

Traitement du signal
et systèmes bruités (*)

Signal processing and noisy systems

Pierre-Yves ARQUÈS

GERDSM, Le Brusac, 83140 SIX-FOURS-LES-PLAGES

Pierre-Yves ARQUÈS, Professeur à l'Université de Rennes, est actuellement Directeur Scientifique du Groupe d'Études et de Recherches de Détection Sous-Marine à la Direction des Constructions Navales.

RÉSUMÉ

On tente de situer la place des systèmes bruités dans le traitement du signal, d'évoquer quelques concepts de base, et de dégager quelques voies importantes d'évolution dans les domaines de modélisation des signaux, modélisation des décisions, systèmes de décision complexe, acquisition d'information *a priori*, algorithmes décisionnels.

MOTS CLÉS

Traitement du signal, systèmes bruités, modélisation stochastique, décision complexe, information *a priori*, algorithmes décisionnels, algorithmes adaptatifs.

SUMMARY

We try to place noisy systems in signal processing, to evoke some basic ideas and to emphasize some main evolution ways in signal modelization, decision modelization, complex decision systems, a priori information acquisition, decision algorithms.

KEY WORDS

Signal processing, noisy systems, stochastic modelization, complex decision, a priori information, decision algorithms, adaptive algorithms.

(*) Ce texte constitue le support d'une conférence présentée aux Journées d'électronique 1984 du Club des Enseignants d'E.E.A.

TABLE DES MATIÈRES

- 1. Le traitement du signal en tant que discipline**
- 2. Modélisation des signaux**
- 3. Modélisation des décisions**
- 4. Systèmes de décision complexe**
- 5. Acquisition d'information *a priori***
- 6. Algorithmes décisionnels**
- 7. Conclusion**
- Bibliographie**

1. Le traitement du signal en tant que discipline [1, 2]

● Le traitement du signal, au sens général du terme, est une discipline, actuellement en pleine expansion, dont l'objet essentiel est l'étude, la conception et la réalisation des systèmes d'exploitation des signaux. Le domaine correspondant est vaste : on y rencontre des problèmes très variés dans des domaines d'application très différents. Les frontières sont souvent floues avec les disciplines voisines, qu'elles apparaissent comme « amont » (traitant des concepts utilisés au niveau de l'étude), « aval » (traitant des supports utilisés au niveau de la réalisation) ou « concurrentes » (traitant un objet de même nature dans un contexte différent).

Parmi les disciplines voisines amont, on trouve essentiellement des théories mathématiques et tout particulièrement les outils probabilistes et statistiques (dont bien évidemment la théorie de la décision) ainsi que l'analyse numérique et l'optimisation. Les supports physiques des réalisations ressortissent en général à l'électronique ou à l'informatique, plus rarement à l'optique ou à l'acoustique.

Les disciplines voisines « concurrentes » sont nombreuses : la robotique, l'automatique centrée sur les problèmes d'identification et de commande, le traitement des données s'adressant plutôt à des ensembles n'ayant pas le caractère de « signaux », la reconnaissance des formes, l'intelligence artificielle, la recherche opérationnelle, . . .

Les domaines d'application de la discipline générale traitement du signal se sont multipliés : télécommunications, image, parole, signaux audio, signaux géophysiques, signaux biomédicaux, radar, sonar, guidage et navigation, réacteurs nucléaires, télédétection, cartographie, prospection pétrolière, . . .

● D'une manière générale, un signal est (ou représente) un phénomène physique dépendant du temps et — ou — d'autres variables, transportant de l'information utile à l'observateur. Les aspects susceptibles d'apparaître dans une étude de traitement du signal peuvent être très divers. Ainsi le but du système peut être de fabriquer un véhicule d'information, de récupérer une information, de diminuer l'effet des parasites sur l'information, . . . On peut le constater dans le cas d'un « système de communication » (par exemple une transmission numérique par voie hertzienne ou un sonar passif en acoustique sous-marine) en considérant (cf. fig. 1) entre autres :

— ses diverses composantes : mise en forme du message initial et émission, transport, réception et mise en forme du message délivré;

— ses contraintes éventuelles : de nature physique (caractéristiques du canal de transmission, . . .), de conception (structure imposée ou limitée, . . .), technologique (performances des composants existants, . . .), d'utilisation (temps réel, taux d'erreur admissible, protection du secret, . . .), de moyens disponibles (performances des composants autorisés, . . .);

— les natures possibles des signaux rencontrés dans la chaîne (numériques, analogiques, . . .);

— le contexte informatif de la communication : c'est-à-dire les connaissances en émission ou en réception des propriétés du message et des perturbations (existence du message, émission active ou passive, propriétés statistiques du message ou des perturbations, horloge éventuelle d'émission en réception, . . .).

● Parmi les tâches importantes rencontrées en traitement du signal, on peut citer (quoique les distinctions soient floues et qu'il y ait recouvrement) :

— l'étude des signaux, engendrés par les phénomènes ou dispositifs physiques, et leur modélisation;

— l'étude et la conception des systèmes de traitement du signal;

— le développement et la réalisation des systèmes de traitement du signal et en particulier d'outils de base (circuits intégrés, machines informatiques à caractéristiques données).

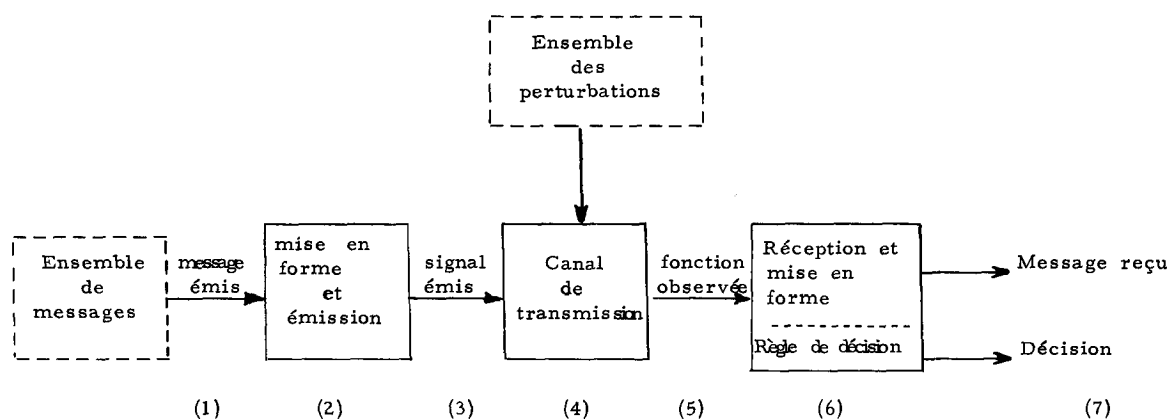
Dans les problèmes de conception on peut distinguer :

— la mise au point des moyens (concepts et outils) de base de traitement du signal, correspondant à des traitements plus ou moins standards applicables à des situations classiques : le filtrage linéaire et homogène, les méthodes de synthèse des filtres analogiques ou des filtres numériques, le filtrage de Wiener, le filtrage de Kalman, les transformations rapides, les méthodes d'analyse spectrale ou interspectrale, la notion de machine micro-informatique de traitement, l'échantillonnage, la numérisation, . . .

— l'étude des systèmes de communication purement déterministes (communication d'information par signaux déterministes, non perturbés).

— l'étude des systèmes de communication à modélisation stochastique. Une telle étude peut en particulier concerner l'extraction de l'information transportée par un signal lorsque ce dernier est aléatoire ou — et

SYNTHÈSES



Exemple d'une transmission numérique :

Exemple d'un sonar passif :

- | | |
|---|--|
| <p>(1) Message binaire.</p> <p>(2) Codage binaire à binaire
+ codage binaire à quantifié
+ modulation.</p> <p>(3) Signal analogique, suite de signaux certains à paramètres inconnus.</p> <p>(4) Canal électromagnétique atmosphérique.</p> <p>(5) Signal analogique aléatoire (signal (3) + bruit).</p> <p>(6) Démodulation (par classification)
+ décodage quantifié à binaire
+ décodage binaire à binaire.</p> <p>(7) Message binaire</p> | <p>Signal analogique "d'excitation".</p> <p>Filtre constitué par l'objet émetteur d'ondes acoustiques déduites du signal "d'excitation".</p> <p>Signal analogique aléatoire.</p> <p>Canal acoustique sous-marin.</p> <p>Signal analogique aléatoire (signal (3) + bruit).</p> <p>Détection continue d'un signal aléatoire, estimation de paramètres associés, classification.</p> <p>Absence - présence à chaque instant ; valeurs estimées conditionnelles ; classe conditionnelle.</p> |
|---|--|

Fig. 1. — Système de communication.

— n'est observable qu'après perturbation aléatoire; c'est ce cas particulier d'extraction qui sera essentiellement considéré dans la suite, les systèmes correspondants étant qualifiés de systèmes bruités; on peut notamment répertorier dans cette catégorie des opérations de base : la détection, l'estimation, la classification, la déconvolution, le codage-décodage, ...

● Le but et les conditions d'emploi d'un système de communication étant définis, son étude peut se situer à l'un des niveaux — d'ambitions et difficultés crois-

santes — suivants :

- évaluation des performances d'un système donné;
- comparaison de systèmes donnés;
- élaboration et développement d'un système :
 - ou hors du cadre d'une optimalité globale (avec éventuellement des optimisations partielles),
 - ou par détermination du système optimal à critère et contraintes donnés (développement éventuellement sous forme légèrement sous-optimale).

TRAITEMENT DU SIGNAL ET SYSTÈMES BRUITÉS

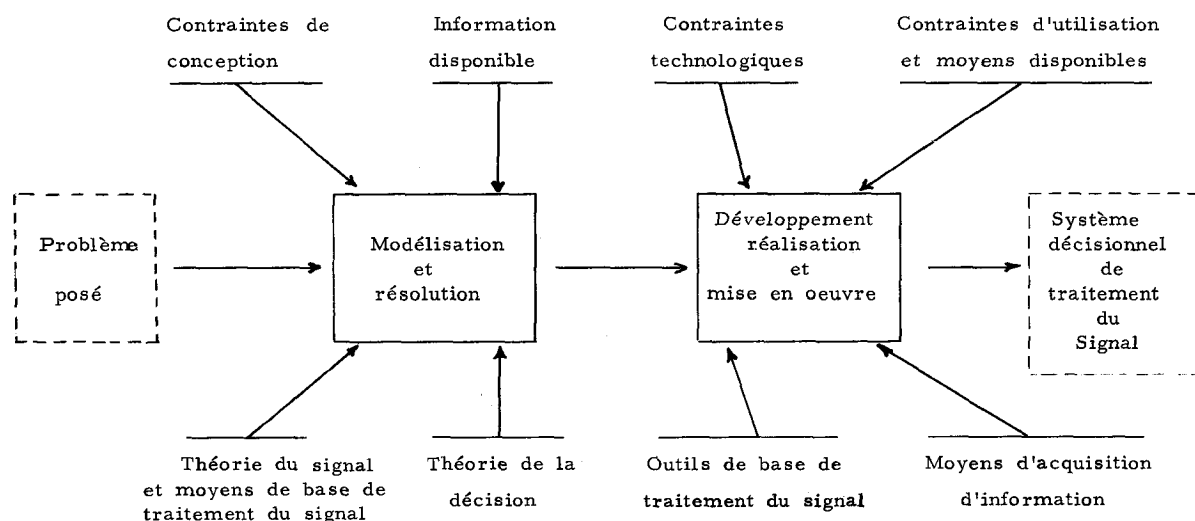


Fig. 2. — Décomposition de l'étude d'un système de Traitement du signal.

On peut, très schématiquement, décomposer l'étude d'un système bruité selon les étapes classiques de modélisation et résolution de modèle, d'une part, et de développement, réalisation et mise en œuvre, d'autre part (fig. 2). De ce point de vue on inclut dans cette discipline la « théorie du signal » dont la vocation est la modélisation des signaux et des bruits et la « théorie de la décision » traitant du choix des décisions à partir d'observations aléatoires. La première étape tient compte des contraintes de conception et de l'information disponible; elle utilise la théorie du signal et les moyens de base du traitement du signal ainsi que la théorie de la décision. La seconde étape tient compte des contraintes technologiques, d'utilisation et de moyens disponibles; elle utilise les outils de base du traitement du signal et les moyens d'acquisition d'information.

Cette décomposition est envisageable à chacun des niveaux évoqués précédemment. L'évaluation des performances d'un système complexe pose le problème du choix d'un index de performances traduisant de manière réaliste la complexité de la décision; sa mise en œuvre pour un système donné conduit à des difficultés expérimentales et donc à des compromis ou approximations (penser par exemple aux problèmes difficiles de lien entre probabilité et taux de fausse alarme ou encore de mesure de fausse alarme très faible). La comparaison de systèmes passe par l'évaluation de leurs performances, avec la difficulté supplémentaire de la relation d'ordre éventuelle entre les résultats. La conception (élaboration ou optimisation) implique la possibilité de comparaison avec d'autres (ou les autres) solutions possibles. Une optimisation globale est souvent un problème bien compliqué auquel on se résout à substituer un problème d'optimisation partielle dans le cadre d'une structure imposée (plus ou moins arbitrairement) *a priori*.

Enfin il est intéressant de remarquer, d'une part, l'unicité de la modélisation et, d'autre part, la spécificité des domaines d'application : les modalités pratiques qui conditionnent les problèmes à résoudre sont,

contrairement aux concepts de base de la modélisation, très dépendants de l'application considérée. Ainsi le radar et le sonar se distinguent-ils l'un de l'autre par les conditions de dégradation du signal, les propriétés du bruit, les cadences d'acquisition de l'information, les conditions tactiques d'emploi, ... et se confondent-ils par l'identité des décisions à prendre telles que la détection de présence, l'estimation des caractéristiques du but, l'identification ou classification du but, la nécessité d'élimination de brouilleurs, ...

- La conception des systèmes bruités a considérablement évolué depuis ses origines — il en est de même du traitement du signal en général — sous l'influence d'un important effort de recherche à la fois théorique et appliqué. D'une manière générale cette évolution s'effectue selon deux lignes de force interactives. La première est une modélisation plus fine prenant en compte de manière plus précise la complexité du problème physique, s'intéressant à des objectifs beaucoup plus ambitieux, ne négligeant aucun élément d'information récupérable (modèles élaborés, quête expérimentale des propriétés des signaux reçus, accroissement du nombre d'entrée, adaptativité ou robustesse, temps réel, ...). La seconde est l'utilisation de l'accroissement, à coût et encombrement constants, des capacités (vitesse et complexité) de réalisation : électronique intégrée, micro informatique, optique intégrée...; elle conduit en particulier à un impact important de l'informatique dans les systèmes de traitement du signal, au développement considérable de notions spécifiques pour le traitement du signal numérique (filtrage numérique, modélisation ARMA, recherche d'algorithmes rapides, analyse spectrale de processus discrets, ...) et à la mise au point de circuits intégrés spécifiques effectuant des traitements élaborés du signal.

Les tendances de cette évolution reposent, entre autres, sur des considérations d'efficacité et de performances (conduisant à la recherche de qualité de modélisation et d'optimalité ou de proximité de l'opti-

malité) et de réponse aux contraintes et exigences; plus précisément elles correspondent à des obligations de limite de portée (conduisant à des modèles correspondant à des perturbations fortes), de prise en compte d'entrée et sortie multiples (conduisant à l'utilisation de signaux vectoriels), de description de phénomènes dépendant de plusieurs variables (conduisant à l'utilisation de signaux multivariés), de fonction de sortie élaborée (conduisant à des modèles de décision complexe), de fonctionnement en information pauvre et — ou — en ambiance variable (conduisant à la recherche de robustesse ou — et — d'adaptativité), de décisions continues, en temps réel ou urgentes (conduisant à l'utilisation de signaux à supports bornés, de démarches récursives, de démarches séquentielles), de fonctionnement en ambiance de perturbations volontaires (conduisant à des situations de type duel), ...

On peut le constater dans tous les grands domaines d'application et par exemple en acoustique sous-marine, où les conditions très dures du milieu — et donc la difficulté des problèmes posés — ont pour conséquence de conduire à un effort très important d'étude des sources de bruit et de la propagation, d'inciter à prêter une grande attention à la qualité des antennes, et d'orienter la recherche, en ce qui concerne les traitements des signaux sonar, vers l'utilisation d'algorithmes plus élaborés, plus ambitieux, intégrant une meilleure connaissance de l'environnement et de plus en plus fréquemment numériques [3].

Devant le foisonnement actuel, on se borne dans la suite à évoquer quelques concepts de base classiques et certaines voies importantes d'évolution et d'étude dans les domaines de :

- modélisation des signaux;
- modélisation des décisions;
- systèmes de décision complexe;
- acquisition d'information *a priori*;
- algorithmes décisionnels.

2. Modélisation des signaux

L'information est constituée par un ensemble de connaissances, phénomènes, faits, idées, ... , auxquels l'observateur porte intérêt. Elle est soumise à des problèmes de représentation, de transmission, de traitement. Elle intervient dans les systèmes bruités à deux niveaux différents : dans la raison d'être du système, en tant qu'âme de l'être physique manipulé par ce système, et dans la conception du système, en tant que connaissances nécessaires au développement du modèle. Lorsqu'elle se présente sous la forme d'un ensemble discret ou continu de valeurs numériques, les signaux constituent l'un de ses supports utilisables; cependant d'autres représentations peuvent être utilisées.

En se limitant à un signal fonction ou suite (dans le cas général vectorielle complexe) temporelle, l'informa-

tion est représentée au cours du temps par les valeurs de l'un des paramètres du signal. En général c'est l'amplitude instantanée ou de la fonction ou des impulsions de la suite. Mais ce peut être par exemple la fréquence instantanée ou la phase instantanée soit d'une porteuse permanente soit d'une suite d'impulsions identiques; ou encore la largeur des impulsions d'une suite d'impulsions de hauteur et fréquence constantes.

D'une manière générale un système bruité reçoit l'information utile sous forme d'un signal « fonction observée » constitué par un signal (utile) perturbé par un bruit parasite. Alors qu'en théorie du signal, le terme signal a un sens très général (c'est la grandeur, généralement temporelle, à laquelle s'intéresse l'observateur), en théorie des systèmes bruités ce terme est pris dans un sens restreint (c'est la grandeur transportant l'information utile) par opposition à celui de bruit (lequel est nuisible à l'information utile et représente les perturbations).

Les signaux (au sens général) intervenant tout au long d'un système (au sens général) peuvent être de natures bien différentes, déterminées par les catégories, les types et les modes de représentation [1].

La catégorie de représentation est caractérisée par le support et l'ensemble de valeurs du signal. On distingue en particulier (cf. tableau I), selon que le support et l'ensemble des valeurs sont discrets ou continus, les quatre caractères numérique et échantillonné (signaux discrets), quantifié et analogique (signaux permanents). On peut noter que, sur le plan réalisation, la tendance actuelle est d'utiliser essentiellement des signaux analogiques et numériques; mais les signaux numériques sont, en fait, au prix de l'adjonction d'un bruit supplémentaire de quantification, souvent modélisés sous forme de signaux échantillonnés.

Par ailleurs, la course aux performances conduit, lorsque c'est possible, à l'utilisation de structures multi-entrées. De plus, si les quantités physiques traitées sont habituellement réelles, elles peuvent engendrer, au niveau de la modélisation, des signaux complexes tels que le modèle analytique (encore appelé signal ou représentation analytique) attaché à un signal réel. Enfin, la tendance vers une modélisation plus élaborée conduit à l'utilisation de signaux dépendant de plusieurs variables comme on peut le constater dans les modèles d'image, de suite d'images, d'atmosphère, de milieux inhomogènes de transmission, ... Ainsi une suite d'images peut être représentée par une grandeur dépendant du temps (de manière discrète) et de deux variables spatiales (de manière continue ou discrète)

TABLEAU I (d'après [1]) : caractère d'un signal.

	Ensemble de valeurs		
	Discret	Continu	
Support			
Discret	Numérique	Échantillonné	← Signal discret
Continu	Quantifié	Analogique	← Signal permanent

ou encore par une grandeur dépendant uniquement du temps (de manière continue ou discrète) après balayage; de même un signal vectoriel temporel peut être mis sous forme d'un signal scalaire dépendant du temps et de variables discrètes à supports bornés. Les catégories de représentation intègrent donc les aspects réel-complexe, scalaire-vectoriel, mono-multivariable.

Le type de représentation joue sur le caractère déterministe ou aléatoire adopté pour la modélisation du signal (ou des paramètres liés au signal) et traduit en fait la manière dont sont modélisés le hasard ou l'incertitude au niveau de l'observateur. On peut noter, par exemple, que dans un couple système de détection, système de contre-mesure, un même signal peut être, pour l'un, déterministe et, pour l'autre, aléatoire.

Le mode de représentation peut être externe (par description explicite), interne (par description implicite), directe (par rapport à ses variables « naturelles »), indirecte (par rapport à une base de signaux).

A la grande diversité présentée par la nature des signaux correspond une diversité analogue sur la nature des systèmes. Il en résulte l'importance de la recherche de modélisations plus synthétiques permettant de s'affranchir de la nature du signal et par exemple de dégager les liens entre les structures fondamentales des systèmes et des signaux. On peut ainsi constater que la formulation des problèmes de traitement du signal en termes d'opérateurs dans un espace de Hilbert fournit un cadre unitaire en partie indépendant de la nature des signaux et très riche de conséquences. Dans ce cadre, la structure d'un système spatio-temporel optimal s'exprime en termes d'opérateurs représentant les différents facteurs intervenant; on peut y utiliser l'isomorphisme entre l^2 et L^2 (espaces des suites et des fonctions de carré absolument sommable) pour le transfert des problèmes entre signaux discrets et signaux permanents et la notion d'orthogonalité pour les problèmes d'approximation linéaire; les modèles AR, MA, ARMA s'y expriment en termes d'opérateurs linéaires et peuvent y être généralisés par utilisation d'opérateurs plus généraux [4 à 6].

Deux grands problèmes se posent en modélisation des signaux, l'un pour ceux de type déterministe, l'autre pour ceux de type aléatoire.

Dans le cas des signaux déterministes, dont l'observateur a, au moins dans une certaine mesure, la maîtrise au stade de l'émission, se pose le problème de la synthèse pour la possession de certaines propriétés dans un contexte donné. Ainsi, en sonar ou radar, on cherche à utiliser des signaux actifs, possédant, en présence de bruit, une bonne discrimination par rapport aux paramètres dont il faut assurer l'estimation (en complément de la détection éventuelle): une méthode passe par l'utilisation d'une fonction d'ambiguïté. Ou bien, en transmission numérique hertzienne, on cherche des signaux permettant l'utilisation d'un

grand nombre d'états dans un canal de fréquence donné, avec un taux d'erreur acceptable [7].

Dans le cas des signaux aléatoires se pose le problème du choix pour la meilleure représentation de la réalité physique. Quelques classes sont fréquemment utilisées dont celles correspondant à [1, 8 à 11]:

- une représentation externe stationnaire gaussienne: c'est une description classique, permettant souvent de mener à terme les calculs et optimisations mais qui, sauf pour quelques phénomènes comme le bruit électronique thermique, ne représente qu'approximativement la réalité physique. De grandes voies d'amélioration en découlent par l'abandon des caractères stationnaire et gaussien, et – ou – passage à une représentation interne;

- une représentation externe au second ordre (c'est-à-dire par les moments des deux premiers ordres): bien que les développements des traitements correspondent à des philosophies différentes, cette description conduit souvent (au moins dans le domaine linéaire pour des critères « énergétiques ») aux mêmes résultats qu'une représentation gaussienne;

- une représentation de type « paramétrique »: cette description consiste à décrire une classe plus ou moins large de processus aléatoires au moyen d'un certain nombre de paramètres. Il en est ainsi des processus ARMA à coefficients constants qui, selon que le processus blanc générateur est gaussien ou non, stationnaire ou non-stationnaire mais représenté au second ordre, possèdent les mêmes caractéristiques et qui constituent donc des sous-classes des représentations précédentes. L'un des intérêts de la description ARMA est, en présence de signaux à supports bornés, de permettre des méthodes évitant un prolongement (explicite ou implicite) du signal par une quantité nulle ou par périodisation. Ceci se rencontre par exemple dans l'estimation de la densité spectrale d'un processus aléatoire observable par une seule réalisation sur un intervalle de durée finie.

3. Modélisation des décisions [1].

L'une des fonctions principales en traitement des signaux bruités est la prise de décision: il faut effectuer un choix, concernant une ou plusieurs propriétés d'un phénomène utile, à partir d'une réalisation d'un phénomène aléatoire lié au phénomène utile; le système correspondant est dit de décision (ou décisionnel).

Le problème de prise de décision peut être de type statique: l'observation est donnée globalement et elle est prise totalement en considération par le traitement; la décision est « unique et instantanée », postérieure à l'observation si le principe de causalité est respecté. Le problème peut être plus complexe sur le plan temporel, nécessitant une suite de décisions sur un ensemble d'instantanés donnés: deux cas particuliers sont la décision séquentielle et la décision continue. A priori, cet autre problème est un problème global, pour lequel les décisions globales sont des suites de

SYNTHÈSES

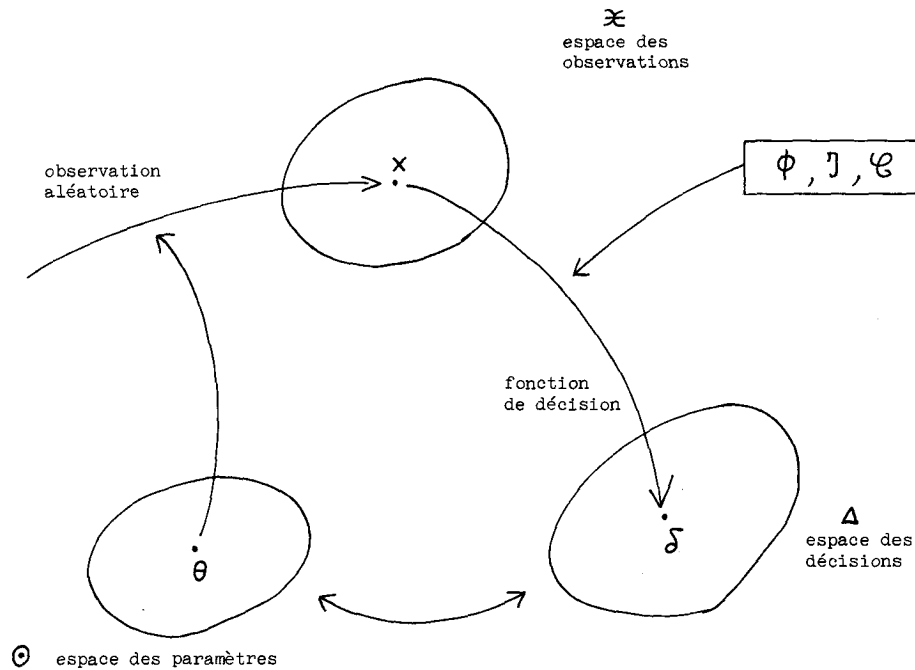


Fig. 3 (d'après [1]). — Schéma d'un modèle de décision statique.

décisions, plutôt qu'une décomposition en suite de problèmes décisionnels statiques résolus successivement.

Un modèle de décision statique est symbolisé par le quadruplet $((\Theta, X, \Delta), \Phi, J, C)$. Il est construit sur (fig. 3) :

- une structure décisionnelle traduisant la nature du problème de décision; elle est constituée par les trois espaces (Θ, X, Δ) des paramètres, des observations et des décisions;
- un ensemble Φ de fonctions de décision permises à l'observateur traduisant les contraintes imposées à la décision;
- une information J , constituée par les connaissances disponibles sur la loi de l'observation conditionnelle au paramètre et éventuellement sur la loi *a priori* du paramètre (souvent dite « information *a priori* »);
- un index de performances et — ou — un critère de décision C .

L'étude générale d'un tel modèle conduit à considérer plusieurs voies de particularisation selon les contraintes, l'information *a priori* et le critère en jeu. Elle permet en particulier de distinguer, indépendamment de la structure décisionnelle, des modèles bayesiens (construits sur des critères de risque et coût) et des modèles non bayesiens, et parmi ces derniers ceux construits sur des critères d'erreur, ou de vraisemblance, ou de distance d'observation, ou de contraste. Elle permet également l'analyse et l'utilisation des démarches à structure libre (le système est sélectionné par le critère sans limitation *a priori* de la classe), imposée (le système est sélectionné par le critère dans une classe donnée *a priori*), limitée (le système est sélectionné par le critère dans une classe limitée par

une contrainte adaptable à la situation pratique), décomposée (le système est décomposé par contrainte de transition dans un pseudo-espace d'observation). Elle montre enfin que l'élaboration d'un modèle particulier nécessite une quantité minimale d'information et elle permet d'envisager les politiques palliant une quantité insuffisante d'information *a priori* (ces politiques s'appuient sur le choix du critère, le choix de la structure *a priori*, la robustesse, l'adaptativité, ...).

L'extension de ce modèle à des problèmes de décision dynamique peut se concevoir par exemple en considérant des espaces Θ, X, Δ, Φ sous forme d'espaces de suites de paramètres, d'observations, de décisions, de fonctions de décision. Mais dans la pratique, on se restreint généralement, que ce soit par contrainte ou par résultat de la technique d'optimisation, à des problèmes décomposables en problèmes de décision statique résolus successivement dans le temps par application du modèle précédent.

Les opérations de base en traitement des signaux bruités apparaissent comme des décisions particulières se ramenant (de manière optimale ou de manière imposée) à une ou à un ensemble de décisions élémentaires (à savoir : détection, classification, estimation). Les opérations plus complexes ne possèdent pas forcément, tout au moins dans un contexte d'optimisation, la propriété précédente.

L'intérêt de la modélisation décisionnelle précédente en traitement des signaux bruités est loin d'être négligeable. Elle offre en particulier dans tous les problèmes de décision complexe (non réductibles de manière évidente à un ensemble de décisions élémentaires) une méthodologie d'analyse et de modélisation particulière. Elle permet de dégager des méthodes ou résultats invariants de la structure décisionnelle. Elle facilite la

TABLEAU II : choix d'un estimateur.

<u>Information</u>	<u>Modèle</u>	<u>Structure</u>	<u>Estimateur</u>
Complète sur X et θ	bayésien	Fonction de perte EQM → libre	EQM
		Fonction de perte MVP → libre	MVP
Second ordre sur X et θ	bayésien	Fonction de perte EQM	imposée linéaire → LEQM
			affine → AEQM
Complète sur X	non bayésien	Critère de vraisemblance → libre	MV
		Critère d'erreur → limitée (S. B.)	VM sans biais
Second ordre sur X,	non bayésien	Critère d'erreur	imposée affine → AVM sans biais
			limitée (S. B.) → AVM sans biais
		Critère de distance → libre	MC pondérés
Premier ordre sur X	non bayésien	Critère de distance → libre	MC

- EQM = erreur quadratique moyenne minimale
- MVP = maximum de vraisemblance a posteriori
- LEQM = linéaire d'EQM minimale
- AEQM = affine d'EQM minimale
- MV = maximum de vraisemblance
- VM = variance minimale
- AVM = affine de variance minimale
- MC = moindres carrés

comparaison de modèles apparemment différents et montre la grande importance de fait de quelques notions :

- définition précise du problème de décision posé;
- distinction entre optimisation à structure libre et optimisation à structure imposée, et prise en compte des contraintes du problème;
- quantité d'information *a priori* disponible;
- choix du critère d'optimisation ou de l'index de performances;
- compatibilité entre structure décisionnelle, information disponible, ensemble de fonctions de décision permises et critère.

Un exemple illustrant les réflexions précédentes est fourni par le choix d'un estimateur selon l'information *a priori* disponible [1] (cf. tableau II).

4. Systèmes de décision complexe [1]

Les missions assignées aux systèmes bruités deviennent actuellement de plus en plus élaborées, correspondant à des décisions de plus en plus complexes. Elles sont de plus soumises à des contraintes toujours renouvelées de performances accrues en portée, en qualité d'analyse de phénomènes « fins », en discrimination; ceci implique que les systèmes doivent se satisfaire de signaux faibles et accepter les perturbations fortes, et qu'ils peuvent être pourvus d'entrée et de sortie multiples. Il en résulte une tendance importante de la modélisation actuelle : elle concerne souvent des décisions complexes à partir de signaux vectoriels multivariés; elle cherche généralement des solutions optimales, ou proches de l'optimum, pour des critères

SYNTHÈSES

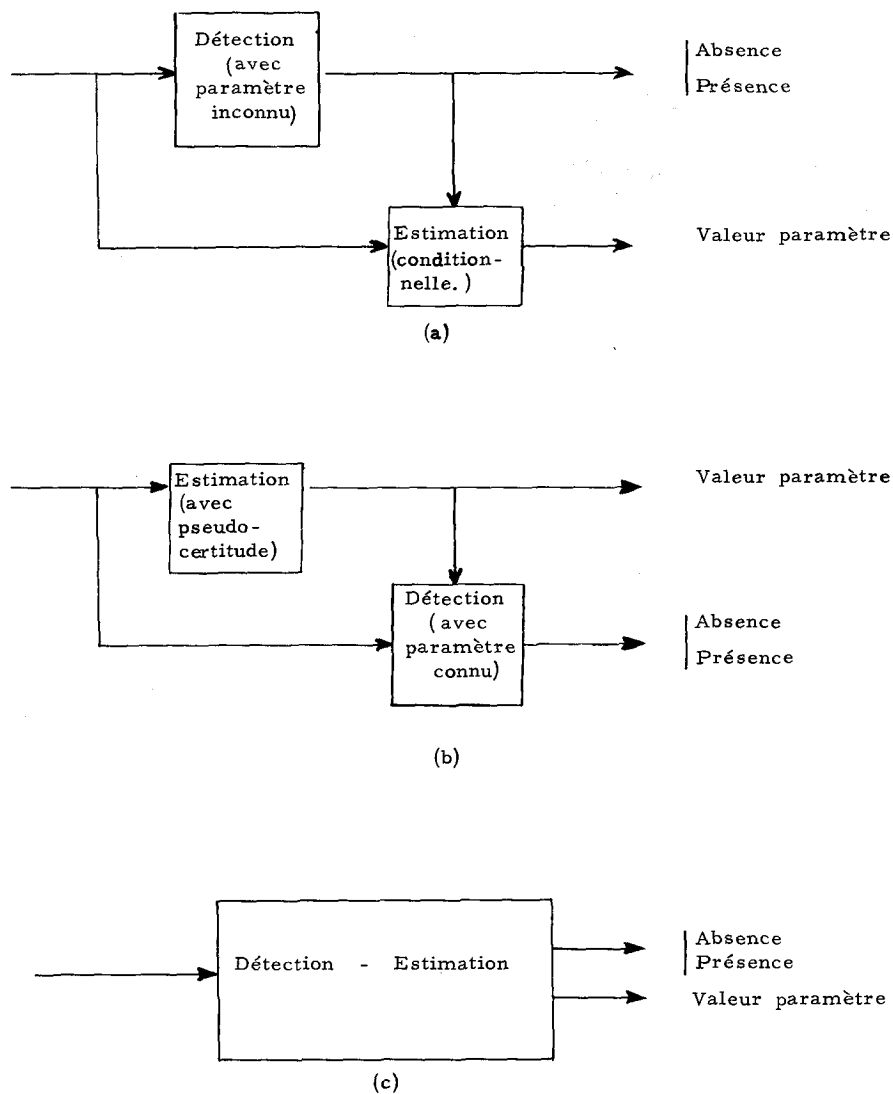


Fig. 4. — Procédures de détection-estimation.

si possible performants. La mise en œuvre nécessite une information *a priori* importante, ou, si celle-ci n'est pas accessible, l'utilisation de palliatifs.

Ainsi les systèmes radar et sonar après s'être cantonnés dans la détection de présence et l'estimation de paramètres associés (vitesse, distance, direction) pour la fonction de veille, se sont-ils vus confier des tâches de poursuite de buts acquis préalablement et de fonctionnement en présence de perturbations volontaires et de surcharge de travail, et ont-ils (ou auront-ils) vocation à des fonctions de classification et d'identification des buts acquis, de cartographie, de reconnaissance d'objets, d'utilisation par couplage inter-systèmes, ... L'évolution correspondante des antennes porte sur le nombre des capteurs qui peut devenir considérable, sur le caractère non figé des liaisons entre capteurs (antennes à balayage électronique ou à formation de voies), sur la dimension des antennes par rapport aux longueurs d'onde utilisées (antennes synthétiques), ...

La conception, souvent retenue actuellement, d'un système de décision complexe, résulte généralement d'une décomposition (plus ou moins imposée) en décisions élémentaires, ou plus généralement en traitements liés à des moyens ou opérations de base (ceux-ci sont éventuellement optimisés individuellement). Ceci facilite la réalisation modulaire du système et en particulier l'utilisation d'outils standards de traitement du signal et permet l'évolution ultérieure éventuelle du système de manière progressive (par modules sans toucher à la structure). Par contre la recherche d'optimalité à structure libre conduit à une modélisation globale du problème de décision. On évite alors le choix, éventuellement arbitraire, de la structure et l'on peut espérer un gain de traitement par l'obtention d'une modélisation mieux adaptée. Mais cette démarche est généralement bien difficile ou bien ambitieuse; les seuls problèmes d'évaluation (choix d'index de performances, validations de modèles, mesures en situation réaliste, ...) en sont déjà une raison.

Par exemple, comment, *a priori*, est-il préférable de résoudre un problème de détection-estimation (modélisant un radar, un sonar, ...)? Trois procédures sont envisageables (fig. 4a, b, c) qui ne conduisent pas forcément à des résultats identiques [1, 12] :

- effectuer successivement une détection de présence (avec paramètre inconnu), puis une estimation conditionnelle à la décision de présence;

- effectuer successivement une estimation avec pseudo-certitude sur la présence puis une détection de présence (avec paramètre connu) du signal estimé;

- effectuer simultanément une détection et une estimation (détection-estimation globale).

Il résulte de ce mode de conception trois formes d'évolution possibles d'un système de décision complexe à partir d'une structure imposée donnée :

- progressive, par amélioration des modules de traitement ou décisions élémentaires apparaissant dans la structure supposée rigide;

- par saut, par remise en cause de la structure pour une autre structure également décomposée;

- globale, par refus d'une structure imposée *a priori* et par modélisation décisionnelle globale.

En fait, ces trois approches sont utilisées concurremment, compte tenu de la difficulté, de la complexité et de la grande variété des problèmes posés.

La tendance vers la notion de décision complexe se prolonge dans une considération de problèmes plus généraux, entraînant l'intervention, à côté du traitement du signal, de disciplines voisines « concurrentes » (automatique, recherche opérationnelle, intelligence artificielle), ainsi que l'exploitation intensive des ressources des disciplines amont (théorie des jeux, simulation).

On peut ainsi mettre au point des modèles numériques complets (et non par assemblage de sous-systèmes conçus de manière indépendante) résolus par des méthodes de simulation (ils nécessitent une importante puissance de calcul). Un exemple en est fourni par l'étude d'un système ayant pour mission d'effectuer la veille, l'acquisition et la poursuite dans une situation de saturation : existence d'un grand nombre de cibles, de bruit et d'un nombre élevé de brouilleurs. C'est un problème (relevant et du traitement du signal et de la recherche opérationnelle) de gestion d'un radar à balayage électronique. Le système doit organiser la suite des décisions à prendre en tenant compte des priorités et des urgences, et en réalisant à chaque instant un meilleur compromis entre les tâches à remplir et les tâches possibles; pour cela, en cas de surcharge de travail, il doit pouvoir dégrader les performances des décisions élémentaires en conservant une efficacité minimale, se différenciant ainsi d'un système optimal pour un point de fonctionnement donné [2, 13].

Une autre illustration réside dans la prise en compte dans les modèles des perturbations apportées de manière volontaire et conduisant à des situations de type duel : on peut introduire alors, à côté de la

théorie de la décision, la théorie des jeux. Celle-ci se consacre à la recherche de stratégies utilisables par l'observateur contre une volonté intelligente et réputée adverse, contrairement à la théorie de la décision pour laquelle le partenaire de l'observateur est la Nature réputée neutre à son égard. Dans cet état d'esprit s'introduisent alors divers facteurs ou problèmes supplémentaires portant sur la différenciation entre objectifs coopératifs, neutres ou adverses, sur la détermination (apprentissage) de systèmes de décision adverses, sur les moyens d'engendrer de l'extérieur dans un système une décision erronée, et portant également sur les méthodes pour se prémunir contre les points précédents (le brouillage et son élimination, la distinction entre cible et leurre, ...). Apparaît aussi la notion de vulnérabilité d'un système et la question du lien entre cette vulnérabilité et le degré d'évolution du système.

Enfin, une évolution prometteuse, dans le cadre de la caractéristique citée précédemment, résulte de la construction de modèles combinant les techniques du traitement du signal et de l'intelligence artificielle (ou plus particulièrement des « systèmes-experts »). Celle-ci introduit, par rapport aux habitudes ou méthodes du traitement du signal, des modifications ou nouveautés dans divers domaines [14, 15] :

- représentation de l'information à traiter : par introduction de descriptions symboliques différentes des modes numériques propres aux signaux; ceci se prolonge dans l'utilisation, en plus des données elles-mêmes, de la description du système sous-jacent qui les génère;

- représentation de l'information *a priori* : par l'introduction directe des connaissances détenues sur le problème sous forme, par exemple, d'une « base de connaissance » constituée par un ensemble de « règles de production »; celles-ci sont de la forme « si (situation), alors (action) » (utilisation de la logique des propositions ou de la logique du premier ordre);

- représentation de l'incertitude : par des méthodes plus subjectives que l'utilisation du calcul des probabilités et permettant la mise en œuvre de « raisonnements approximatifs »; des voies possibles sont constituées par l'utilisation de coefficients de vraisemblance affectés aux règles de production ou par l'utilisation de la logique floue;

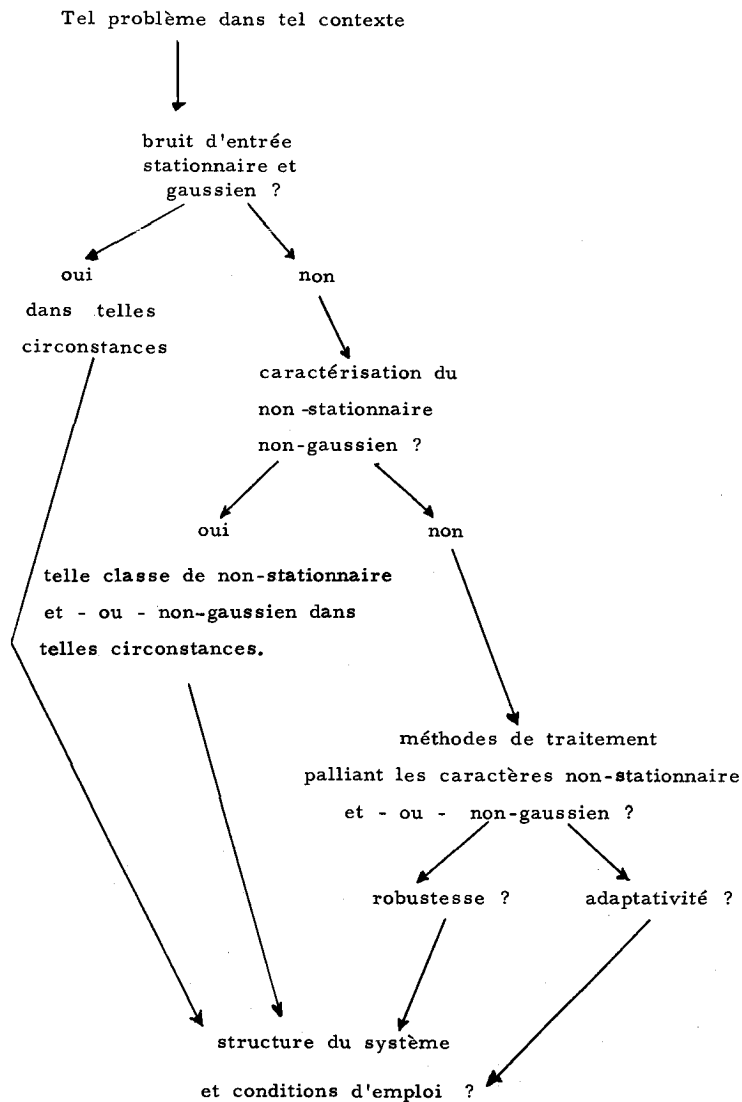
- structure d'organisation du traitement : par spécification non pas d'une suite d'opérations données mais d'un mode d'emploi des opérations selon les circonstances; ceci se traduit par exemple par un « moteur d'inférences » utilisant les schémas d'inférence de la logique formelle ainsi que des méthodes de sélection des règles de production utilisables et de choix de la règle à mettre en œuvre.

5. Acquisition d'information *a priori*

L'efficacité de la modélisation décisionnelle en traitement des signaux bruités est conditionnée par la

SYNTHÈSES

TABLEAU III : exemple de démarche liée aux caractères stationnaire et gaussien.



qualité de l'information *a priori*, c'est-à-dire par les connaissances détenues sur les lois de probabilité de l'observation et éventuellement du paramètre. Cette information résulte généralement (au moins partiellement) de la connaissance détenue sur le milieu où opère le système et de la modélisation associée des processus physiques concourant à la génération de l'observation; cette modélisation physique débouchera par exemple sur des modèles de génération du signal et du bruit, de leur interaction, de leurs équations ou lois de probabilité. Une voie de perfectionnement du modèle global est d'affiner la connaissance et la description de l'environnement (par mesures, par identification, par modélisation) et, par là-même, d'améliorer l'extraction d'information par une meilleure exploitation de la physique.

L'importance de cette démarche en modélisation décisionnelle est illustrée par l'évolution du problème de la déconvolution sismique optimale : le but est de déduire d'un sismogramme la suite des instants de

réflexion sur les différentes couches de l'écorce terrestre par élimination de l'influence du « signal-source » et du bruit. A partir de modélisations physiques de plus en plus précises cette déconvolution peut être réalisée successivement par filtrage de Wiener (le système de traitement est linéaire et homogène), filtrage de type Kalman (le système de traitement est un filtre numérique linéaire, récursif, variant dans le temps), filtrage déduit du maximum de vraisemblance (le système de traitement est un filtre numérique non linéaire, récursif, variant dans le temps) [16].

Un exemple en acoustique sous-marine est constitué par le besoin actuel de formaliser au mieux la cohérence spatio-temporelle des signaux reçus sur un ensemble de capteurs. En effet, un champ d'onde résultant d'une source ponctuelle peut être, après propagation, plan ou sphérique, déformé de manière connue ou inconnue, invariant ou fluctuant aléatoirement pendant la réception, soumis à des trajets multiples; de plus, les sources sont en fait multiples, mobiles

ou immobiles, éventuellement non ponctuelles; la modélisation de la cohérence, quantité liée au milieu, et les connaissances associées sont essentielles pour l'exploitation optimale d'une antenne (celle-ci peut être fixe ou mobile, matérielle ou synthétique, rigide ou déformable, de dimensions quelconques, prévue pour une partie quelconque du spectre utilisable) ou d'un ensemble d'antennes (à positions respectives connues ou inconnues, fixes ou aléatoires). Plus généralement, la caractérisation d'un tel milieu de propagation et — ou — d'une cible réfléchissante peut être effectuée et étudiée en terme de filtrage linéaire non homogène (variant dans le temps) et aléatoire (l'influence du milieu est représentée par une réponse percussionnelle variant dans le temps et — ou — aléatoire); à la covariance de cette réponse — dans le cas où celle-ci est supposée aléatoire — est attachée sous certaines conditions (stationnarité et diffuseurs non corrélés), par transformation de Fourier, la fonction de diffusion du canal traduisant la dispersion en temps et en fréquence de l'énergie transmise [17 à 19].

De par son impact sur le traitement, un élément important de la connaissance du milieu est constitué par les informations *a priori*, concernant les caractères stationnaire et gaussien du bruit parasite. Le « non-stationnaire » et le « non-gaussien » n'étant pas suffisamment caractérisants, on peut par exemple adopter une démarche de la forme représentée sur le tableau III.

6. Algorithmes décisionnels

L'évolution des algorithmes de traitement résulte en grande partie des contraintes et exigences auxquelles on cherche à satisfaire dans la modélisation.

L'élaboration d'un modèle de décision de type donné (la structure décisionnelle $(\Theta, \mathcal{X}, \Delta)$ est donnée, l'espace des fonctions de décision Φ et le critère \mathcal{C} sont proposés) nécessite une quantité minimale d'information. Dans les domaines d'application où la complexité de la physique de l'environnement (ou les difficultés expérimentales) rendent illusoire (au moins dans un délai prévisible) l'élaboration de modèles suffisants de description de l'observation et de ses propriétés, il est nécessaire de compenser, au niveau du système de traitement, l'information manquante par rapport au couple (Φ, \mathcal{C}) . Plusieurs démarches sont possibles selon la structure de l'information disponible (bien souvent on ne peut attribuer aux processus aléatoires des caractères stationnaires et — ou — gaussiens).

Une démarche consiste à adapter le modèle à l'information disponible : la structure décisionnelle et l'information étant fixées on adopte un critère et — ou — un ensemble de fonctions de décision se satisfaisant de l'information disponible. La philosophie en est la recherche d'un système robuste. A l'information disponible correspondent des classes d'observations

susceptibles d'être présentes à l'entrée : un système robuste est tel que sa performance reste acceptable pour toute observation en provenance de ces classes.

Un exemple de cette attitude est, en présence de l'information nécessaire correspondante, l'utilisation de critères n'exigeant qu'une information partielle tels les critères de distance (estimation selon les moindres carrés, détection selon les moindres carrés) ou de contraste (détection par critère de rapport signal sur bruit de sortie) pour lesquels on recherche le système optimal. Une autre voie résulte de l'utilisation de tests « non paramétriques » conduisant à des décisions à propriété invariante. Les performances du système sont alors généralement difficiles à évaluer de manière fine (ne serait-ce qu'en raison du manque d'information sur les lois de probabilité de l'observation) et il en est probablement de même de la qualité de la robustesse du système.

Cette démarche peut être précisée dans la voie de l'obtention de la robustesse par utilisation d'un index de performances donné et d'un critère d'optimisation de la plus mauvaise performance liée aux classes d'observations susceptibles d'être présentes à l'entrée (décision à performance minimale garantie). On obtient ainsi, par exemple, pour des classes d'observations particulières, des notions de filtrage de Wiener robuste et de filtrage adapté robuste [6, 20, 21].

Une autre démarche consiste à adapter l'information au type de modèle choisi : la structure décisionnelle, le critère et l'ensemble de fonctions de décision étant fixés, on complète l'information disponible en estimant l'information manquante de manière explicite (à partir de l'observation ou d'une observation annexe) ou — et — de manière implicite en la compensant par utilisation de liaisons spatio-temporelles au moyen d'un système bouclé (récursif). Dans le cadre d'un modèle de décision continue, le système adaptatif obtenu modifie sa structure à chaque instant de décision de façon à être près (le plus possible?) de l'optimal; il a ainsi une fonction d'« apprentissage » liée à la notion d'information inconnue et — ou — une fonction de « poursuite » liée à la notion de contexte non-stationnaire (à caractéristiques non complètement connues).

La première méthode est généralement satisfaite en remplaçant dans l'équation du système optimal, solution du modèle de décision postulé, l'information manquante par l'information estimée (système adaptatif en boucle ouverte). On peut noter que la structure ainsi obtenue n'est probablement pas optimale pour le problème conjoint « estimation d'information et décision », formulé sous forme d'un problème de décision global.

La seconde méthode (système adaptatif en boucle fermée) passe généralement par l'utilisation d'algorithmes d'estimation adaptatifs dont une forme typique est la suivante [22] :

— la suite d'estimateurs (vectoriels) $(\hat{\theta}_n)_{n \in \mathbb{Z}}$ pour l'estimation du paramètre vectoriel $(\theta_n)_{n \in \mathbb{Z}}$ dont dépend

SYNTHÈSES

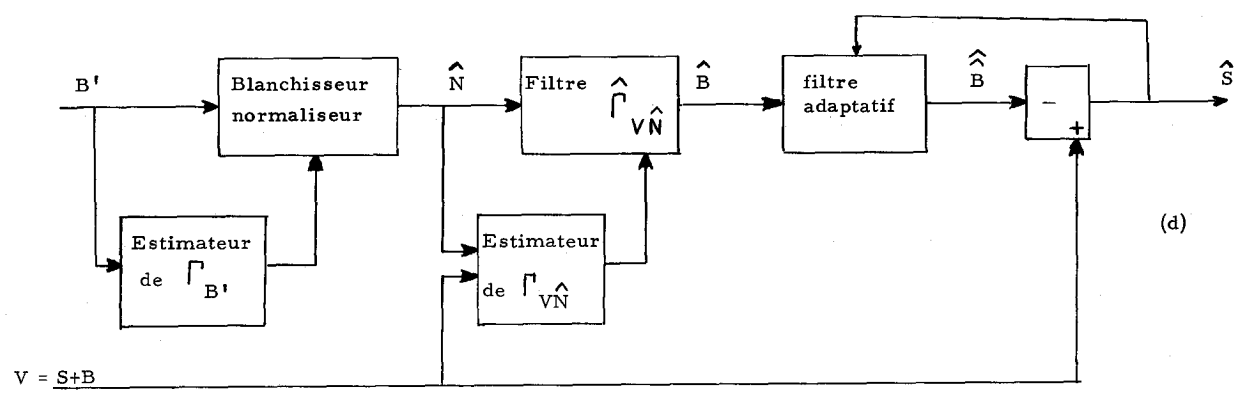
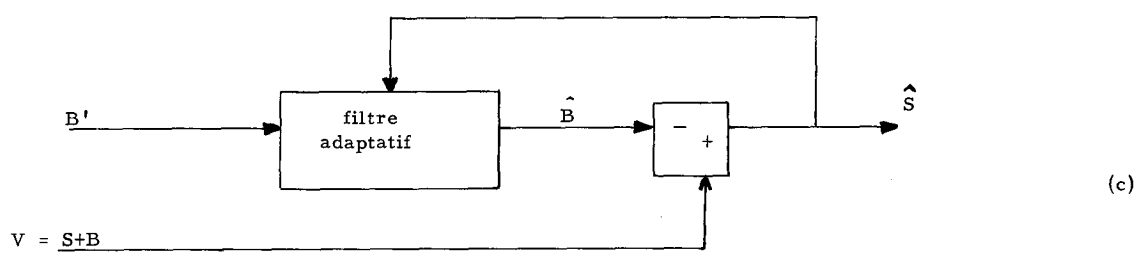
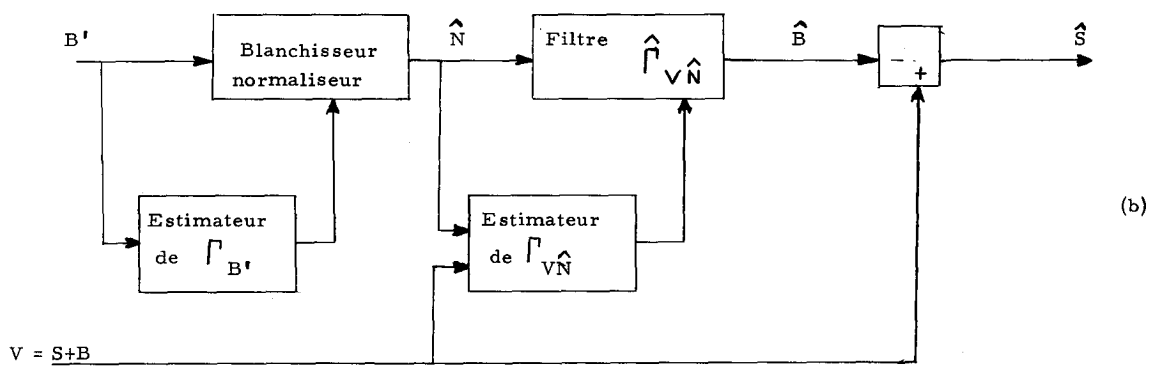
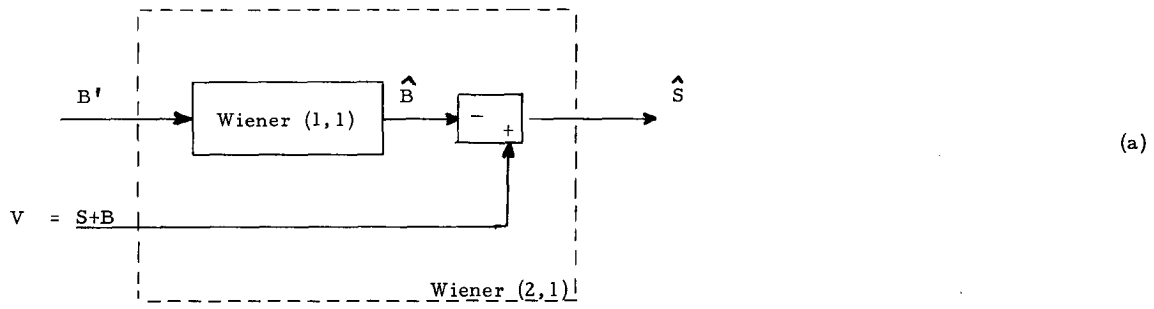


Fig. 5 (d'après [23]). — Soustracteurs de bruits.

l'observation vectorielle $(X_n)_{n \in \mathbb{Z}}$ est donnée par :

$$\hat{\theta}_n = \hat{\theta}_{n-1} + G_{n-1} A_{n-1} (\hat{\theta}_{n-1});$$

— dans ce cadre $(G_n)_{n \in \mathbb{Z}}$ est une suite de matrices de gain, $(A_n)_{n \in \mathbb{Z}}$ est une suite de vecteurs aléatoires, le paramètre θ_n ou bien varie lentement par rapport à l'observation, ou bien est constant par morceaux avec des sauts à des dates inconnues;

— si le paramètre varie lentement, on cherche à estimer sa valeur de manière permanente (à chaque instant); si le paramètre est constant par morceaux, on cherche à détecter les sauts, estimer leurs dates et estimer la valeur du paramètre entre eux.

Ainsi on peut réaliser un filtrage adaptatif par considération d'un filtre transversal, dont les coefficients variables dans le temps sont obtenus par l'une des deux méthodes précédentes.

Un exemple simple de systèmes adaptatifs est donné par une famille de « soustracteurs de bruit ». Ces systèmes possèdent une entrée principale sur laquelle est présent un processus $V = S + B$ et une entrée annexe sur laquelle est présent un processus B' (référence bruit seul). Les signaux S , B , B' sont supposés aléatoires, centrés, stationnaires au second ordre; de plus B et B' sont supposés complètement cohérents (le carré du module de leur densité spectrale d'intercorrélation est égale, pour toute fréquence, au produit de leurs densités spectrales : c'est le cas lorsque B et B' se déduisent d'un processus blanc N par filtrages linéaires et homogènes); enfin S est non corrélé avec B et B' . Ces systèmes possèdent une sortie chargée de fournir une estimation continue \hat{S} de S .

La connaissance du second ordre de B et B' (celle de S n'est pas nécessaire) permet la construction du filtrage de Wiener (à 2 entrées et 1 sortie) fournissant \hat{S} à partir de V et B' . Ce filtre se structure en soustracteur de bruit selon le schéma de la figure 5 a; la sortie s'écrit $\hat{S} = V - \hat{B}$ où \hat{B} est l'estimation fournie par un filtrage de Wiener (à 1 entrée et 1 sortie) « annexe », alimenté par B' [23].

Si l'information *a priori* constituée par la connaissance du second ordre de B et B' est totalement indisponible le filtrage de Wiener (non constructible par manque d'information) peut être approché par un système discret adaptatif. Ce dernier peut revêtir diverses formes, obtenues en remplaçant, dans la structure à base de soustracteur, le filtrage annexe par un filtrage approché :

— le filtrage annexe est approché par utilisation d'une estimation de l'information non disponible, estimation effectuée à partir des processus d'entrée (conception en boucle ouverte) : une structure obtenue est un « corrélofiltre » muni d'un « blanchisseur (-normaliseur) » préalable, schématisé figure 5 b [24];

— le filtrage annexe est approché de manière récursive par utilisation directe du critère c'est-à-dire minimalisation de la puissance de sortie (conception en boucle fermée engendrant une structure interprétable en terme de « moindres carrés récursifs ») : une structure obtenue est le filtrage de Widrow, schématisé figure 5 c [25] (d'autres sont possibles [26]);

— le filtrage annexe est approché de manière mixte, sous forme d'un filtrage utilisant une estimation de l'information non disponible, corrigé par un filtrage récursif utilisant directement le critère; une structure obtenue est le « corrélofiltre-adaptateur » muni d'un « blanchisseur (-normaliseur) » préalable et utilisant un filtrage de Widrow dont l'entrée annexe reçoit une estimation (adaptative) du bruit à soustraire; elle est schématisée figure 5 d [23].

Un prolongement du problème précédent au « traitement d'antenne » conduit (par exemple) à une famille de systèmes destinés à extraire, des fonctions reçues sur plusieurs entrées, le signal en provenance d'une direction choisie (fig. 6). Le système classique par « formation de voies » consiste à faire la somme des entrées après avoir compensé les retards naturels de propagation de l'onde transportant le signal dans la direction choisie, de façon à ce que cette onde soit en phase sur les capteurs. La « formation de voies pondérée » permet, par adjonction de pondérations aux retards sur les entrées, de modifier la courbe de directivité de l'antenne relative à la direction considérée. Une structure plus efficace (et généralisant les précédentes) est celle de la « formation de voie optimale »; elle consiste, pour la direction choisie, à effectuer un filtrage linéaire et homogène de chaque entrée, puis à additionner les sorties correspondantes; les filtrages satisfont, globalement, aux conditions suivantes [27, 28] :

— le gain de l'antenne, pour une onde plane dans la direction considérée, est unité, pour toute fréquence traitée;

— la puissance moyenne de sortie est minimale.

La surveillance d'un secteur angulaire impose la répétition du traitement pour toutes les directions quantifiées du secteur.

La « formation de voie optimale » réclame la connaissance du second ordre (par exemple la matrice de densité spectrale d'intercorrélation, encore appelée matrice interspectrale) de la fonction vectorielle d'entrée supposée stationnaire au second ordre et centrée. Si ce second ordre n'est pas connu ou — et — s'il est variable dans le temps, on peut envisager une méthode adaptative (on obtient une « antenne adaptative »). Une telle « formation de voie optimale adaptative » [27 à 29] recherche donc, pour la direction considérée, les filtrages d'entrée minimalisant la puissance moyenne de sortie de l'antenne sous la contrainte de gain unité dans la direction pour toute fréquence. Elle peut être conçue de diverses manières; ce peut être par estimation, à chaque fréquence traitée, de la matrice interspectrale et déduction du filtre associé pour la direction considérée; ce peut être, à chaque fréquence traitée, par construction récursive de type « moindres carrés » (fig. 7 a) des coefficients auxquels se réduisent les filtrages d'entrée (algorithme de Frost); ce peut être par généralisation de la méthode précédente à la construction récursive des filtrages d'entrée pour le cas large bande; une forme possible utilise un « soustracteur de bruit » dont l'entrée principale est alimentée par une « formation de

SYNTHÈSES

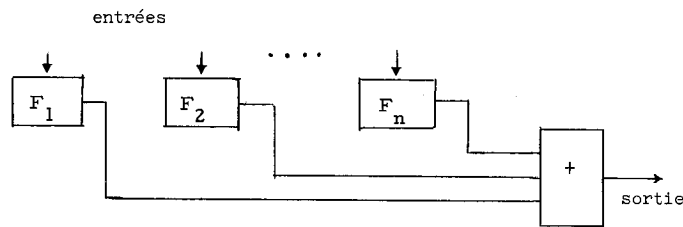


Fig. 6. — Traitement d'antenne.

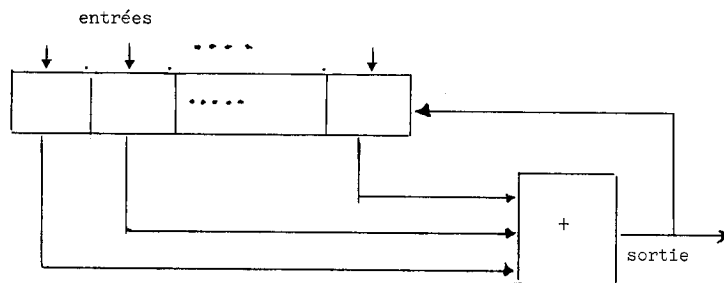


Fig. 7 a. — Exemple de formation de voie optimale adaptative.

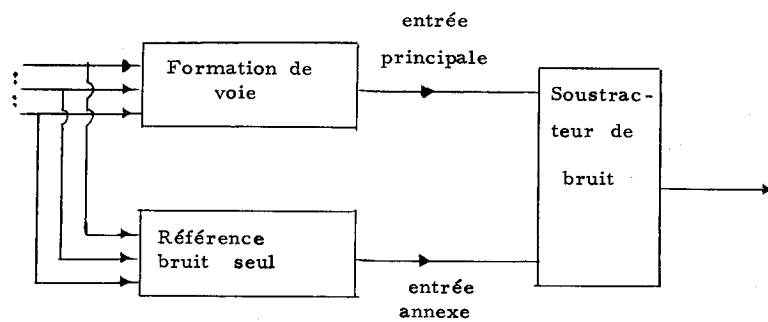


Fig. 7 b. — Exemple de formation de voie optimale adaptative.

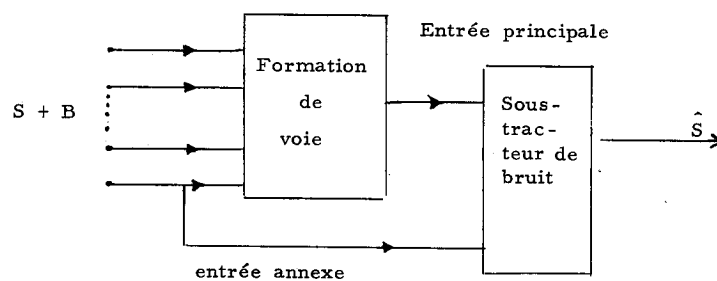


Fig. 8. — Exemple d'élimination d'un brouilleur.

voie » classique et l'entrée annexe par une référence bruit seul (sans signal) déduite des entrées (fig. 7 b). On peut aussi noter l'existence d'autres schémas de « formation de voies adaptative non optimale » ne satisfaisant pas aux conditions de l'antenne optimale. Ainsi l'antenne de Howells-Applebaum, destinée à la réception d'un signal faible avec élimination adaptative d'un brouilleur fort, utilise simplement un soustracteur de bruit (par exemple de Widrow) dont l'entrée principale est alimentée par une « formation de voie » classique et l'entrée annexe par un des

capteurs; mais sa performance se dégrade en présence d'un signal fort, car celui-ci pollue, sur l'entrée annexe, la référence bruit seul (fig. 8) [28].

Plus généralement le but du traitement est d'effectuer « l'imagerie du milieu » par détermination du nombre de sources ponctuelles, de leur localisation, de leur dépendance statistique. Dans ce cadre sont actuellement répertoriées, sous l'appellation « haute résolution », diverses méthodes présentant un pouvoir séparateur en localisation supérieur à celui de la « formation de voies » classique; parmi celles-ci, la

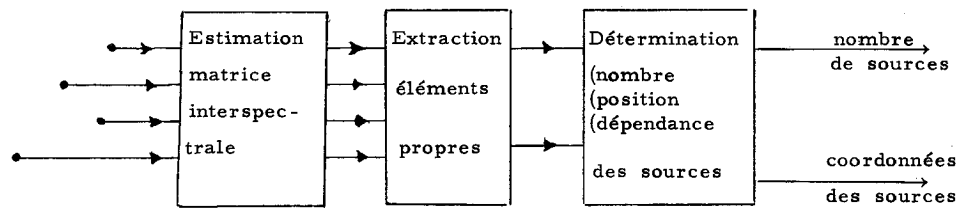


Fig. 9. — Imagerie du milieu par méthode « haute résolution ».

famille interspectrale s'appuie sur les éléments propres (valeurs et vecteurs) de la matrice de densité spectrale d'intercorrélacion (ou matrice interspectrale) de la fonction vectorielle d'entrée (cette matrice doit être estimée par l'une des méthodes d'analyse spectrale, sur un support borné, à chaque instant de décision) (cf. fig. 9) [30].

A noter d'un point de vue pratique, que le développement de ces traitements est lié à celui d'algorithmes rapides pour la réalisation des différentes étapes du système.

Enfin, l'un des problèmes actuels est la détermination de traitements d'antenne optimaux adaptatifs, lorsque les fronts d'onde sont en nombre quelconque et sont distordus de manière inconnue, que ce soit de façon constante ou non constante pendant la mesure; bien entendu l'ensemble est de plus perturbé par du bruit. Un tel modèle se révèle nécessaire en acoustique sous-marine par opposition aux hypothèses classiques, lorsque l'on veut tenir compte des déformations et de la mobilité de l'antenne ainsi que des caractéristiques effectives du milieu de propagation (anisotropie, inhomogénéité, dimensions finies, trajets multiples, frontières à caractéristiques de réflexion variables, ...): l'ensemble milieu-antenne se comporte alors comme un système aléatoire engendrant des fronts d'onde fluctuants [31].

7. Conclusion

Les techniques de conception des systèmes bruités évoluent et se développent rapidement. Une première caractéristique en est la grande diversité de sujets, de points de vue, d'applications. Une seconde en réside dans la tendance vers l'étude des systèmes complexes et vers les modélisations ambitieuses. Plus particulièrement un problème d'extraction d'information d'un signal bruité peut être modélisé sous forme de problème de décision, dans la résolution duquel interviennent de manière importante les connaissances *a priori*; parmi les grands axes d'évolution actuels, dans l'optique de capacités et performances accrues, apparaissent comme primordiaux la recherche d'adaptativité et la mise au point d'une bonne modélisation physique du problème.

Cette évolution générale est conditionnée par le développement des capacités de réalisation. Ainsi les traitements adaptatifs, à grand nombre d'entrées, en temps

réel, sont gourmands en puissance informatique concernant à leurs caractéristiques. Il en résulte la notion de « machine de traitement du signal », système informatique adaptable à l'application considérée par son logiciel et sa structure. Ce développement est rendu possible par la mise au point de circuits intégrés spécifiques réalisant ou permettant la réalisation des outils de base de traitement du signal.

Manuscrit reçu le 27 août 1984.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P.-Y. ARQUES, *Décisions en traitement du signal*, Masson, Paris, 1982.
- [2] « Traitement du Signal », Dossier « Recherches de défense en électronique », *Journée Nationale « Science et Défense »*, École Polytechnique, Palaiseau 26-27 avril 1983. DRET, Paris.
- [3] S. M. KAY et H. C. WOODSUM, *Sonar technology. Trends and Perspectives in Signal Processing*, September 1983, p. 1-7.
- [4] G. R. L. SOHIE, Application of Hilbert space theory to optimal and adaptive array processing, *Ph. D. Thesis in Acoustics*, The Pennsylvania State University, 1983.
- [5] L. H. SIBUL et G. R. L. SOHIE, Application of operator theory to signal modeling and processing, *Actes du Neuvième colloque sur le Traitement du signal et ses applications*, Nice, mai 1983 (GRETSI), p. 63-68.
- [6] H. V. POOR, Robust matched filters, *IEEE Trans. on Information Theory*, IT-29, n° 5, September 1983, p. 677-687.
- [7] M. JOINDOT, Les problèmes théoriques de traitement du signal dans les systèmes de transmission numérique, *Rapport Interne CNET*, Lannion, IG/TMA/1, novembre 1976.
- [8] A. BLANC-LAPIERRE et B. PICINBONO, *Propriétés statistiques du bruit de fond*, Masson, Paris, 1961.
- [9] G. BOX et G. JENKINS, *Time series analysis: Forecasting and control*, Holden Day, San Francisco, 1976.
- [10] J. A. CADZOW, ARMA Time series modeling: an effective method, *IEEE Trans on Aerospace and Electronic systems*, AES-19, n° 1, January 1983, p. 49-58.
- [11] S. HAYKIN, *Nonlinear methods of spectral analysis*, Springer Verlag, New York, 1979.
- [12] P.-Y. ARQUES, O. MACCHI et G. VEZZOSI, Trois procédures de détection-estimation simultanées d'un signal, *Annales des Télécommunications*, 28, n° 11-12, novembre-décembre 1973, p. 459-468.
- [13] M. HUON, La simulation de radar à antenne à balayage électronique, *Thèse de Docteur-Ingénieur*, Université de Rennes, 1981.

SYNTHÈSES

- [14] G. E. KOPEC, A. V. OPPENHEIM et R. DAVIS, Knowledge-based signal processing. *Trends and Perspectives in Signal Processing*, July 1982, p. 1-6.
- [15] J. L. LAURIÈRE, Représentation et utilisation des connaissances, *Technique et Science Informatique*, 1, n° 1, 1982, p. 25-42 et n° 2, 1982, p. 109-133.
- [16] J. MENDEL, Model-based signal processing. *Trends and Perspective in Signal Processing*, December 1983, p. 9-12.
- [17] J. Y. JOURDAIN, Modèles et milieux, *Actes du Neuvième colloque sur le Traitement du Signal et ses Applications*, Nice, mai 1983 (GRETSI), p. 905-909.
- [18] G. JOURDAIN et G. TZIRITAS, Communication over fading dispersive channels, optimal receivers and signals, *Signal Processing*, 6, n° 1, janvier 1984, p. 3-25.
- [19] L. H. SIBUL, Optimum detection and estimation in stochastic transmission media, in *Applied stochastic processes*, G. ADOMIAN, éd., Academic Press, New York, 1980, p. 247-267.
- [20] H. V. POOR, On robust Wiener filtering, *IEEE Trans on Automatic Control*, AC 25, n° 3, June 1980, p. 531-536.
- [21] H. V. POOR, Robust decision design using a distance criterion, *IEEE Trans. on Information Theory*, IT 26, n° 5, September 1980, p. 575-587.
- [22] A. BENVENISTE, Adaptive Algorithms in Signal Processing, *Encyclopedie Pergamon sur l'Automatique* (à paraître).
- [23] P.-Y. ARQUES et G. FAUCON, Proposal and experimental evaluation of a combined structure "correlofilter-adapter" for the continuous estimation of a noisy signal with a reference noise, *Proceedings of the 1982 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Paris, May 1982, (ICASSP 82), p. 1420-1423.
- [24] H. MERMOZ, Modularité du traitement adaptatif d'antenne, *Annales des Télécommunications*, 29, n° 1-2, janvier-février 1974, p. 43-54.
- [25] B. WIDROW *et al.*, Adaptive noise cancelling: principles and applications, *Proceedings of the IEEE*, 63, n° 12, December 1975, p. 1692-1716.
- [26] B. FRIEDLANDER, System identification techniques for adaptive signal processing, *Circuits, Systems and Signal Processing*, 1, n° 1, 1982, p. 3-41.
- [27] J. W. R. GRIFFITHS, Adaptive array processing, *IEE Proceedings*, 130, Pts F and H, n° 1, February 1983, p. 3-10.
- [28] B. WIDROW, A review of adaptive antennas, *Proceedings of the 1979 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Washington D.C., April 1979 (ICASSP 79), p. 273-278.
- [29] G. BIENVENU, Underwater passive detection and spatial coherence testing, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 65, n° 2, February 1979, p. 425-437.
- [30] G. BIENVENU et L. KOPP, Optimality of high resolution array processing using the eigensystem approach, *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, ASSP-31, n° 5, October 1983, p. 1235-1248.
- [31] J. P. LE CADRE, Traitements d'antennes en présence de fronts d'ondes aléatoirement fluctuants, *Thèse de troisième cycle*, INP de Grenoble, 1983.