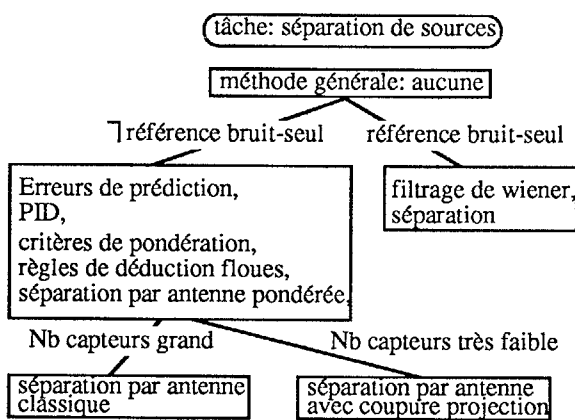


figure 4.1: hiérarchie de spécialisation pour la tâche de séparation de sources.

Il n'existe pas de méthode résolvant le problème de la séparation de source dans le cas le plus général. Il convient alors de choisir de façon automatique, l'algorithme le mieux adapté à la situation. La séparation par antenne pondérée [FL91] s'effectue dans un contexte assez général d'activation, où on ne dispose pas de capteur référence bruit-seul, mais suffisamment de critères statistiques sur le bruit. Cette méthode demande un temps de traitement assez long et c'est pour cette raison que le système donne une préférence aux méthodes plus spécifiques. Le filtrage de Wiener permet une bonne séparation dans le cas où l'on dispose d'une référence bruit-seul et correspond à un cas particulier de la configuration du réseau. L'activation de la méthode de séparation par traitement d'antenne classique est spécifique à un nombre de capteurs important, ce qui permet un bon moyennage des signaux. Cette méthode est rapide, mais sera effectuée moins fréquemment, car le nombre de capteurs est limité par le coût financier de l'application. La séparation de source avec coupure de projection est un cas particulier de la séparation par traitement d'antenne classique mais il est optimisé par la coupure franche des voies perturbées par la présence d'une anomalie. Le bruit ainsi estimé par moyennage des voies bruit-seul est soustrait aux signaux mesurés. Cette méthode est utilisée pour un nombre de capteurs réduit, par opposition à la méthode précédente, et dans le cas où le système dispose dans sa base de connaissance d'informations a priori (par exemple : le cap de la cible, la position relative des capteurs par rapport au point d'approche de la cible).

Le signal utile ainsi estimé peut-être analysé pour confirmer ou infirmer la présence d'une anomalie magnétique sous le réseau et pour juger de la qualité de la méthode de séparation. On peut

envisager dans un contexte général, de lancer un sous-ensemble de méthodes en parallèle et de comparer les résultats.

La localisation de la cible n'est pas abordée dans cet article et fait l'objet d'un plan supplémentaire qui n'a pas encore été intégré.

Après avis sur la détection, le système fournit à l'opérateur des caractéristiques retenues sur les données grâce à une interface de visualisation. Puis, il questionne l'opérateur à propos des paramètres de configuration de la zone. La compatibilité de ces affirmations est vérifiée et peut conduire à une demande de confirmation. Le système de surveillance reboucle sur le plan -2- et recommence ainsi un nouveau cycle de détection.

Nous venons de décrire un cycle automate pour traiter le problème informatique d'organisation des tâches répertoriées pour le problème en traitement du signal de la détection magnétique sous-marine.

5. CONCLUSION

Notre étude du "savoir-faire" des experts dans le domaine de la détection pour la surveillance océanique par réseau magnétique, nous a conduit à définir un modèle de résolution des problèmes sous-jacents ainsi qu'un modèle de représentation de leur connaissance. L'apport de cette approche réside dans la possibilité de prise en compte de toutes les informations pour augmenter les performances et la fiabilité du système de surveillance, dans la mise en forme de toute la connaissance algorithmique et opératoire et dans la conception d'un système réactif et modulaire. Les travaux s'orientent vers la prise en compte du temps pour l'ordonnement des tâches et la prise en compte à la fois de l'imprécis et de l'incertain pour l'aide à l'opérateur. L'implémentation de notre système sous T.R.A.M. nous fait bénéficier d'une application évolutive.

BIBLIOGRAPHIE

- [BL79] Blanpain R., "Traitement en temps réel du signal issu d'une sonde magnétométrique pour la détection d'anomalies magnétiques", thèse Docteur-ingénieur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Ch II p 38-65, Ch VIII p 331-342. 1979.
- [CH93] Chaillot M., Crochon E., "Classification rationnelle d'instances pour la sélection dynamique de méthodes", La grande Motte - Juin 93, p 225-231.
- [FL92] Flament B., "Système de réduction de bruit pour Réseau de Magnétomètres Haute Sensibilité", thèse Docteur de L'Institut National Polytechnique de Grenoble. 1992.
- [FL91] Flament B., Blanpain R., "Traitement d'Antenne et Réseau Magnétique", GRETSI 91, 13è colloque Juan les Pins, proc 1 p109-113, thème: Application au traitement du signal
- [GA92] Gardner W. A., "A unifying view of coherence in signal processing", Signal Processing 29 (1992) p 113 à 140.
- [JA89] Jacobs J. A., "Geomagnetism", Academic Press, vol 3 p 328-333.1989.
- [KO84] Koenig A., "Une architecture BlackBoard dédiée à la robotique autonome mobile", thèse Docteur de l'institut National Polytechnique de Grenoble. 1984.
- [MA87a] Max J., "Traitement du signal et Application aux Mesures Physiques", vol 2 p 131-135, vol 1 p 231-236. 1987.
- [NA88] Nafarieh A., "A new approach to inference in approximate reasoning and its application to computer vision", Ph.D University of Missouri - Colombia. 1988.
- [PA82] Nii H.P., Feigenbaum E. A., Anton J., Rockmore J. A., "Signal-to-symbol transformation: HASP/SIAP case study", The AI Magazine Spring 1982.
- [ZA65] Zadeh L. A., "Fuzzy Sets", Information and Control, vol 8 p 338-353. 1965.