

Tendances en traitements sonar

Trends and Perspectives in Sonar Processing



Michel BOUVET (*)

Centre d'Etudes et de Recherches en
Détection Sous-Marine
DCN Toulon - Le Brusac
83140 Six Fours Les Plages

Ingénieur principal de l'Armement, Michel Bouvet est ingénieur de l'École Polytechnique, Docteur-Ingénieur et Docteur d'État ès Sciences Physiques. Après avoir effectué des travaux de recherches en théorie et traitement des signaux avec les professeurs Bernard Picinbono au

Laboratoire des Signaux et Systèmes (Gif-sur-Yvette) et Stuart Schwartz au département d'*Electrical Engineering* de l'Université de Princeton (USA), il a été affecté en 1986 au GERDSM (Groupe d'Études et de Recherches en Détection Sous-Marine, au Brusac près de Toulon) de la Direction des Constructions Navales où il a poursuivi des activités d'études et de développement de récepteurs sonar. Il est l'auteur de l'ouvrage *Traitement des signaux pour les systèmes sonar* publié chez Masson en 1992. Membre de nombreuses sociétés savantes et ancien auditeur des sessions méditerranéennes du Centre des Hautes Études de l'Armement (CHEAR, où il était le président du comité Grappa), il est depuis mi-92 au Centre Militaire d'Océanographie (CMO) du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) à Brest.

RÉSUMÉ

Les systèmes sonar revêtent une importance particulière car ce sont les seuls systèmes qui permettent de détecter, avec des portées raisonnables, des objets dans les océans, que ce soient des poissons, des mines ou des sous-marins. De plus, la seule perception « sensorielle » des sous-marins est obtenue grâce à eux. Les traitements des signaux sonar, à la fois des observations brutes ou des informations extraites, sont donc particulièrement importants.

Cet article présente le pourquoi et le comment de l'acoustique sous-marine, puis les signaux et bruits à traiter. L'anatomie des récepteurs

sonar est exposée, d'abord dans son principe général, puis sur un exemple particulier. Les tendances futures en traitements sonar sont ensuite discutées, que ce soit en terme de traitement du signal, d'extraction, de traitement de l'information ou d'exploitation, une importance toute particulière étant accordée aux architectures des récepteurs sonar.

MOTS CLÉS

Acoustique sous-marine, sonar, extraction, architecture, information

ABSTRACT

Sonar systems are particularly important because they are the only systems allowing detection with reasonable ranges of objects imbedded in oceans, these objects being fishes, mines or submarines. Furthermore, the only sensorial perception of submarines is obtained through them. Sonar signal processings are then particularly important.

This article presents the « why » and « how » of underwater acoustics, and the signals and noises to process. The anatomy of sonar receivers is then presented, first in general and second with a particular example.

Future trends in signal processing are then discussed, in terms of signal processing, automatic detection and tracking, information processing of exploitation, particular interest being given to receiver architecture.

KEY WORDS

Underwater acoustics, sonar, automatic detection and tracking, information

Introduction

Le but de cet article est de présenter une vision particulière, celle de l'auteur, sur les tendances des traitements sonar. Cette vision est celle d'un ingénieur, non d'un chercheur, « concepteur » de chaînes de réception sonar, c'est-à-dire,

caricaturalement, de celle d'un individu qui traduit le besoin opérationnel (reçu d'un état-major, de la Marine en l'occurrence) en spécifications techniques (transmises aux industriels qui réalisent). Le lecteur avide d'équations ou d'algorithmes sera déçu : ce qui suit se veut la présentation d'une réflexion sur les problèmes posés par la conception de récepteurs sonar et non pas la présentation de résultats de recherche.

Cet article s'organise comme suit. Le paragraphe 1 rappelle

(*) Maintenant au Centre Militaire d'Océanographie, EPSHOM - B.P. 426, 13, rue du Chatellier, 29275 Brest Cedex.

dans ses grandes lignes le pourquoi et le comment de l'acoustique sous-marine (ASM) et, plus précisément, de la détection sous-marine (DSM). En 2, les signaux sur lesquels « travaillent » ou peuvent « travailler » les systèmes SONAR sont présentés et discutés. Ces deux paragraphes forment la partie « sonar ».

Le paragraphe 3 présente l'anatomie des récepteurs sonar, dans son principe général dans un premier temps, puis sur un exemple réaliste de chaîne sonar passive dans un second temps. C'est la partie « traitements ».

Afin d'être cohérent avec le titre de cet article, la discussion des « tendances » futures forme la dernière partie. Cette discussion, en 4, se concentre, successivement, sur toutes les composantes d'un récepteur, traitement du signal, extraction et traitement de l'information en n'oubliant pas l'exploitation du système. Finalement, en 5, les différentes possibilités (théoriques) d'architecture des systèmes sonar sont présentées après la présentation des quelques contraintes pesant sur leur conception.

1. La détection sous-marine

La planète Terre est mal nommée : la « Mer » représente 70 % de la surface du globe !

Plus sérieusement, la Mer a toujours été un lieu vital d'affrontement [1]. Pour ne s'en tenir qu'à des aspects géopolitiques, les mers et océans sont des lieux de transport de chargements vitaux, à la fois pour les pays pauvres (exportations de matières premières) et pour les pays riches (importations de ces mêmes matières premières). La Mer est un domaine international pour sa plus grande partie où les grandes puissances font parfois démonstration de leur puissance (on a même parlé de gesticulation...). Les océans cachent dans leur profondeur l'ultime rempart des grandes nations nucléaires, les sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE), principal vecteur de la dissuasion nucléaire.

Cette dernière caractéristique est due à la difficulté d'investigation du milieu sous-marin qui atténue très rapidement toute onde, électromagnétique entre autre, sauf les ondes mécaniques. Le tableau 1 présente une idée des distances raisonnables de propagation de différentes ondes (électromagnétiques et acoustiques) dans l'air et dans l'eau.

Onde	Portée dans l'air	Portée dans l'eau
radio à 18 MHz	10 000 km	1,7 m
radar à 3 MHz	600 km	4 mm
laser bleu-vert	45 km	100 m
sonar à 1 kHz	10 km	400 km
sonar à 10 kHz	100 m	4 km

Tableau 1. — Portée de différents systèmes dans l'air et dans l'eau.

Dans la mesure où les premiers systèmes d'investigation sous-marine utilisaient des sorties acoustiques, on parle

plutôt d'ondes acoustiques et donc d'acoustique sous-marine. « Si tu arrêtes ton navire, que tu mettes la tête d'une sarbacane dans l'eau et l'autre extrémité à l'oreille, tu entendras les navires très éloignés de toi » a écrit Leonardo da Vinci au début du 16^e siècle. Avec une extrême concision (et la « technologie » de l'époque), nous avons ainsi la description d'un système sonar et de son exploitation :

- arrêter son navire pour ne pas polluer l'observation (diminution du « bruit propre ») ;
- mettre un capteur (« wet end » ou partie humide) dans l'eau : la « tête d'une sarbacane » ;
- utiliser un récepteur et une interface homme-machine réduits à leur plus simple expression : « l'autre extrémité à l'oreille » ;
- se servir du système pour sa fonction, la détection : « tu entendras les navires » ;
- souligner l'avantage du système ainsi conçu et exploité par rapport aux autres « systèmes » (l'observation visuelle par exemple) : « très éloignés de toi ».

Il a malgré tout fallu attendre le milieu des années 1910 pour que les véritables études sur l'ASM démarrent. Le naufrage du Titanic dans la nuit du 14 au 15 avril 1912 a conduit aux recherches de systèmes de détection d'iceberg à distance. Le sonar était né. Sonar est un acronyme pour *SOund Navigation And Ranging* : utiliser les ondes acoustiques (sound) dans l'eau pour aider à la navigation et obtenir des informations (ranging). Tout (ou presque) est dit.

Le but principal des systèmes de détection sous-marine (DSM) est la description du milieu sous-marin et, en particulier, dans le cadre militaire, la caractérisation de « cibles » sous-marines.

Par caractérisation, il faut entendre :

- détection : y a-t-il « quelque chose » ?
- classification : quel est ce « quelque chose » ?
- localisation : où est ce « quelque chose » et éventuellement, quels sont sa vitesse et son cap ?

Il est souvent souhaitable que la **détection** soit panoramique (partout) et s'effectue sous certaines contraintes (taux de fausse alarme maximum acceptable, ...). Le problème de **localisation** se décompose en coordonnées cylindriques : le gisement est (théoriquement du moins) facilement obtenu par formation de voies électroniques (contrairement au radar où la célérité des ondes électromagnétiques permet souvent une formation des voies mécaniquement) ; la distance est obtenue de façon simple pour les systèmes actifs (on émet une onde qui se réfléchit sur la cible et on traite l'observation reçue après le trajet aller-retour, la distance s'obtenant par le demi-temps de trajet total divisé par la célérité du son dans l'eau de mer, environ 1 500 m/s) mais de façon plus compliquée pour les systèmes passifs où on se contente d'écouter les bruits rayonnés par les bruiteurs sous-marins ; l'immersion est plus complexe à obtenir directement. La **classification** peut être grossière (en actif, séparation entre un écho de sous-marin et un écho sur une montagne sous-marine, par exemple) ou plus fine (« l'étude du bruit rayonné que je reçois me permet de classifier ce bruiteur sous-marin britannique de type Trafalgar ») ; si on est capable de remonter au nom du bâtiment

(« c'est le sous-marin nucléaire d'attaque français Améthyste »), on parlera plutôt d'identification.

D'une manière générale, les « cibles » peuvent avoir plusieurs natures : poissons, torpilles, mines, bâtiments de surface, sous-marins. Les opérations de détection ou d'estimation précédentes servent à remplir certaines missions comme le pistage, l'engagement d'une arme, une contre mesure anti-torpille, la destruction d'une mine, ...

Le principal avantage des systèmes actifs est leur portée de détection... et de mesure. Leur principal inconvénient est leur indiscretion. Au prix d'une portée moindre, surtout vis-à-vis des sous-marins les plus modernes, très discrets acoustiquement, les systèmes passifs sont intrinsèquement discrets : on se contente d'écouter. Cette caractéristique en fait les systèmes de DSM préférés des sous-marins dont la principale qualité est la discrétion. Les systèmes passifs formeront le support de la plupart des exemples discutés dans la suite.

Dans un cadre différent, les systèmes de DSM ont généralement des motivations qui ne les distinguent guère des systèmes de détection électromagnétiques, sur le plan des concepts scientifiques en tout cas. Sur le plan des concepts technologiques, c'est une autre histoire à cause de la physique et, plus particulièrement de la différence des célérités (300 000 000 m/s par rapport à 1 500 m/s) d'une part, et de la nécessité d'un milieu de propagation pour les ondes acoustiques alors que les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide.

2. Les signaux

Avant de discuter les problèmes liés à la conception de récepteurs sonar, il est nécessaire de s'intéresser aux observations à traiter et, selon la démarche classique en théorie du signal, aux signaux (au sens partie informative contenue dans l'observation) et aux bruits (au sens partie nuisible contenue dans l'observation, non prédictible, et limitant l'« accès » à l'information). Signalons tout de suite un écueil de terminologie : il est d'usage de parler de « bruit rayonné » plutôt que de signaux rayonnés pour les ondes acoustiques émises, souvent de façon involontaire, par les bruiteurs et ces « bruits rayonnés » sont la partie informative sur laquelle les systèmes passifs fondent leur analyse.

2.1. SIGNAUX UTILES

Les systèmes actuels de DSM sont essentiellement de trois types, actif moyenne fréquence, passif sur raies ou passif large bande. On peut y adjoindre les systèmes d'interception sonar.

* Actif

Un système sonar actif est un système qui émet un signal et qui traite l'observation reçue après (éventuelle) réflexion sur la cible. Les systèmes actuels travaillent plutôt en

« basse » ou « moyenne » fréquence (quelques kHz). La contre-mesure correspondante (équivalente de la furtivité en radar) consiste à recouvrir la cible de matériaux dits anéchoïques diminuant l'index de cible.

* Passif

Les systèmes sonar passifs utilisent les bruits rayonnés par les bâtiments. Comme la partie stationnaire de ces bruits rayonnés possède une composante à large bande et une composante à bande étroite, on parlera de détection passive sur raies et de détection passive en large bande.

Les systèmes actifs MF possèdent deux inconvénients majeurs. Tout d'abord, ils sont indiscrets et, de ce fait, ne sont guère installés ou utilisés sur sous-marins. D'autre part, ils possèdent une portée limitée par l'atténuation des ondes acoustiques dans l'eau et par l'utilisation possible de matériaux anéchoïques.

En ce qui concerne les systèmes passifs axant leur détection sur les raies spectrales ou sur le bruit large bande rayonnés par les bâtiments, les progrès effectués en discrétion acoustique durant les dernières années sont tels que leurs portées ont fortement diminué sur les bruiteurs les plus modernes.

La tendance est donc de s'intéresser à de nouveaux « signaux » et, entre autres, à des systèmes **actifs très basse fréquence** et aux bruits rayonnés **non stationnaires**, que ce soit des signaux rayonnés de façon involontaire (dits *transitoires* ou *impulsifs*) ou de manière volontaire (émissions sonar, dans le but d'interception d'émissions sonar, pour contre-mesure).

2.2. BRUITS

La typologie traditionnelle des bruits en ASM sépare les bruits acoustiques en trois grandes classes :

— le **bruit ambiant** : c'est le bruit de fond de la mer, qui préexiste à l'existence du capteur et de son support ; il est de génération météo-océanographique (précipitations, agitation de surface, biologique...), ou lié au trafic maritime lointain ;

— les **bruits propre et rayonné** : ce sont les bruits liés à l'existence du capteur et de son porteur (machines tournantes, ...) et à leur déplacement (cavitation des hélices, hydrodynamique, ...) vu par ses propres capteurs (bruit propre souvent en champ proche) ou par les capteurs d'autres porteurs du sonar (bruit rayonné, en champ lointain).

— les **bruits de réverbération** : existant seulement en mode actif, c'est le bruit lié à la rétro-diffusion de l'onde acoustique émis sur des petits réflecteurs élémentaires se situant sur le fond (réverbération de fond), dans le volume de la colonne d'eau (réverbération de volume) ou en surface (réverbération de surface).

L'importance relative de ces bruits peut être très différente selon les systèmes et leur mode d'exploitation. Citons par exemple l'augmentation de niveau du bruit propre sur une antenne avec la vitesse, du bruit de réverbération avec la

puissance émise et du bruit ambiant dans une zone de forte activité biologique.

La figure 1 présente un synoptique plus particulier des divers « bruits » rencontrés en ASM passive. La plupart des systèmes sonar d'écoute passive fondent leurs analyses sur les bruits rayonnés stationnaires, les autres composantes étant du bruit (au sens nuisible !). Les intercepteurs cherchent à traiter les émissions sonar adverses c'est-à-dire les bruits rayonnés volontairement et impulsifs. Le principal problème posé pour le traitement est lié aux bruits impulsifs propres et aux émissions sonar biologiques. Des systèmes en cours d'étude fondent leurs analyses sur les bruits rayonnés impulsifs ou transitoires émis involontairement.

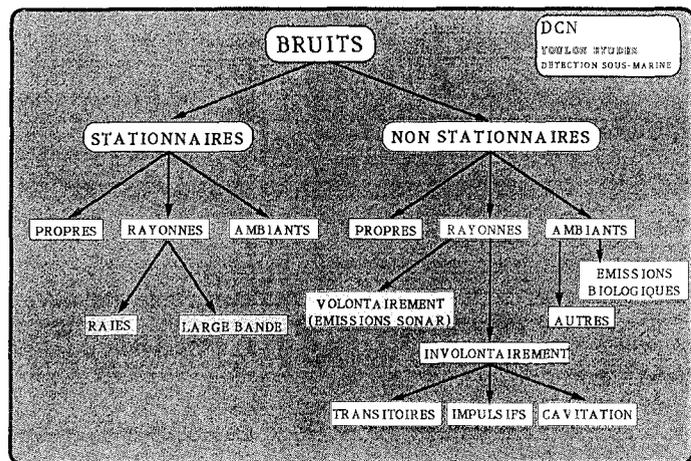


Figure 1. — Typologie des bruits en ASM passive.

Il est utile, pour fixer les idées, de donner un ordre de grandeur de la dynamique de ces bruits. Le tableau 2 présente quelques bruiteurs typiques en ASM, leur niveau total de bruit rayonné, en watt, et leur analogie en acoustique aérienne, probablement mieux connue du lecteur. En raisonnant par analogie, le concepteur d'un sonar doit faire un système capable de détecter, localiser et classifier l'alouette qui chante au bord de la piste à Roissy-Charles de Gaulle au moment où un Boeing 747 décolle.

Acoustique sous-marine : Type de bâtiment	Puissance acoustique totale rayonnée	Acoustique aérienne : Equivalent
Porte-avion nucléaire	100 à 1 000 W	Avion au décollage
Sous-marin très bruyant	1 à 10 W	Orchestre symphonique
Sous-marin silencieux	0,01 à 0,1 W	Aspirateur
Sous-marin très silencieux	0,1 à 1 mW	Conversation
Sous-marin très silencieux	0,001 à 0,01 mW	Chant d'oiseau

Tableau 2. — Analogies acoustiques.

Incidemment, il est aussi possible de remarquer qu'un gros SNLE pèse de l'ordre de 6 000 t, a environ 100 Mégawatts de puissance installée et ne rayonne que quelques microwatt. C'est une très mauvaise machine électroacoustique d'un rendement de l'ordre de 10^{-13} [2] !

3. Les récepteurs sonar

3.1. PRINCIPE

De manière schématique, une chaîne sonar se décompose suivant les éléments représentés sur la figure 2 [3] :

1) Des hydrophones rassemblés en une ou plusieurs antennes de réception, dont le but est d'obtenir une observation « traitable », en clair, de transformer une onde acoustique (mécanique) en signal électrique plus facilement traitable ; ce signal est alors analogique. A titre illustratif, la photo 1 représente un bâtiment de surface en train de mettre à l'eau un « poisson » blanc contenant une antenne d'émission, antenne que l'on veut sur la photo 2 où le dôme protecteur de l'antenne a été retiré. La photo 3 présente une antenne d'expérimentation située à l'avant d'un sous-marin, en cours d'installation et après pose du dôme protecteur.

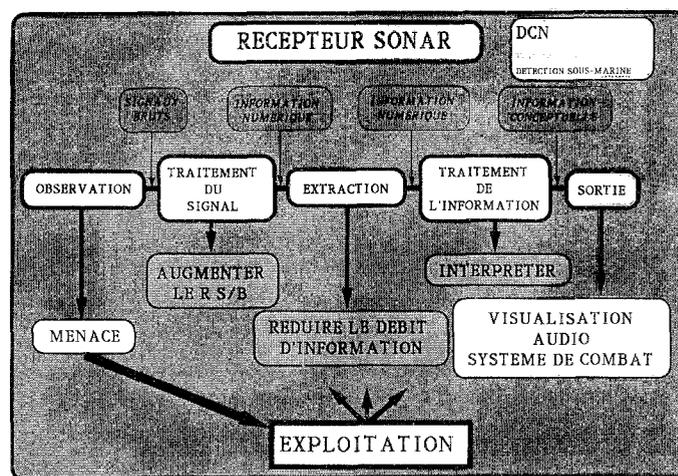


Figure 2. — Récepteur sonar : structure simplifiée.

2) Une étape de **traitement du signal** dont la partie amont consiste en un conditionnement du signal (contrôle automatique de gain, échantillonnage, quantification, démodulation, ...) et dont la partie aval a pour principal rôle l'augmentation du rapport signal-à-bruit (formation de voies, analyse spectrale en passif, filtre adapté en actif, ...); l'information délivrée est devenue numérique avec un débit de l'ordre du débit d'entrée ; les opérations effectuées peuvent être considérées comme linéaires et la quantité d'information en sortie est théoriquement égale à celle présente à l'entrée.

3) Une étape baptisée **extraction**, dont le principal objectif

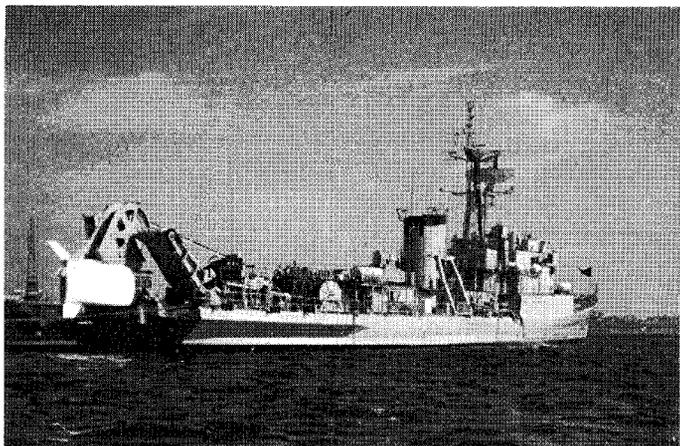


Photo 1. — Bâtiment de surface mettant à l'eau un poisson remorqué.

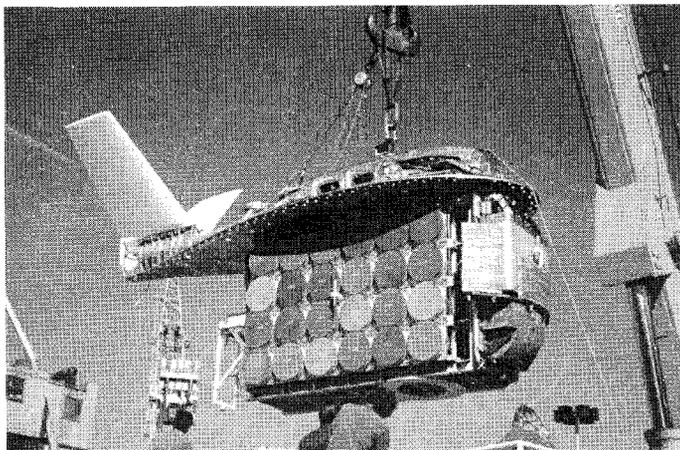


Photo 2. — Antenne d'émission dans un poisson « déshabillé ».

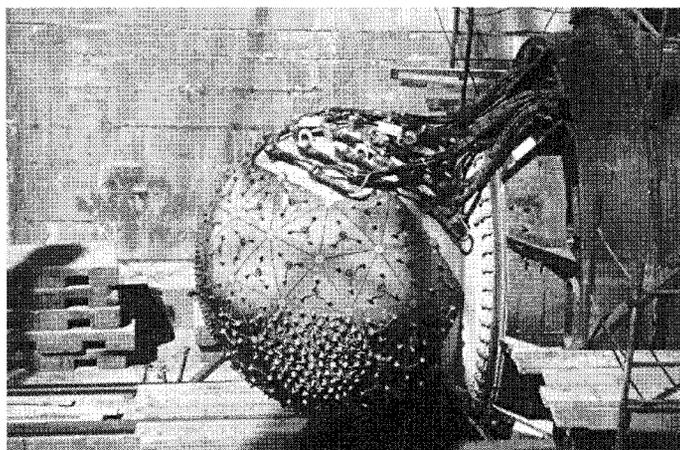


Photo 3. — Antenne passive de sous-marin.

est la réduction du débit d'information avant l'étape suivante, par décision de la présence ou de l'absence d'événements intéressants ; l'information en sortie est toujours sous forme numérique, mais le débit est plus faible qu'à l'entrée : la quantité d'information a été diminuée : on a perdu de l'information en supprimant des échantillons correspondant au bruit (ou en tout cas, supposés tels !).

4) Une étape de **traitement de l'information** qui consiste à fusionner et à interpréter les signaux numériques obtenus pour en donner une version conceptuelle ; l'information en sortie est alors conceptuelle et le débit d'information est fortement réduit ; c'est l'étape où s'élaborent les sorties du système de détection sous-marine (DSM) en terme de détection, localisation et classification ; il faut noter ici l'augmentation de l'importance des bases de données lors de cette étape.

5) Une étape de **sortie** du système de DSM, cette sortie pouvant être sous une forme audiophonique (sortie audio), une forme visuelle (consoles de visualisation) ou une forme de transmission d'information vers le système de combat.

3.2. EXEMPLE

Afin d'être un peu quantitatif, nous allons maintenant détailler un exemple récent de projet de petit système passif d'écoute très basse fréquence analysant les bruits rayonnés par les bâtiments avec une antenne linéaire formée de capteurs équirépartis. La photo 4 présente une telle antenne linéaire en cours de mise à l'eau, sur la plage arrière d'un bâtiment de surface. Nous supposons ici que cette antenne est, en fait, constituée de 2 sous-antennes :

— d'un tronçon d'écoute Très Basse Fréquence (ETBF) échantillonné à 3 840 Hz composé lui-même de cinq sous-antennes correspondant à 5 octaves :

- sous-antenne de gamme CD [640, 1 280 Hz], 144 hydros
- sous-antenne de gamme EF [320, 640 Hz], 144 hydros
- sous-antenne de gamme GH [160, 320 Hz], 144 hydros
- sous-antenne de gamme IJ [80, 160 Hz], 72 hydros
- sous-antenne de gamme KL [10, 80 Hz], 36 hydros

— d'un tronçon d'écoute Moyenne Fréquence (1-6 kHz) constitué de 48 hydrophones échantillonnés à 15 360 Hz.

Fonctionnalités

Les traitements à effectuer dans la version de base sont :

— Pour les chaînes ETBF (gammes CD, EF, GH, IJ, KL) :

- * filtrage d'octave (EF, GH, IJ, KL),
- * interpolation/formation de voies temporelles panoramiques,

* 1 loupe fréquentielle par octave, les traitements mis en œuvre pour former la loupe sont :

- . démodulation/filtrage
- . analyse spectrale par FFT
- . détection quadratique
- . intégration glissante
- . normalisation



Photo 4. — Mise à l'eau d'une antenne linéaire remorquée.

Dimensionnements

Afin de faciliter l'implantation de ces divers traitements et d'obtenir un bon critère de coût/performance, les traitements peuvent et doivent être découpés en trois ensembles :

- * le traitement de la gamme CD : mode TBF1,
- * le traitement des gammes EF, GH, IJ, KL : mode TBF2,
- * le traitement de la gamme MF : mode TBF3.

Le tableau 3 résume les puissances nécessaires à chaque mode. Les puissances seront toujours données en Mflops. On considérera un Mflop = un Mmulac = un million d'opérations du type multiplication-accumulation.

Puissance en Mflops	TBF1	TBF2	TBF3
Filtrage		41,7	
Formation de voie	93	48,9	108,5
Démodulation filtrage	10,2	8,3	
FFT	4,5	14,4	14,4
Post-traitements	14,3	37,9	37,5
Somme	122	151,2	160,4

Tableau 3. — Puissance nécessaire à chaque mode.

Les fonctions audio et analyse sur 8 hydrophones sont jugées non dimensionnantes. Les capacités pour la visualisation sont estimées à 5 Mips et à 5 Mpixels/s pour l'entretien des images.

La figure 4 présente les complexités (calcul, mémoire, débits) de ce système. La figure 5 illustre l'aspect compression d'information des différentes étapes d'un récepteur sonar en représentant, à l'échelle, l'évolution des débits le long de la chaîne de réception. Les quatre premières étapes

- * visualisation
 - . veille panoramique
 - . veille multi-lofar
 - . graphes amplitudes/fréquences
- * voie audio TBF.

— Pour la chaîne MF :

- * interpolation/formation de voies temporelles
- * analyse spectrale par FFT
- * détection quadratique
- * intégration glissante
- * normalisation
- * visualisation
 - . veille panoramique
 - . veille lofar
- * voie audio MF

— Pour 8 hydrophones choisis par l'opérateur :

- * analyse spectrale par FFT
- * détection quadratique
- * visualisation (graphe amplitudes/fréquences).

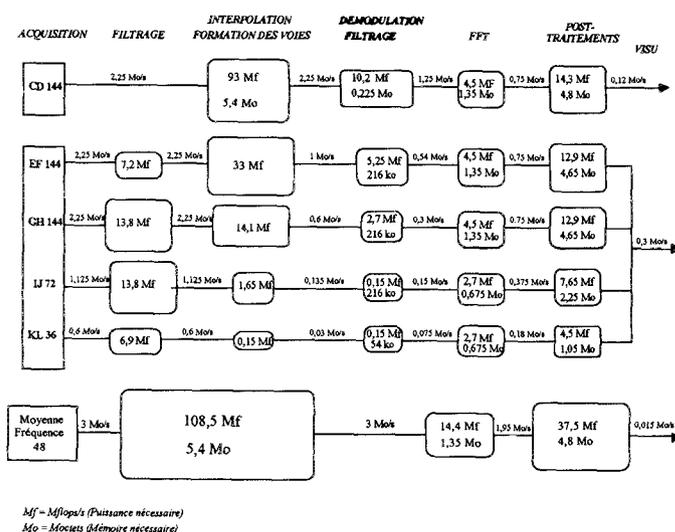


Figure 4. — Complexité d'un système ETBF.

correspondent au *traitement du signal* de la figure 2, les « post-traitements », à la partie *extraction*.

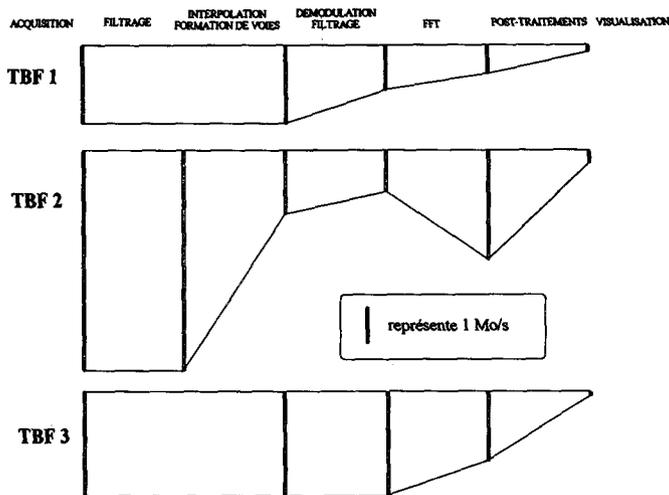


Figure 5. — Compression d'informations dans un système ETBF.

La charge de calcul la plus importante se situe, suivant les gammes, au niveau du filtrage et/ou de l'interpolation/formation de voies. Le débit diminue au cours des traitements (un sonar est une machine à comprimer l'information), sauf au niveau de la transformation de Fourier pour les basses fréquences. Ceci est dû au besoin d'une bonne finesse d'analyse en fréquence afin de classifier.

4. Tendances

4.1. TRAITEMENT DU SIGNAL

Nous avons vu que le but principal de l'étape de traitement du signal est l'augmentation du rapport signal-sur-bruit. Un autre objectif important qui doit être recherché est de faciliter l'interprétation (lors de l'étape que nous avons appelée traitement de l'information) c'est-à-dire tenter de mettre en évidence les caractéristiques souhaitables (pour l'interprétation) du signal présentes dans l'observation (présence de raies spectrales, présence d'un écho dans une direction précise, ...).

Les principaux problèmes proviennent ici de deux causes : le grand nombre de calculs à réaliser et la recherche d'algorithmes spécifiques.

Grand nombre de calcul

Comme dans tout domaine, la tendance des systèmes de DSM est d'améliorer les performances. Cette amélioration, en terme de détection pure, passe par une augmentation des gains (entre autres, au sens de l'équation du sonar). Cette

augmentation des gains peut être obtenue, par exemple, par une augmentation du nombre de capteurs. Une conséquence est l'augmentation du nombre des calculs. Par exemple, la formation des P voies à partir de N capteurs avec une fréquence f d'échantillonnage nécessite de l'ordre de $aNPf$ opérations, a étant un coefficient dépendant de l'algorithme utilisé. Avec les valeurs actuelles réalistes, des capacités de plusieurs centaines, voire milliers, de Mflops sont nécessaires pour un système complet de DSM.

Recherche d'algorithmes spécifiques

L'augmentation du nombre de capteurs passe par une augmentation des dimensions des antennes. Cette augmentation des dimensions conduit à la recherche de nouveaux algorithmes car les modifications ne sont pas seulement quantitatives mais aussi qualitatives. Par exemple, l'allongement d'une antenne linéaire fait qu'on peut être amené à travailler en champ proche et non plus seulement en champ lointain, d'où la mise au point d'algorithmes de focalisation.

4.2. EXTRACTION

De façon un peu provocante, nous pouvons dire que l'extraction est une étape qui ne devrait pas exister ! Son objectif principal est la réduction de la quantité de données que l'étape de traitement de l'information va traiter. L'extraction n'existe donc que à cause de limitations des algorithmes et des processeurs de traitement de l'information, algorithmes et processeurs dont les capacités de calculs sont insuffisantes pour pouvoir traiter toutes les données en sortie de traitement du signal.

Une des tendances actuelles des études sur l'extraction est de tenter de la supprimer.

Les voies possibles d'investigation sur l'extraction sont multiples. Citons en trois :

Augmenter les capacités de calculs

Si les capacités de calculs augmentent suffisamment, on peut penser qu'il ne sera plus nécessaire de diminuer le débit ni la quantité d'informations à l'entrée de l'étape de traitement de l'information.

Trouver de nouveaux algorithmes TS-TI

Au lieu de séparer les étapes de traitement du signal et de traitement de l'information, pourquoi ne pas chercher des algorithmes globaux ? Par exemple, on peut chercher à remplacer un traitement comprenant une formation de voies, une extraction puis des algorithmes de localisation passive du type TMA (*trajectographie par mesure d'azimuts* ou *target motion analysis*), par un algorithme de formation de voies focalisées, c'est-à-dire avec un échantillonnage non seulement angulaire, mais aussi en distance.

Trouver une théorie saine de l'extraction

A la limite, plutôt que d'utiliser les techniques empiriques actuelles pour réaliser l'étape d'extraction, souvent assez proches de « recettes de cuisine » (mais qui donnent des résultats !), il est possible d'envisager de modéliser l'extraction en utilisant des notions nouvelles comme la théorie de l'incertain, la logique floue, ...

4.3. TRAITEMENT DE L'INFORMATION

Le but du traitement de l'information dans un système sonar est l'interprétation de la partie informative des données numériques issues des sorties des antennes (hydrophones) pour satisfaire aux trois grandes fonctions d'un sonar :

existence ?	détection
quoi ?	classification
où ?	localisation

Hormis la mise au point (pour éventuelle prise en compte dans les matériels opérationnels) de nouveaux algorithmes ou de nouvelles méthodes de localisation et de classification dont sont remplies les revues nationales et internationales, la principale tendance est ici l'automatisation de certaines tâches.

La guerre sous-marine est une guerre lente, ce qui la différencie considérablement de la guerre au-dessus de la surface (et ce qui distingue le sonar du radar). La célérité du son dans l'eau étant d'environ 1 500 m/s, un écho en sonar actif peut arriver plusieurs dizaines de secondes après l'émission (une cible à 30 km donnera un écho au bout de 40 s). De plus les vitesses des mobiles sont, habituellement et pour fixer les idées, de l'ordre de 5 à 15 nœuds (10 à 30 km/h ou 2 à 8 m/s environ) et leurs distances de l'ordre de 10 à 100 nautiques (environ 15 à 150 km). Une action du type détection-pistage entre deux sous-marins peut ainsi durer plusieurs heures.

Si on exclut des cas particuliers d'alerte où les traitements se doivent d'être automatiques et rapides, avec seulement un droit de veto d'un opérateur humain (alerte torpille, interception, ...), l'automatisation en DSM est incomplète et limitée : elle doit plutôt être vue comme une aide à l'exploitation.

Une des philosophies d'automatisation applicables à la solution de certains problèmes du type détection-poursuite est de gérer automatiquement les bruiteurs forts (et, en général, peu menaçants), de façon à laisser l'opérateur se concentrer sur les bruiteurs de faible niveau ou furtifs. C'est une idée qui se rapproche de la recherche d'une *aiguille dans une botte de foin*.

4.4. EXPLOITATION

L'exploitation du système dont nous n'avons pas parlé jusqu'ici, consiste, d'une part à le gérer (ou le configurer) et d'autre part à l'utiliser pour obtenir ce que l'on veut.

Synthèse

Une des nouveautés en terme d'exploitation est l'apparition d'une nouvelle fonction du sonar : la **synthèse**. Les systèmes sonar sont de plus en plus complexes et mettent en œuvre plusieurs milliers de capteurs répartis en plusieurs antennes, traitent plusieurs types de signaux répartis sur plusieurs bandes de fréquences, mettent en jeu plusieurs types de traitements et sont prévus pour réaliser plusieurs fonctions. Une opération de synthèse est donc nécessaire.

Présentation et IHM

Aux problèmes précédents, on peut ajouter l'importance prise par les notions d'ergonomie (cognitive ou non),

d'interface homme-machine, ... Les problèmes correspondants sont aussi liés aux matériels utilisables (consoles de visualisation, ...) et à des questions sur l'utilisation ou non de techniques dérivées du traitement d'images, de la capacité laissée ou non à l'opérateur de choisir des traitements spécifiques, ... La photo 5 présente une console d'un système sonar en cours de test au CERDSM.



Photo 5. — Console de visualisation d'informations sonar.

Moyens de calculs

L'exploitation conduit aussi à se poser les problèmes de l'affectation des moyens de calcul disponibles en fonction de la mission du moment. Ceci conduit d'ailleurs à des problèmes d'architecture des récepteurs.

5. Architectures des récepteurs

5.1. CONTRAINTES

Un point important, voir fondamental, qui n'est pas encore apparu dans ce qui précède est l'ensemble des contraintes qu'on pourrait qualifier de « pratiques » qu'il est nécessaire de prendre en compte dès l'étape de conception initiale d'un récepteur sonar. La communauté des chercheurs en traitement du signal se doit d'être avertie de ces contraintes, ne serait-ce qu'afin d'éviter d'être déçu si une idée ou un algorithme ne passe pas suffisamment rapidement dans le « matériel ». Ces contraintes peuvent être classées comme provenant de 3 origines différentes : l'installation des récepteurs à bord d'un bâtiment aux caractéristiques particulières, leur exploitation et leur coût de possession.

Installation

Les systèmes sonar sont faits, en général, pour être embarqués. Leur installation et leur utilisation sur des bâtiments de surface et, a fortiori, sur des aéronefs ou des sous-marins posent des problèmes liés à la particularité des conditions de vie dans ces espaces confinés. La place à bord est limitée et poids et volume ne doivent pas être trop

importants, et ceci, non seulement pour les consoles de visualisation, dont je reparlerai, ou les baies d'électronique ou d'informatique, mais aussi pour les organes annexes tels les machines de réfrigération. Ces dernières ne doivent pas faire de bruit pour le confort de l'équipage et des opérateurs, bien sûr, mais surtout pour ne pas augmenter le bruit rayonné par le bâtiment : « calorie à dissiper » égal « bruit », ce qui est malsain, principalement sur un sous-marin dont le principal avantage est sa discrétion. Si le sous-marin est encore l'exemple étudié, son système sonar est, sauf en surface, son seul sens permettant d'appréhender le monde environnant en temps réel : l'ouïe d'un sous-marin existe, mais ni sa vue, ni son goût ou son odorat (si ce n'est le flair du commandant !). D'où l'extrême nécessité d'une fiabilité à toute épreuve et d'une maintenabilité particulière.

Exploitation

Au stade de l'avant projet, ce sont probablement aux contraintes liées à l'exploitation du sonar, ou des sonars, que l'on s'attache le plus. Un système de DSM rassemble, sur un même bâtiment, plusieurs sonars : c'est un véritable système d'armes (au sens noble du terme système, bien que ce ne soit pas une arme au sens agressif du terme ; il serait préférable de parler de système sensoriel !). Un système sonar moderne est multi-tout : multi-antennes, multi-gammes, multi-signaux, multi-fonctions, multi-traitements, ... Et on ne peut pas envisager de mettre un opérateur derrière chaque « fonctionnalité » élémentaire du style « détection des raies spectrales sur signaux issus de l'antenne linéaire dans la bande 160-320 Hz par transformation de Fourier ». Le millier d'opérateurs nécessaires à chaque instant serait vite dépassé. Et encore, ce chiffre serait à multiplier par trois (un bâtiment fonctionne 24 heures sur 24 selon le principe du « quart par tiers ») et chacun aurait encore une tâche panoramique. Si cette approche illustre un extrême, l'autre extrême s'obtient (en supposant qu'il y a toujours au moins une personne dans un sous-marin, qu'on baptiserait « Commandant » !) en remarquant qu'in fine, c'est le commandant qui prend les décisions : comment concevoir un système sonar « en temps partagé » : il a beaucoup d'autres tâches à accomplir. L'analogie avec un pilote de chasse et son radar est alors tentante mais celui-ci a, en plus, la vue et, surtout, une mission précise, des renseignements non moins précis et un environnement extrêmement mieux connu : la météorologie est en avance de 30 ans sur l'océanographie. Notons toutefois que cette seconde approche existe déjà : elle s'incarne dans les chaînes dites d'alerte (alerte torpille, alerte interception, ...) dont, très schématiquement, la sortie est simple (une lampe rouge et un klaxon) et peut être mono-utilisateur.

Coût de possession

Au stade de l'avant projet, ce sont probablement aux contraintes liées à l'exploitation du sonar, ou des sonars, que l'on s'attache le plus. Un système de DSM rassemble, sur un même bâtiment, plusieurs sonars : c'est un véritable système d'armes (au sens noble du terme système, bien que ce ne soit pas une arme au sens agressif du terme ; il serait préférable de parler de système sensoriel !). Un système sonar moderne est multi-tout : multi-antennes, multi-gam-

mes, multi-signaux, multi-fonctions, multi-traitements, ... Et on ne peut pas envisager de mettre un opérateur derrière chaque « fonctionnalité » élémentaire du style « détection des raies spectrales sur signaux issus de l'antenne linéaire dans la bande 160-320 Hz par transformation de Fourier ».

Le millier d'opérateurs nécessaires à chaque instant serait vite dépassé. Et encore, ce chiffre serait à multiplier par trois (un bâtiment fonctionne 24 heures sur 24 selon le principe du « quart par tiers ») et chacun aurait encore une tâche panoramique. Si cette approche illustre un extrême, l'autre extrême s'obtient (en supposant qu'il y a toujours au moins une personne dans un sous-marin, qu'on baptiserait « Commandant » !) en remarquant qu'in fine, c'est le commandant qui prend les décisions : comment concevoir un système sonar « en temps partagé » : il a beaucoup d'autres tâches à accomplir. L'analogie avec un pilote de chasse et son radar est alors tentante mais celui-ci a, en plus, la vue et, surtout, une mission précise, des renseignements non moins précis et un environnement extrêmement mieux connu : la météorologie est en avance de 30 ans sur l'océanographie. Notons toutefois que cette seconde approche existe déjà : elle s'incarne dans les chaînes dites d'alerte (alerte torpille, alerte interception, ...) dont, très schématiquement, la sortie est simple (une lampe rouge et un klaxon) et peut être mono-utilisateur.

Coût de possession

Après que l'étape d'avant-projet ait été franchie et que la DSM se soit vu attribuer de 3 à 6 opérateurs et la place au CO (Central Opérations) adéquate, la notion de coût commence à devenir contraignante et, avec elle, son chapelet de compromis. La « qualité » militerait pour l'utilisation, donc le développement de processeurs spécifiques conduisant à de la puissance bien adaptée aux besoins dans le minimum d'espace. Mais le coût en serait augmenté d'autant, non seulement par le surcoût induit par les développements spécifiques mais aussi par la difficulté de gérer la maintenance et les rechanges de beaucoup de processeurs différents. Une longue durée de vie pour le récepteur permettrait un « retour sur investissements » important mais les technologies électroniques et informatiques évoluent tellement vite que le coût de la maintenance devient prohibitif dès que le matériel a un certain âge.

5.2. SOLUTIONS

Le temps des formateurs de voies avec lignes à retard est révolu. Actuellement, un récepteur sonar est un gros logiciel tournant sur de nombreuses machines de traitement, de quelques types différents. Cette explosion de l'importance du logiciel est attestée par la courbe de la figure 6 qui représente l'évolution au fil des ans de la production annuelle de logiciel en « kilo instructions sources » chez Thomson-Sintra ASM. Ce développement est une aubaine pour les théoriciens du traitement du signal : après mise au point sur signaux simulés et validation sur signaux réels, un nouvel algorithme peut ainsi être implanté plus rapidement qu'avant dans le matériel. A condition que la structure choisie permette cette évolution du logiciel.

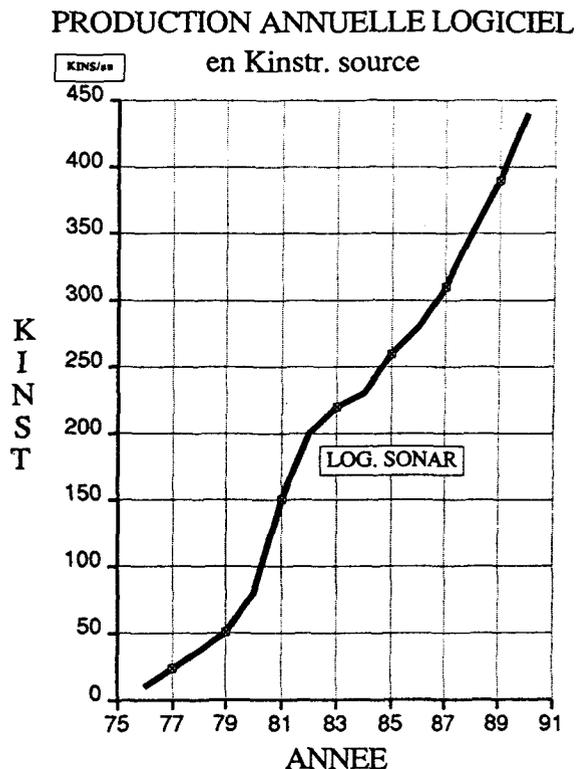


Figure 6. — Production annuelle de logiciel (source : Thomson-Sintra ASM).

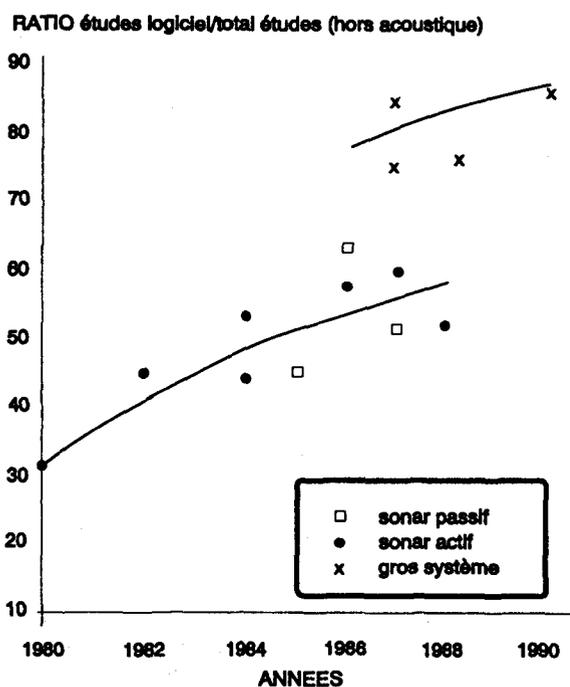


Figure 7. — Le logiciel dans les études (source : Thomson-Sintra ASM).

La figure 7, toujours issue de chez Thomson-Sintra ASM, illustre ce point. Cette figure représente le ratio entre les études logiciel et le total des études menées chez Thomson-Sintra ASM, hors études acoustiques, et ce, en fonction des années et pour un certain nombre de matériels. Les études restantes sont principalement liées aux machines informatiques.

De cette courbe, on peut tirer deux enseignements. Tout d'abord, on peut dire que le développement logiciel voit son importance croître dans les sonars, à l'image de la mutation informatique générale du monde moderne : le ratio de ces développements par rapport au total des études (hors acoustique) nécessaires à la conception et au développement de l'équipement est passé de 30 à 60 % en 10 ans pour les « petits » systèmes et il atteint près de 80 % pour les « gros » systèmes multisenseurs plus complexes. Ensuite, on s'aperçoit que la part du matériel spécifique (cartes électroniques dédiées) se restreint (standardisation) et que des machines informatiques programmables sont de plus en plus utilisées.

Car le second point important à noter pour notre propos, le premier étant l'importance du logiciel pour les récepteurs sonar, est la pression technologique du monde civil de l'électronique et de l'informatique.

Après avoir été mineur durant de nombreuses années, l'électronique militaire essaie maintenant de suivre les évolutions de l'électronique civile. Il n'est donc pas illogique que du matériel civil rentre de plus en plus dans la réalisation de systèmes sonar, par le « bout », en ce sens que les parties les moins spécifiques d'un récepteur sonar sont celles liées aux IHM et aux traitements des informations.

La partie traitement du signal reste l'étape la plus particulière. C'est pourquoi la société Thomson-Sintra ASM, comme d'autres (MS2I, Digilog, ...) développe ses propres « machines » de traitement du signal. L'évolution de celles-ci est illustrée sur la figure 8, du 16 bits fixe au 32 bits flottant en passant par le 32 bits fixe, où on peut aussi remarquer que la notion de gros système est une notion

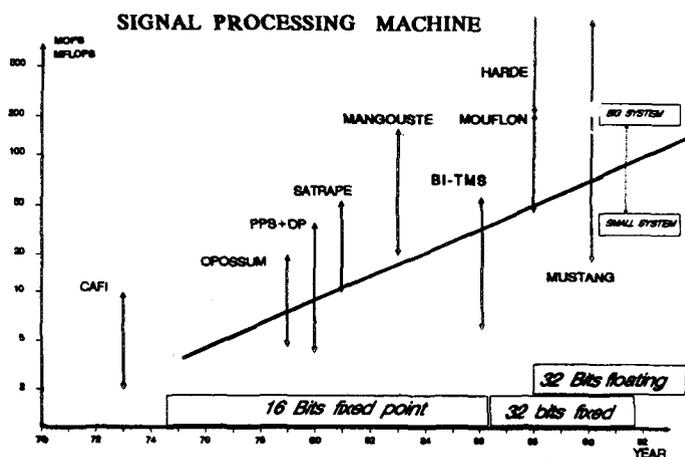


Figure 8. — Evolution des machines de traitement du signal (source : Thomson-Sintra ASM).

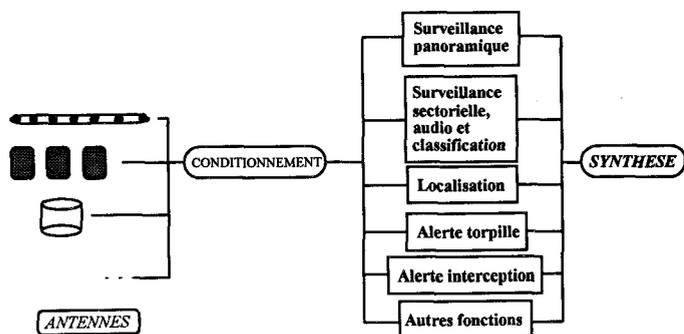


Figure 11. — Architecture orientée « fonctions ».

autres alertes (aéronefs, émissions sonar, ...), la synthèse des informations étant ensuite nécessaire, ne serait-ce que pour se rendre compte que c'est le même bruiteur qui a été détecté, classifié, localisé et qu'il vient de lancer une arme !

A une autre extrémité, l'architecture orientée « signaux » est illustrée sur la figure 12. Sans prendre en compte les différentes gammes de fréquence, conditionnant souvent les antennes, chaque chaîne de traitement travaille à analyser (toujours au sens détection, classification, localisation) un type de signal particulier : large bande, raies spectrales, transitoires, émissions sonar, tout ceci pour le mode passif ; et le mode actif en basse, moyenne et haute fréquences le cas échéant.

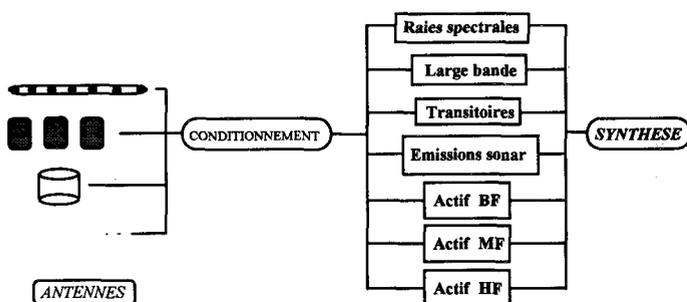


Figure 12. — Architecture orientée « signaux ».

Comme toujours, la « vérité » se situe souvent entre ces deux extrêmes. Le choix d'une architecture dépend du contexte : système entièrement nouveau ou complément à un système existant, missions particulières du bâtiment, contraintes spécifiques, coût limité, ... Ici aussi, la vie est faite de compromis.

6. Perspectives

Arrivé au terme de cet article dont le double but était pédagogique (quelles sont les spécificités de l'ASM et des

systèmes sonar ?) et « intéressé » (voici les problèmes qui se posent pour la conception des récepteurs sonar auxquels les chercheurs en théorie et traitement des signaux peuvent apporter des solutions), il est bon d'insister sur quelques points.

Les systèmes sonar sont conçus pour traiter la menace sous-marine. Cette menace évolue et les sonars doivent s'adapter à cette évolution. Leur conception est aidée par l'évolution des outils permettant d'apporter des solutions aux problèmes posés par l'évolution de la menace, que ces outils soient logiciels (amélioration des performances des algorithmes de traitement des signaux) ou matériels (augmentation des puissances, calculs, mémoire, débits, des machines de traitement des signaux, des données, des informations). L'architecture des récepteurs sonar doit permettre cette évolution tant matérielle que logicielle.

L'augmentation des performances des systèmes sonar, due aux progrès effectués tant « électronique » (dry end) qu'en acoustique (wet end), conduit à une augmentation du nombre d'informations à gérer. Cette complexification nécessite le développement d'aides à l'exploitation des systèmes sonar : il n'est pas question de remplacer les opérateurs mais de les aider à traiter le bruiteur faible caché sous un bruiteur fort, par exemple. Pensez à l'alouette et à l'avion... ou à l'aiguille et à la botte de foin ! C'est ici que l'usage des bases de données est amené à se développer.

La poussée technologique s'effectue du civil vers le militaire, surtout en ce qui concerne les étapes de traitement des données et des informations. Les concepteurs de récepteurs sonar se doivent d'effectuer une veille scientifique et technologique plus importante qu'avant pour suivre l'évolution tant des techniques prometteuses (fusion, neurones, ...) que des moyens de les appliquer (bus à haut débit, calculs distribués, méthodologie de développement logiciel, machines à structure « exotique », ...).

Enfin, après une époque où la technologie a fait d'énormes progrès, nous atteignons une ère où le dB technologique sera cher (probablement plus cher en traitement du signal qu'en exploitation ou en acoustique). Il est sûr que la connaissance de l'environnement, tactique mais surtout physique (océanographie), est très prometteuse et a été considérée récemment comme une priorité. En étant volontairement provocateur, on peut affirmer avec François-Régis Martin-Lauzer que « l'environnement intervient dans les grands programmes militaires quand les technologies s'essoufflent » [4]. Que le « dB environnement » soit moins cher que le « dB technologie » c'est probable. L'avenir dira quel est l'ordre de grandeur entre les deux. Mais que les traiteurs de signaux se rassurent. L'environnement est un champ d'applications pour eux que ce soit pour résoudre les problèmes liés à la tomographie acoustique océanique, assimiler les données d'altimétrie satellitale ou s'intéresser aux données d'océanographie physique notamment sous-échantillonnées et où on est à la limite de la connaissance non seulement des causes mais aussi des effets.

Manuscrit reçu le 9 septembre 1992.

Remerciements

L'auteur est reconnaissant au professeur Pierre-Yves Arquès pour une relecture attentive d'une version précédente du manuscrit. Il tient à remercier certains de ses collègues pour des discussions constructives et à leur rendre hommage : Benoît Raffine et Marc Di Martino du CERDSM et Laurent Kopp de Thomson-Sintra Activités Sous-Marines.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] E. CAILLIAU, « Les programmes civils d'océanographie pour la décennie 90 », *1^{er} colloque OSATES*, Brest.
- [2] F. LEFAUDEUX, « Les évolutions de la lutte anti-sous-marine », *Cols bleus*, n° 2096, 13/10/91.
- [3] M. BOUVET, *Traitements des signaux pour les systèmes sonar*, MASSON, 1992.
- [4] F. R. MARTIN-LAUZER, « Océanographie acoustique-Acoustique et environnement », *Actes des journées Science et Défense 1992*, Dunod, p. 68-92.