

Intégration dynamique en sonar passif : détection et localisation simultanées de sources faibles

Simultaneous Detection and Localization of Dim Targets in Passive Sonar

par Serge SITBON, Pierre BLANC-BENON

Thomson-Sintra ASM, BP. 157
06903 Sophia-Antipolis Cedex, France

résumé et mots clés

Cet article traite du cas des sources faibles en sonar passif de veille panoramique (≈ 0 dB en sortie de traitement conventionnel). Il part du principe que le premier seuil dans la chaîne de détection limite inéluctablement le niveau minimum des sources détectables et donc la capacité que l'on a, par la suite de les localiser et de les identifier acoustiquement. La démarche consiste donc à augmenter le temps d'intégration généralement court (quelques secondes en sonar passif) pour le faire passer à des valeurs de l'ordre de plusieurs dizaines de minutes. Mais on conçoit aisément que cette intégration longue ne peut se faire sans considération sur le mouvement des cibles : il faut intégrer tout en gardant la cible dans le lobe de directivité de l'antenne de réception. On développe donc une méthode d'intégration dynamique qui, en tenant compte du mouvement des sources lors de l'intégration, permet de simultanément les détecter et les trajectographier (i.e. estimer leur vecteur position et leur vecteur vitesse). Après un rappel des principes de traitement utilisés en sonar passif, on formalise la méthode d'intégration dynamique dans le cas d'une antenne passive observant une ou plusieurs sources se déplaçant en mouvement rectiligne et uniforme (MRU). Puis ses performances en estimation (précisions de localisation comparées à la borne de Cramer-Rao) sont établies sur simulation de type Monte-Carlo. Enfin, l'utilisation de signaux enregistrés en mer permet de valider cette méthode d'intégration dynamique par la détection et la trajectographie d'une source non détectable par les moyens classiques, et donc a fortiori non localisable.

Sonar, Détection, Trajectographie, Traitement d'antenne.

abstract and key words

This paper addresses the problem of low SNR targets. The key idea to detect and localize such dim targets is to increase the integration time. But, for conventional surveillance sonars, integration is limited to a few ten seconds due to the target motion: to over-integrate without compensating for the source motion degrades the detection performance. So, the solution is to take into account the source motion into the detection process, thus yielding an estimation of the target motion parameters. This method called "long-term integration" is described and validated for a narrowband source. Monte-Carlo simulations show a good agreement between computed Cramer-Rao bounds and estimated standard deviations related to the source motion parameters for 0 to 6 dB SNR's. Finally at-sea signals demonstrate an actual improvement of long-term integration method over conventional detection and tracking for a low level narrowband source.

Sonar, Detection, Target motion analysis, Array processing.

1. position du problème

D'une manière classique en acoustique sous-marine, un sonar passif de veille assure sa mission de surveillance panoramique en séquençant les trois fonctions principales suivantes :

– la Détection, ou comment au moyen d'une antenne de réception tirer le meilleur parti des signaux disponibles en sortie hydrophonique pour décider, sur un critère le plus souvent énergétique, entre les deux hypothèses : il y a un signal (hypothèse H_1) et donc une source de bruit (navire, ...), ou il n'y a que du bruit (hypothèse H_0); le résultat en est une estimation du rapport signal à bruit court-terme dans une bande de fréquences et pour un mail-

lage géographique donné (le plus souvent angulaire en gisement),

- la Poursuite, c'est-à-dire la nécessaire étape d'association de ces détections instantanées au cours du temps, de récurrence en récurrence, pour former ce que l'on appelle des pistes,
- la Trajectographie, ou étape d'estimation au sens statistique pour, étant donné un lot de mesures (des angles, fréquences, retards, ...), calculer la meilleure trajectoire possible pour chaque piste détectée; le but ultime de tout sonar, outre l'identification acoustique des contacts (i.e. jusqu'à la reconnaissance effective du type de bâtiment), étant bien sûr la localisation des contacts environnant le bâtiment porteur de l'antenne sonar, aussi bien en position qu'en vitesse.

2. rappel sur les traitements conventionnels

Un sonar passif peut se concevoir comme un appareil de mesure, mais qui à la différence du sonar actif ne mesure pas de manière directe la distance de toute source se trouvant dans son champ de détection.

La principale grandeur accessible est une mesure de gisement de la source par rapport à une référence qui est le cap du bâtiment porteur.

2.1. détection primaire et estimation des mesures

Considérons une antenne linéaire de K capteurs équidistants qui délivre dans le domaine spectral les signaux hydrophoniques $X = \text{col}_{k=1}^K \{x_k\}$ à la fréquence f (obtenus après une transformée de Fourier sur une durée courte qui correspond à la durée d'une récurrence). La formation de voies dans le domaine fréquentiel consiste en une sommation de ces signaux après remise en phase moyennant une hypothèse *a priori* sur la forme de l'onde sonore reçue. Dans le cas présent, la distance source-observateur est suffisamment grande pour se placer dans une hypothèse d'onde plane. Si on désigne par h le filtre spatial bande étroite de formation de voies, et X le vecteur colonne rassemblant les K coefficients spectraux à la fréquence f obtenus par FFT, on a le signal complexe suivant en sortie de formation de voies, pour une voie quelconque en θ à la fréquence f :

$$u(\theta, f) = h^+(\theta, f)X(f) \quad (1)$$

où $h(\theta, f) = \frac{d(\theta, f)}{\|d(\theta, f)\|^2}$ le filtre spatial, $d(\theta, f) = \text{col}_{k=1}^K \{w_k \exp(-2j\pi f \tau_k(\theta))\}$ le vecteur source, $\tau_k(\theta)$ étant le retard de formation de voie à appliquer au capteur k pour le remettre en phase par rapport à une référence commune (le 1^{er} capteur par exemple

si l'il s'agit d'une antenne linéaire), et w_k désignant le coefficient de pondération spatiale à appliquer pour satisfaire un gabarit de directivité donné en termes de niveau de lobes secondaires et d'élargissement du lobe principal à 3 dB.

La sortie de voie conventionnelle est donc une fonction non linéaire qui échantillonne le gisement θ pour la fréquence f . En passant en énergie par prise du module carré, on a donc accès moyennant certains traitements d'intégration, de normalisation, de détection et d'interpolation à une estimation du gisement de toute source de niveau suffisant (i.e. supérieur au seuil de détection η). Schématiquement ces traitements sont les suivants :

- intégration : c'est une sommation de l'énergie à gisement constant (ou à azimut constant si les voies sont stabilisées par rapport aux mouvements de la plateforme), donc sur un horizon temporel T relativement court et en tout cas limité par le défilement maximum d'une source dans le lobe de directivité; l'intégration peut se faire également en fréquence, la combinaison des deux donnant idéalement un gain en \sqrt{WT} si le bruit est blanc dans la bande W et les récurrences indépendantes,

- normalisation : elle consiste à estimer la moyenne m et l'écart-type σ de l'énergie du bruit en fonction du gisement, plusieurs méthodes plus ou moins coûteuses existent [1],

- détection : l'expression du détecteur sur énergie nécessite le calcul d'un rapport de deux vraisemblances $\text{Prob}(|u|^2 > \eta/H_1)$ et $\text{Prob}(|u|^2 > \eta/H_0)$, qui sous hypothèse de bruit gaussien et centré (d'où la nécessité de la phase de normalisation précédente)

peut se ramener à la simple expression suivante $\frac{|u|^2 - m}{\sigma} > \eta$

- interpolation : à partir du gisement échantillonné donnant localement le maximum d'énergie supérieur au seuil, on calcule par interpolation une estimation plus précise de ce gisement.

Ces quatre étapes permettent ainsi de mesurer à chaque récurrence sonar, par exemple les gisements des sources environnantes, mais également les sites (si l'antenne a une ouverture verticale suffisante), ou tout autre paramètre intervenant dans la modélisation du vecteur source d servant dans le filtre spatial (sous réserve bien sûr d'une fonction d'ambiguïté associée acceptable).

2.2. poursuite et association de détections élémentaires en pistes

La donnée à chaque instant de mesures de gisement ne permet pas de localiser chaque source instantanément [2]. Après l'étape de détection intervient donc une étape d'association temporelle afin de doter chaque source d'un historique de mesures de gisement. Ces mesures de gisement sont par ailleurs converties en mesures d'azimut (i.e. la référence angulaire n'est plus le cap du bâtiment porteur mais le Nord) par une opération de stabilisation qui permet de s'affranchir des mouvements de la plateforme de mesure.

De nombreux algorithmes existent [3] pour traiter ce problème délicat d'association de détections élémentaires en pistes, compte tenu d'un certain taux de fausses alarmes inévitable suite à la détection primaire.

2.3. trajectographie

Cette dernière fonction est un estimateur non-linéaire qui permet à partir d'une piste d'azimuts précédemment constituée de calculer la meilleure trajectoire MRU au sens d'un critère des moindres carrés [2]. Différentes solutions algorithmiques sont possibles selon la nature des mesures dont on dispose (des azimuts seuls, des azimuts et des fréquences dopplérisées, ...) : les estimateurs de type batch semblent le mieux adaptés au cas « azimut seul », mais des versions étendues du filtre de Kalman (par linéarisation et le choix de repères *ad hoc*) peuvent donner dans certains cas des résultats aussi satisfaisants [4].

3. la méthode d'intégration dynamique

Il est apparu clairement que la performance de détection/localisation est conditionnée par le gain d'intégration initial en sortie de formation de voie. Augmenter ce temps d'intégration ne peut se faire de manière significative que si l'on tient compte du mouvement de la source dans le lobe de directivité du traitement, sinon l'intégration à azimut constant dégrade l'index de détection [5].

Aussi plutôt que de procéder à une intégration court-terme sur des voies modélisées en gisement, la méthode d'intégration dynamique ou intégration longue [6], [7], [8] intègre sur des voies paramétrées directement en position et vitesse de la source.

3.1. cas monosource

L'objectif poursuivi consiste donc à introduire un modèle de mouvement de la source dans le traitement de formation de voies afin d'accroître la profondeur de l'intégration. Pour ce faire, il existe plusieurs choix possibles en fonction de la durée d'intégration souhaitée. En effet, plus le modèle est proche de l'évolution réelle de la source, et plus la durée maximale pourra être importante (lorsque le modèle est exact, il n'existe pas de limite de cet ordre [8]). La première solution envisageable consiste à prendre en compte un modèle d'évolution linéaire du gisement de la source [5]. Cette approximation est localement valide puisque la variation de l'azimut d'une source en MRU correspond à une fonction arctangente comme décrite ci-dessous par l'équation (2) :

$$\beta(t) = \arctan \left(\frac{x_S(t) - x_0(t)}{y_S(t) - y_0(t)} \right) \quad (2)$$

avec : $x_S(t)$, $y_S(t)$: position de la source à l'instant t dans le plan (x, y) ,

$x_0(t)$, $y_0(t)$: position de l'observateur à l'instant t dans le plan (x, y) ,

$\beta(t)$: azimut de la source relevé par l'observateur.

On a cherché ici à caractériser le mouvement des sources plutôt que celui de la mesure de gisement afin de disposer d'un modèle plus précis. Sous l'hypothèse d'une source en MRU, celle-ci est complètement définie par la connaissance de ses positions dans le plan cartésien (x, y) à un instant de référence t_{ref} et des vitesses suivant chacune des coordonnées (v_x, v_y) :

$$x_S(t) = x_S(t_{ref}) + (t - t_{ref})v_{xS} \quad (3)$$

$$y_S(t) = y_S(t_{ref}) + (t - t_{ref})v_{yS} \quad (4)$$

Le vecteur d'état descriptif du mouvement est donc : $\mathbf{x} = (x_S(t_{ref}), y_S(t_{ref}), v_{xS}, v_{yS})'$. Lorsque l'on s'intéresse à la détection d'une source à bande étroite (BE), c'est-à-dire qui émet de l'énergie sous forme de raies spectrales fines, les fréquences émises correspondantes doivent être incluses dans le vecteur d'état. Nous nous restreignons ici au cas décrit par l'état suivant :

$$\mathbf{x} = (x_S(t_{ref}), y_S(t_{ref}), v_{xS}, v_{yS}, f_0)' \quad (5)$$

c'est-à-dire que la source est caractérisée par une fréquence unique de valeur f_0 . Cette fréquence est supposée constante à l'émission pendant la durée d'analyse.

L'énergie en sortie de formation de voies correspondant à une hypothèse MRU s'écrit alors pour un instant quelconque :

$$|u(\mathbf{x})|^2 = |h^+(\mathbf{x})X(f(\mathbf{x}))|^2 \quad (6)$$

où

$$h(\mathbf{x}) = \frac{d(\mathbf{x})}{\|d(\mathbf{x})\|^2} \quad (7)$$

$$d(\mathbf{x}) = \text{col}_{k=1}^K \{w_k \exp - 2j\pi f(\mathbf{x})\tau_k(\mathbf{x})\} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tau_k(\mathbf{x}) &= (k-1) \frac{\delta}{c} \cos \theta_k \\ &= (k-1) \frac{\delta}{c} \cos \left(\arctan \frac{x_S - x_0}{y_S - y_0} - \alpha_0 \right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$f(\mathbf{x}) = f_0 \left(1 - \frac{(v_{xS} - v_{x0}) \sin \beta + (v_{yS} - v_{y0}) \cos \beta}{c} \right) \quad (10)$$

où α_0 représente le cap de l'observateur, δ l'espacement inter-captteurs, et c la célérité du son supposée constante.

Accroître la durée d'intégration sur une durée $T_{int} = NT$ (correspondant à N récurrences indépendantes de durée élémentaire T) consiste à former le traitement suivant :

$$z_n(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^N |h^+(\mathbf{x}, n)X(f(\mathbf{x}, n), n)|^2 \quad (11)$$

En supposant que le gisement $\theta(\mathbf{x}, n)$ et la fréquence $f(\mathbf{x}, n)$ sont stables pour un \mathbf{x} donné pendant la durée de la FFT mais variable d'une FFT à l'autre selon le modèle \mathbf{x} , on approxime z_N par :

$$z_N(\mathbf{x}) \approx \sum_{n=1}^N |u(\theta(\mathbf{x}, n), f(\mathbf{x}, n), n)|^2 \quad (12)$$

où : $\theta(\mathbf{x}, n)$: gisement de la source \mathbf{x} à la récurrence n

$f(\mathbf{x}, n)$: fréquence de la source \mathbf{x} à la récurrence n

$u(\theta, f, n)$: voie complexe dans le gisement θ à la fréquence f , formée sur une durée T à la récurrence n pour un échantillonnage en gisement fixé *a priori*.

Dans le contexte monosource et sous l'hypothèse d'un bruit gaussien et spatialement décorrélé, le maximum de la fonction $z_N(\mathbf{x})$ correspond à l'estimateur du maximum de vraisemblance de l'état \mathbf{x} [10].

Test de détection

Un test d'hypothèses [11] est défini d'une façon équivalente à celui mis en œuvre en sortie d'une formation de voies conventionnelle en gisement. Il s'agit de calculer le rapport des vraisemblances des mesures sous les hypothèses source présente (H_1) et source absente (H_0) :

$$\Lambda(\mathcal{M}) = -2 \ln \frac{\text{Prob}[\mathcal{M}/H_1]}{\text{Prob}[\mathcal{M}/H_0]} \quad (13)$$

qui s'écrit dans le cas du traitement d'antenne :

$$\Lambda(\mathcal{M}) = a z_N(\mathbf{x}) \quad (14)$$

où \mathcal{M} est constitué de l'ensemble des mesures, c'est-à-dire des signaux sur les K capteurs pendant toute la durée d'intégration NT , a étant une constante de normalisation.

L'état \mathbf{x} de la source étant inconnu, on construit le test en maximisant $\Lambda(\mathcal{M})$ selon \mathbf{x} (rapport de vraisemblance généralisé) et en comparant cette valeur à un seuil :

$$\Lambda_g(\mathcal{M}) = \max_{\mathbf{x}} (z_N(\mathbf{x})) \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \xi \quad (15)$$

Lorsque les signaux sont indépendants entre récurrences, le gain en S/B du détecteur ainsi défini est \sqrt{WNT} ce qui revient à dire qu'un gain en \sqrt{N} a été obtenu par rapport à la formation de voies conventionnelle (1).

3.2. cas multisources

Dans le cas où plusieurs sources sont présentes dans le champ d'observation, la fonction $z_N(\mathbf{x})$ comporte plusieurs maximums relatifs à chacune des sources. Le test de détection consiste alors à chercher tous les maximums locaux de la fonction $z_N(\mathbf{x})$ et à comparer leur valeur à un seuil. Opérationnellement, c'est la seule façon d'exploiter cette méthode de détection puisque le cas monosource ne représente pas la réalité du problème.

Précisons tout d'abord les lois de probabilité de $z_N(\mathbf{x})$ sous H_0 et H_1 afin de fixer le seuil de détection à partir d'une probabilité de fausse alarme choisie *a priori*. Sous les hypothèses définies précédemment sur la nature du bruit, la loi de $z_N(\mathbf{x})$ est, à un facteur de normalisation près, un χ^2 à $2N$ degrés de liberté :

centrée sous H_0 : $z_N(\mathbf{x}) \rightarrow \chi_{2N}^2$
 décentrée sous H_1 : $z_N(\mathbf{x}) \rightarrow \chi_{2N}^2(\lambda)$ (16)

avec :

$$\lambda = N \left(\frac{S}{B}\right)_c g(f_0), \text{ paramètre de décentrement sous } H_1$$

$\left(\frac{S}{B}\right)_c$ = le rapport signal à bruit de la raie pris au niveau des capteurs de l'antenne

$g(f_0)$ = le gain de l'antenne à la fréquence f_0

$$N = \text{le nombre de récurrences intégrées pendant } T_{\text{int}} \quad (17)$$

Les caractéristiques du bruit doivent être estimées au moyen d'une méthode de normalisation comme celles décrites en [1]. D'autre part, dans les chaînes de traitement sonar, les valeurs de N sont couramment supérieures à 30 dès que la durée d'intégration T_{int} est de l'ordre de quelques minutes. On a donc utilisé des approximations gaussiennes de la loi de $z_N(\mathbf{x})$.

4. performances en estimation

4.1. bornes de Cramer-Rao

La matrice d'information de Fisher de l'estimateur par intégration dynamique sur N récurrences indépendantes s'écrit dans le cas d'une source BE décrite par le vecteur \mathbf{x} :

$$F_{ij} = \sum_{n=1}^N F_{ij}(n) \quad (18)$$

où :

$$F_{ij}(n) = E \left\{ \frac{\partial \ln \text{Prob}[\mathcal{M}(n)/\mathbf{x}]}{\partial x_i} \frac{\partial \ln \text{Prob}[\mathcal{M}(n)/\mathbf{x}]}{\partial x_j} \right\}$$

$\mathcal{M}(n)$ = les signaux sur les capteurs pendant la récurrence n

$$\mathbf{x} \stackrel{\text{def}}{=} \{x_i\}_{i=1,5}$$

Sous l'hypothèse où l'amplitude des signaux est indépendante de la distance, les deux paramètres caractéristiques de l'état de la source à un instant donné sont l'azimut $\beta(\mathbf{x}, n)$ et la fréquence $f(\mathbf{x}, n)$ comme en trajectographie passive [13]. En développant le terme $F_{ij}(n)$ on aboutit à :

$$F_{ij}(n) = \sigma_{\beta(\mathbf{x},n)}^{-2} \frac{\partial \beta(\mathbf{x},n)}{\partial x_i} \frac{\partial \beta(\mathbf{x},n)}{\partial x_j} + \sigma_{f(\mathbf{x},n)}^{-2} \frac{\partial f(\mathbf{x},n)}{\partial x_i} \frac{\partial f(\mathbf{x},n)}{\partial x_j} + 2\rho \left(\frac{\partial \beta(\mathbf{x},n)}{\partial x_i} \frac{\partial f(\mathbf{x},n)}{\partial x_j} + \frac{\partial f(\mathbf{x},n)}{\partial x_i} \frac{\partial \beta(\mathbf{x},n)}{\partial x_j} \right) \quad (19)$$

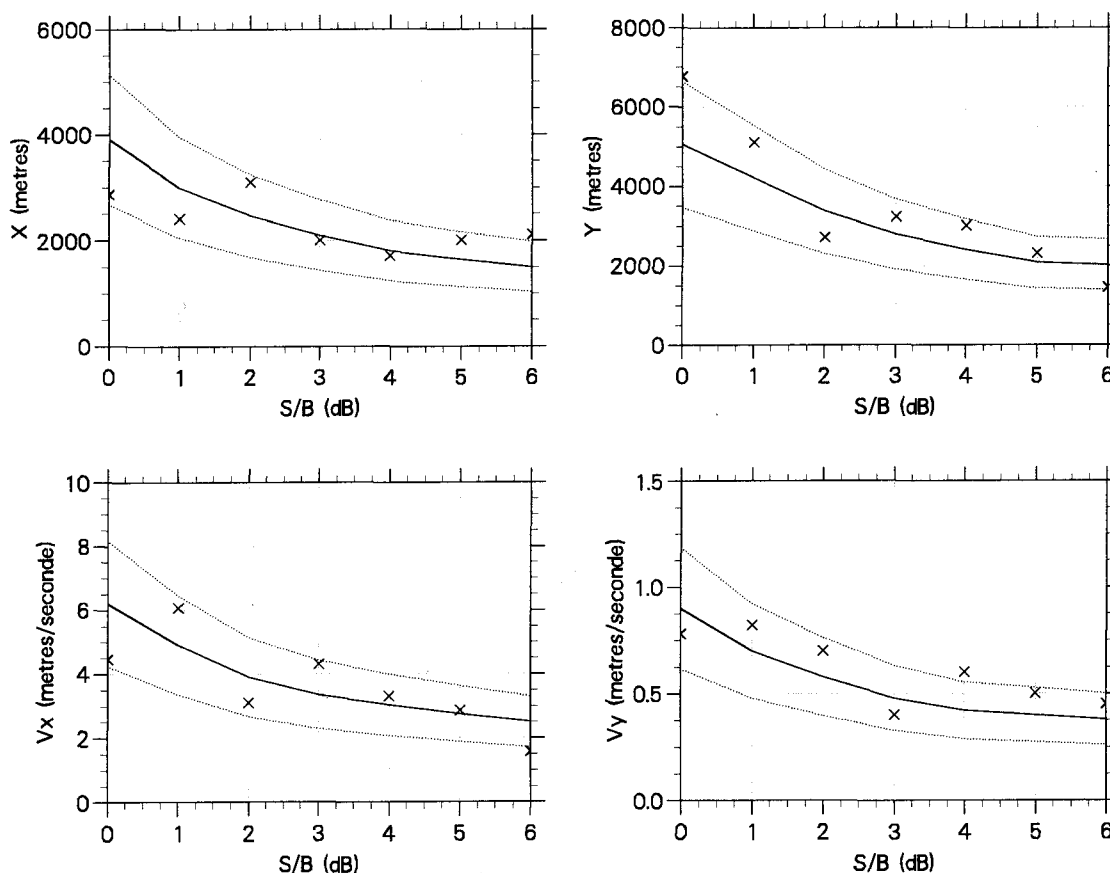


Figure 1. – Comparaison écart-types empiriques (x) - borne de Cramer-Rao (—), avec intervalle de confiance (---) à 2σ .

avec :

$$\begin{aligned} \sigma_{\beta(\mathbf{x},n)}^{-2} &= E \left[\left(\frac{\partial \ln \text{Prob}[\mathcal{M}(n)/\mathbf{x}]}{\partial \beta(\mathbf{x},n)} \right)^2 \right] \\ \sigma_{f(\mathbf{x},n)}^{-2} &= E \left[\left(\frac{\partial \ln \text{Prob}[\mathcal{M}(n)/\mathbf{x}]}{\partial f(\mathbf{x},n)} \right)^2 \right] \\ \rho &= E \left[\left(\frac{\partial \ln \text{Prob}[\mathcal{M}(n)/\mathbf{x}]}{\partial \beta(\mathbf{x},n)} \right) \left(\frac{\partial \ln \text{Prob}[\mathcal{M}(n)/\mathbf{x}]}{\partial f(\mathbf{x},n)} \right) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

Les termes $\sigma_{\beta(\mathbf{x},n)}^2$ et $\sigma_{f(\mathbf{x},n)}^2$ représentent respectivement les variances en azimut et en fréquence à la récurrence courante, que l'on sait calculer [12] à partir d'une estimation du rapport signal à bruit S/B. Le facteur ρ correspond au terme croisé d'une matrice de Fisher pour l'estimation des paramètres $\beta(n)$ et $f(n)$ via les observations $\mathcal{M}(n)$. On suppose ici que l'estimation du gisement de la source est décorrélée de celle de sa fréquence.

L'expression (19) est similaire à celle que l'on obtient en trajectographie passive [13] à la différence qu'on exploite ici l'infor-

mation contenue pendant toute la durée de l'intégration et pas seulement celle relative aux détections élémentaires.

4.2. simulation de Monte-Carlo

Les performances en estimation de la méthode d'intégration longue ont été vérifiées au moyen de simulations de Monte-Carlo sur une source BE. Le scénario est le suivant : l'observateur est fixe en (0,0) et la source se trouve au point de coordonnées $(x, y) = (-6, 8)$ km, elle évolue à la vitesse de 7.5 m/s pour un cap de 90 degrés. La durée d'intégration totale T_{int} est de 15 minutes pour une durée d'intégration élémentaire T de 5.12 secondes. L'estimation du maximum de la fonction $z_N(\mathbf{x})$ est réalisée grâce à un algorithme d'optimisation d'une bibliothèque mathématique [14] exploitant soit les polytopes (méthode du simplexe) soit le gradient et le Hessien analytique de $z_N(\mathbf{x})$ dont on trouve le développement dans [7]. Les deux méthodes donnent les mêmes performances. La figure 1 présente les écart-types théoriques (bornes de Cramer-Rao) et empiriques, estimés sur les quatre premières composantes du vecteur \mathbf{x} (la fréquence n'est pas représentée) obtenus au moyen de 20 tirages de bruit indépendants pour des S/B compris entre 0 et 6 dB en sortie de formation de voies court-terme. L'intervalle de confiance à 2σ

sur ces précisions empiriques est également représenté en trait pointillé, autour de l'écart-type théorique. On constate la bonne adéquation entre écart-types estimés et théoriques, quelle que soit la valeur du rapport signal à bruit.

5. résultats expérimentaux

5.1. le contexte opérationnel

Les comportements des deux méthodes : extraction / trajectographie conventionnelle et intégration dynamique, ont été analysés sur des signaux enregistrés en mer. Le scénario de l'expérimentation est décrit sur la figure 5. Le bâtiment concours est détecté par le travers pendant la durée d'analyse qui atteint 30 minutes. Sa vitesse réelle est de 5 nœuds pour un cap de 90 degrés. Les détections en sortie d'un traitement de formation de voies classiques (faible durée d'intégration, quelques seconde sont représentées sur la figure 2 dans le plan gisement-temps. La figure 3 contient les détections dans le plan fréquence-temps pour un secteur angulaire de 4 degrés centré autour du gisement de la source au cours du temps, ceci afin de décrire son contenu spectral dans la bande qui nous intéresse. On distingue principalement quatre fréquences reçues dont deux de niveau assez élevé sur la gauche de l'image.

5.2. détection/poursuite conventionnelle et trajectographie

Un algorithme d'association temporelle panoramique en gisement et en fréquence [15] a été appliqué aux données de la figure 2. Les pistes temporelles détectées en sortie de ce traitement sont représentées sur la figure 4 pour le bâtiment concours. On constate une assez bonne détection des quatre raies spectrales citées précédemment. Cependant, du fait de la variation temporelle des niveaux d'énergie de chaque raie, ces pistes s'interrompent. Les conditions de propagation dans le milieu justifient ces variations d'énergie, notamment les interférences entre les trajets multiples [16]. Les trois segments de mesures issues de la raie spectrale (notée f_1) située la plus à gauche de la figure 3, ont été associées et exploitées par un algorithme de trajectographie batch [13].

Les positions estimées dans le plan cartésien par cette méthode sont représentées par un marqueur circulaire sur la figure 5, à la cadence d'une estimation toutes les 5 mn pendant 25 mn (soit 5 estimations, le numéro superposé décrit celui de l'estimation). Chacun des tirets tracé de façon perpendiculaire sur les trajectoires de l'observateur et de la source représente les positions respectives des deux bâtiments aux instants d'estimation correspondant. La trajectographie classique converge à partir de 15 mn seulement (les deux premières estimations ne sont pas valides). Les écarts entre valeurs vraies et estimées en distance, azimut, vitesse et cap

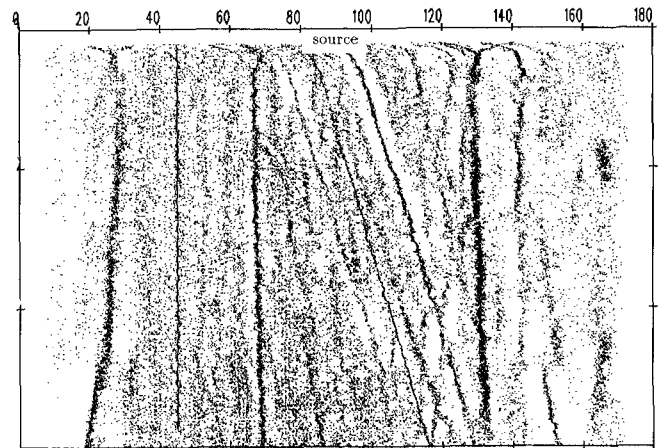


Figure 2. – Détections en gisement au cours du temps sur l'horizon d'observation.

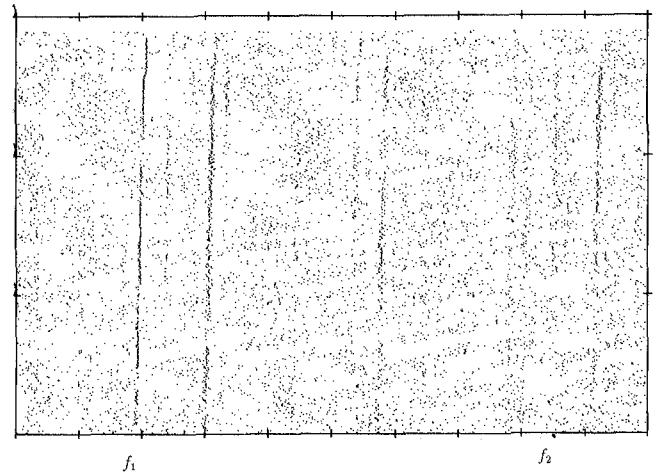


Figure 3. – Détections en fréquence au cours du temps dans une zone de 4 degrés autour des gisements détectés de la source.

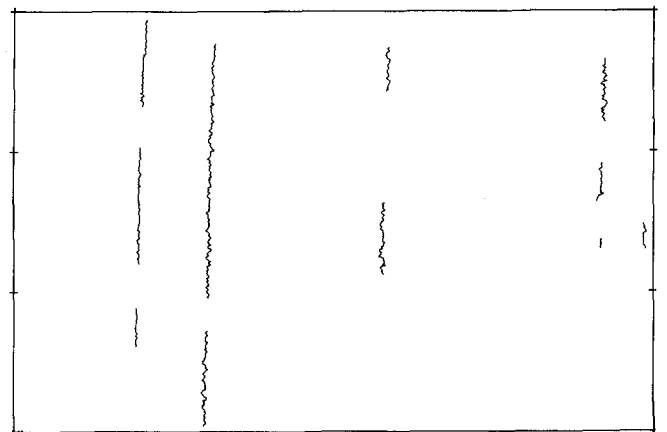


Figure 4. – Pistes relatives à la source, détectées par la méthode d'association temporelle dans le plan fréquence \times temps.

de la source sont tracés sur la figure 7. On constate notamment l'amélioration de la vitesse estimée au cours du temps.

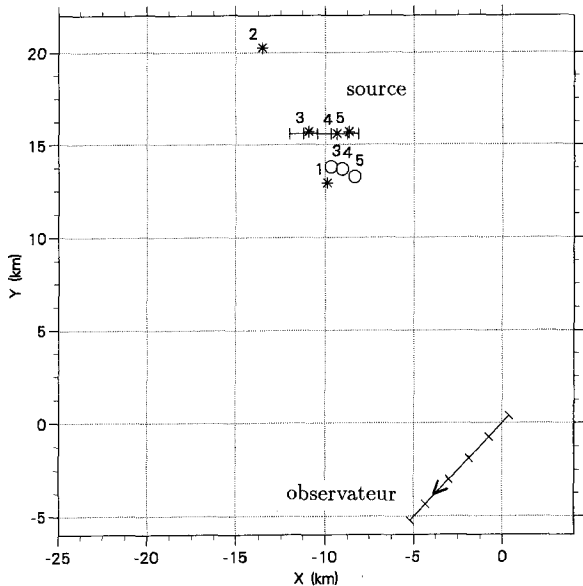


Figure 5. – Positions vraies des bâtiments concours et observateur dans le plan (x, y) et résultats d'estimation par les deux méthodes sur la raie spectrale f_1 : (o) : positions estimées par la trajectographie sur azimuth-fréquence classique. (*) : positions estimées par la méthode d'intégration dynamique.

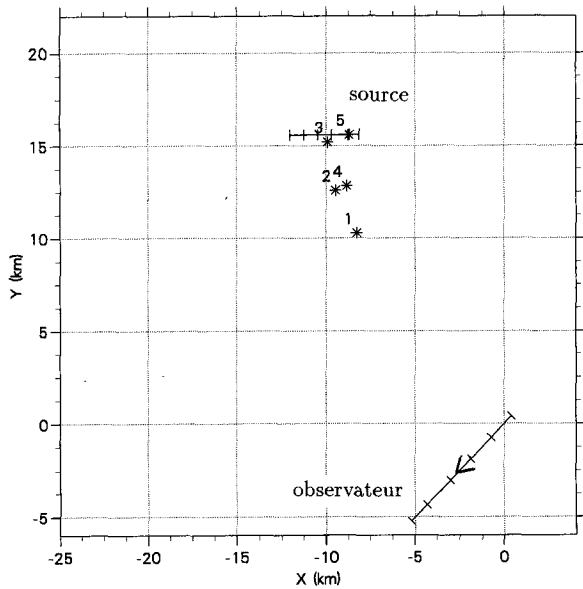


Figure 6. – Idem que Fig. 5. mais pour la raie spectrale f_2 .

5.3. intégration dynamique

La méthode d'intégration dynamique a été employée dans un secteur en (position × vitesse) défini ainsi

$$x_S \in [-30\,000, 0] \text{ mètres}$$

$$y_S \in [2\,000, 30\,000] \text{ mètres}$$

$$v_{xS} \in [-10, 10] \text{ mètres/seconde}$$

$$v_{yS} \in [-10, 10] \text{ mètres/seconde}$$

Le nombre d'états sur chacune des composantes est respectivement égal à 60, 40, 20, 20 pour les positions et vitesses, et 5 pour les canaux fréquentiels. Ces valeurs correspondent à une quantification de $500 \times 700 \text{ m}^2$ pour la case distance, $1 \times 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ pour la case vitesse, en accord avec la résolution du traitement dans chacune des dimensions. Le secteur fréquentiel étudié est de quelques Hertz, centré autour de la raie fréquentielle exploitée dans le paragraphe précédent (notée f_1 sur la figure 3). Le nombre total d'états est alors de $4.8 \cdot 10^6$. La recherche du maximum de la fonction critère $z_N(x)$ donnée par l'équation (12) est faite de manière exhaustive sur tous ces états. Les positions estimées aux mêmes instants de référence sont représentées sur la figure 5 au moyen du marqueur étoile. On a appliqué le test de détection multisources décrit plus haut mais seule l'estimée correspondant à l'énergie la plus forte est affichée si elle dépasse la valeur du seuil. La probabilité de fausse alarme de ce test de détection a été fixée à 10^{-5} . Les estimations fournies par la méthode d'intégration dynamique sont convergentes dès les 5 premières minutes. On note également sur la figure 7 une meilleure estimation de la distance par rapport à la trajectoire classique.

Par ailleurs, on s'est intéressé à un secteur fréquentiel centré autour de la fréquence f_2 décrite sur la figure 3. Cette raie spectrale est difficile à distinguer sur cette figure, elle est visible pendant les 15 premières minutes mais reste cependant non détectée par le traitement d'association temporelle (figure 4). Les positions estimées à partir de ce secteur fréquentiel sont tracées sur la figure 6. Elles font clairement apparaître que d'une part le bâtiment concours est bien détecté par cette méthode et que d'autre part, les estimations successives de sa position sont cohérentes au cours du temps. Ces résultats sont confirmés par la figure 8 pour les estimations de vitesse et de cap.

De plus, on a tracé sur les figures 9 et 10 des coupes de la fonction $z_N(x)$ dans les plans (x, y) , (x, f) , (y, f) , et (v_x, v_y) pour les deux secteurs fréquentiels décrits précédemment. La fonction $z_n(x)$ est celle estimée au dernier instant $t = 25 \text{ mn}$. Pour chaque coupe, les trois autres composantes du vecteur d'état correspondent à celles des vecteurs d'état estimés à cet instant.

On note la forme de la réponse dans la coupe en (x, y) qui est symétrique par rapport à l'axe observateur-source à l'instant d'estimation (t_{ref} pris au milieu de l'intervalle de temps T_{int}), ainsi que la différence de largeur de la zone à 3 dB sur l'axe des fréquences entre les deux figures 9 et 10. Les lobes secondaires du traitement apparaissent sur la coupe en (x, y) de la figure 10.

Enfin, quelques résultats en terme de puissance de calcul nécessaires sont fournis. Sur un ordinateur vectoriel Convex 3820 de 480 MFlops, une estimation du vecteur d'état demande 50 mn CPU dans les conditions énoncées ci-dessus. Il est clair que l'emploi d'une telle méthode va de pair avec celle d'un ordinateur puissant. Cependant, cet algorithme se prête particulièrement bien à la parallélisation. L'implantation sur un ordinateur massivement parallèle, une Connection Machine CM200 de 4 GFlops (16k processeurs), s'est traduite par une réduction du temps de calcul d'un facteur 5.

Intégration dynamique en sonar passif

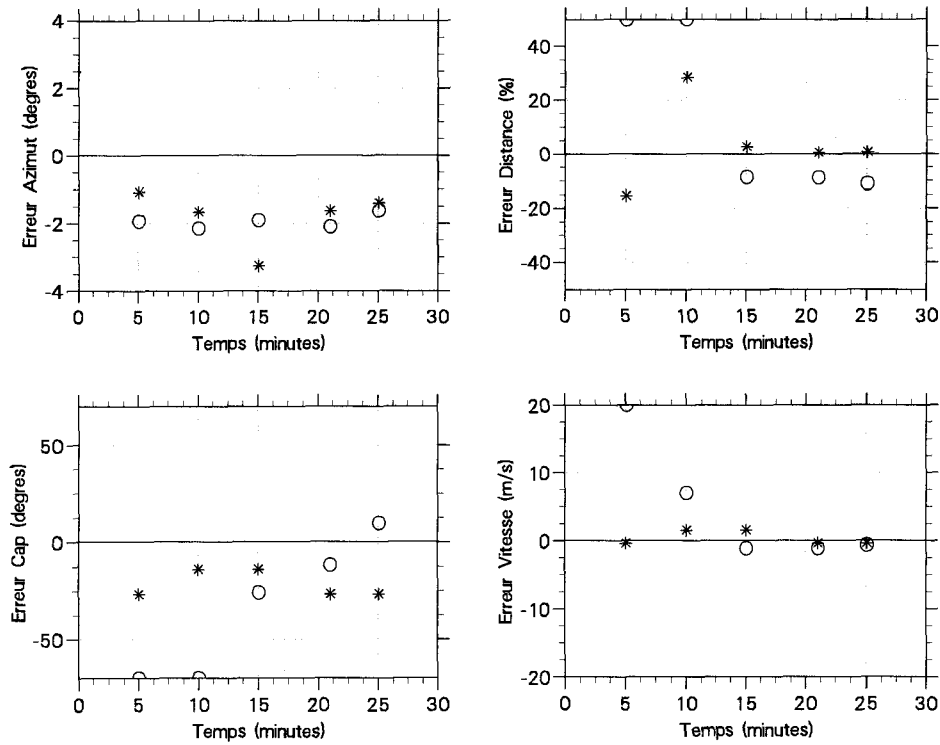


Figure 7. – Erreurs au cours du temps sur les estimations en azimut, distance, cap, et vitesse de la source trajectographie conventionnelle (o), intégration dynamique (*) (raie spectrale f_1)

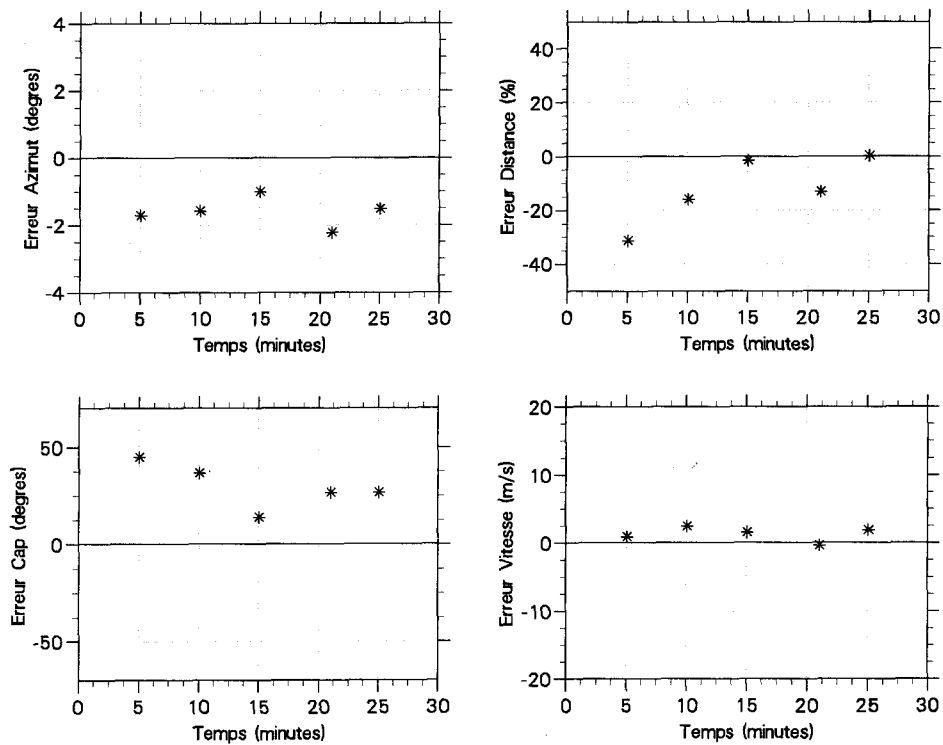


Figure 8. – Idem que Fig. 7. mais pour la raie spectrale f_2 .

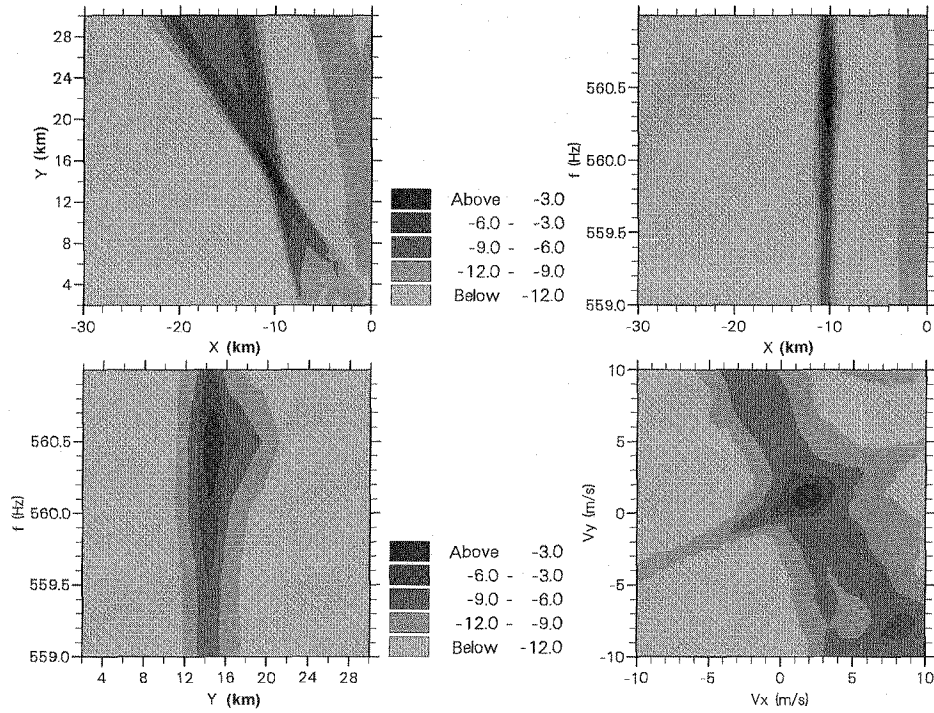


Figure 9. – Coupes de la fonction $z_n(x)$ dans les plans (x, y) , (x, f) , (y, f) , et (v_x, v_y) , raie spectrale f_1 .

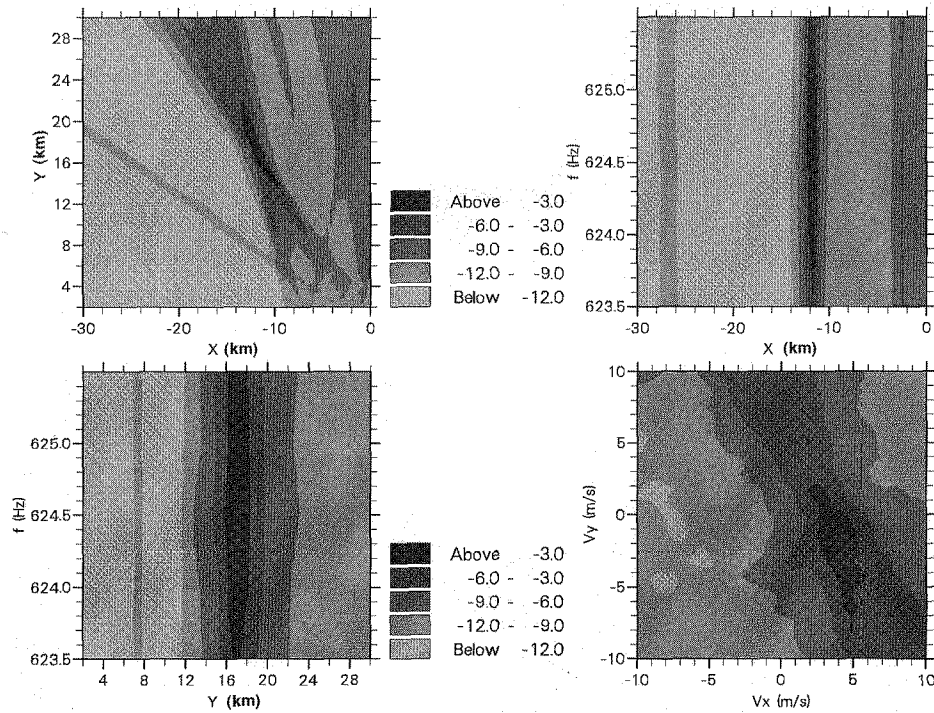


Figure 10. – Idem Fig. 9, pour la raie spectrale f_2 .

6. conclusion

Cet article valide une méthode d'intégration dynamique adaptée à la détection de sources faibles dans le contexte du sonar passif. L'intérêt principal de cette application réside dans la réalisation simultanée des traitements de détection et de poursuite ainsi que dans l'exploitation directe des signaux en sortie de formation de voies. Il existe donc un unique seuil de détection dans toute la chaîne de traitement, ce qui supprime les pertes d'information dues aux traitements successifs d'une chaîne sonar conventionnelle. La prise en compte d'hypothèses sur le mouvement des sources autorise des temps d'intégration importants qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de minutes, ce qui se traduit par une amélioration très nette des performances en détection lorsque le modèle de mouvement de la source est vérifié.

Des résultats obtenus sur des signaux enregistrés en mer confirment la faisabilité d'une telle approche et sa nette supériorité par rapport à un traitement classique. Des développements ultérieurs devront s'intéresser au cas des sources multiples qui notamment interfèrent entre elles par leur contribution à large bande et donc peuvent perturber le procédé de détection/localisation simultanées.

Remerciements

Une partie de cette étude a été faite avec un financement du GERDSM (le Brusac, DCN Toulon).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Struzinski W.A., and Lowe E.D., "A performance comparison of four noise background normalization schemes proposed for signal detection system", *J. Acoust. Soc. Am.* 76 (6), 1738-1742, 1984.
- [2] Nardone S.C., Lindgren, A.G., and Gong, K.F., "Fundamental properties and performance of conventional bearing-only tracking", *IEEE trans. on Autom. Control* vol. 29, 775-787, Sept. 1984.

- [3] Bar-Shalom, Y., and Fortmann, T.E., Tracking and data association, *Academic Press*, N.Y. 1988.
- [4] Aidala, V.J., and Hammel, S.E., "Utilization of modified polar coordinates for bearings-only tracking", *IEEE trans. on Autom. Control*, vol. 28, No 3, 283-294, 1983.
- [5] Zugmeyer, O., and le Cadre, J.P., "On the estimation of source motion parameters by temporal and spatial focusing", *J. Acoust. Soc. Am.* 93(3), 1482-1487, March 1993.
- [6] Solal, M., Pillon, D., and Brasseur, S., "Simultaneous detection and target motion analysis from conventional passive beam-forming outputs", In *Proc. of the ICASSP*, Toronto (Canada), 1321-1324, May 14-17, 1991.
- [7] Fawcett J.A. and Maranda B.H., "Localization by maximizing long-term integrated spectral power", *IEEE trans. on Signal Processing*, vol. 40 no. 2, 460-464, Feb. 1992.
- [8] Johnson, G.W. and Bradford, W.A., "Thresholds in combined detection and source motion estimation", In *Proc. of the ICASSP*, Dallas (TX), 1095-1098, April 6-9, 1987.
- [9] Ohlms, D.E., and Nitka, D.N., "Optimal bearing and bearing rate estimation using ambiguity surface", In *Proc. of the ICASSP*, San-Franisco (CA), Vol. II 533-536, March 23-26, 1992.
- [10] Bienvenu, G., and Kopp, L., "Optimality of high resolution array processing using the eigensystem approach", *IEEE trans. on Acoust., Speech and Signal Processing*, vol. 31 no. 5, 1235-1248, Oct. 1983.
- [11] Kendall, M. and Stuart, A., The advanced theory of statistics, Vol. 2, Fourth ed., Griffin, London, 1979.
- [12] L. Kopp, et D. Thubert, "Bornes de Cramer-Rao en traitement d'antenne. Première partie : Formalisme", *Traitement du Signal*, Vol. 3, No. 3, 11-125, 1986.
- [13] Passerieux, J.M., Pillon, D., Blanc-Benon, P., and Jauffret, C. "Target motion analysis with bearing and frequency measurement", In *Proc. of the 22nd Asilomar Conf. on Signals, Systems & Computers*, Pacific Grove (CA), 458-462, Nov. 1988.
- [14] IMSL User's Manual, "FORTRAN subroutines for mathematical applications", Version 2.0 Houston (TX), Sept 1991.
- [15] S. Sitbon, and J.M. Passerieux, "New efficient target tracking based upon hidden markov models and probabilistic data association", In *Proc. of the 29th Asilomar Conf. on Signals, Systems & Computers*, Pacific Grove (CA), Nov. 1995.
- [16] Burdick, W.S., Underwater acoustic system analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.

Manuscrit reçu le 31 octobre 1995.

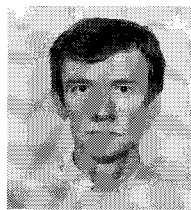
LES AUTEURS

Serge SITBON



Depuis l'obtention d'un doctorat en traitement du signal de l'INPT en 1989, il occupe un poste d'ingénieur d'étude en traitement du Signal Sonar à TS.ASM Sophia-Antipolis. Domaines d'activités : traitement d'antennes, tracking, trajectographie, fusion de données.

Pierre BLANC-BENON



Ingénieur diplômé de l'Ecole Supérieure d'Electricité (1984); depuis 1985, études et recherches à Thomson-Sintra ASM dans le domaine du traitement d'antenne et ses applications sonar.