

# NEUVIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 20 MAI 1983

## UNE NOUVELLE METHODE HAUTE RESOLUTION RAPIDE ET ROBUSTE

J.-L. BERROU et P. BOULON

SACLANT ASW Research Centre , Viale San Bartolomeo (19026) LA SPEZIA ITALIE

### RESUME

Une nouvelle approche au problème de l'estimation spectrale à haute résolution est présentée, qui n'utilise pas les matrices de corrélation. WB2 (pour Wagstaff-Berrou technique for Wide Band processes spectral estimation) est un filtre non-linéaire qui permet de transformer un spectre au sens de Fourier en un spectre à haute résolution ayant des propriétés analogues à ceux obtenus par les méthodes de maximum d'entropie ou de maximum de vraisemblance. La technique est itérative, elle est présentée comme un traitement spatial d'antenne acoustique passive, mais elle est aisément généralisable aux problèmes d'estimation spectrale multidimensionnelle, de traitement d'image ou de tomographie. La description de la technique et de ses bases théoriques est suivie d'exemples sur données simulées et réelles.

### INTRODUCTION

Une nouvelle méthode de déconvolution, simple et rapide, permet d'obtenir des estimées spectrales à haute résolution, à partir des spectres de Fourier discrets.

Cette méthode produit des spectres possédant des propriétés analogues à ceux obtenus par les méthodes dites de maximum d'entropie ou de maximum de vraisemblance, et ce à partir des niveaux spectraux (en décibels) obtenus par analyse de Fourier. La méthode, appelée WB2 dans la suite de l'exposé (pour Wagstaff-Berrou technique for Wide Band processes spectral estimation), a été développée pour des mesures d'anisotropie du bruit ambiant sous-marin, à l'aide d'une antenne passive linéaire. WB2 sera donc décrite en termes de formation de voies en acoustique sous-marine.

La méthode est aussi utilisable dans d'autres domaines comme l'analyse spectrale de signaux temporels, l'analyse spectrale multidimensionnelle ou encore le traitement d'images ou la tomographie.

La prochaine section expose le problème spécifique pour lequel WB2 a été développée, la suivante décrit l'algorithme, elle est suivie d'exemples d'applications à des données simulées et réelles, sur des problèmes de formation de voie et d'analyse spectrale.

### SUMMARY

A new approach to the problem of high resolution spectral estimation is presented, which does not use directly the correlation matrix. WB2 (for Wagstaff-Berrou technique for wide Band processes spectral estimation) is a non-linear filter which, from a spectrum in the Fourier sense, produces a spectrum with properties similar to those obtained by maximum entropy or maximum likelihood methods. The technique is iterative and is described as a beamformer for passive sonar, it can be used in other fields like multidimensional spectral analysis, image enhancement or tomography. The description of the technique and its theoretical background is followed by examples of applications to simulated and real data.

### POURQUOI WB2?

Le groupe Ambient Noise Group du SACLANTCEN étudie le problème du bruit ambiant sous-marin à basse fréquence. Ce bruit est dû principalement au trafic des navires marchands, et à l'agitation de la surface de la mer. Pour les mesures de bruit nous utilisons une antenne linéaire. Un de nos problèmes est de quantifier l'anisotropie, ou "directionnalité" du bruit de la mer, à partir de mesures faites avec une antenne de dimensions finies. Nous employons une méthode haute résolution pour nous affranchir le plus possible de l'ouverture d'antenne limitée utilisée pour la mesure, de façon à rendre cette mesure exploitable pour d'autres dimensions d'antenne. Une indépendance totale est irréalisable, mais une méthode à haute résolution peut diminuer les limitations dues à la longueur finie de l'antenne.

Les méthodes à haute résolution existantes (MEM, MLM, AR, ARMA, Valeurs propres) ne sont pas très performantes pour les mesures de niveaux faibles en présence de niveaux forts (surtout lorsque les signaux forts ne sont pas stationnaires), et une mesure précise des niveaux faibles est très importante pour notre problème. De plus, ces méthodes utilisent la matrice de corrélation, dont l'estimation nécessite une intégration longue, difficile à obtenir en un temps raisonnable pour les bandes de fréquence étroites des sonars passifs.



UNE NOUVELLE METHODE HAUTE RESOLUTION RAPIDE ET ROBUSTE

WB2 est le résultat d'une approche pragmatique et radicale du problème, sans soucis d'élégance ou de précision mathématique.

Le synoptique de l'algorithme est représenté en figure 1, et met en évidence à la fois le caractère itératif de la méthode, et l'étroite ressemblance entre ce qui se passe lors de la mesure réelle, et ce qui se passe dans une boucle de l'itération.

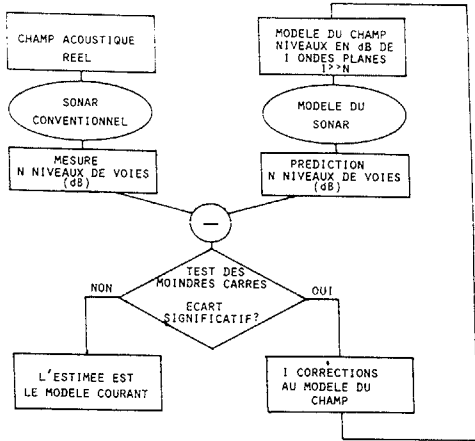


FIGURE 1

La particularité la plus originale de WB2 est sans doute l'utilisation du calcul en décibels, et surtout d'un test de moindres carrés sur les niveaux de voies en décibels, et non en énergie comme dans la plupart des autres méthodes.

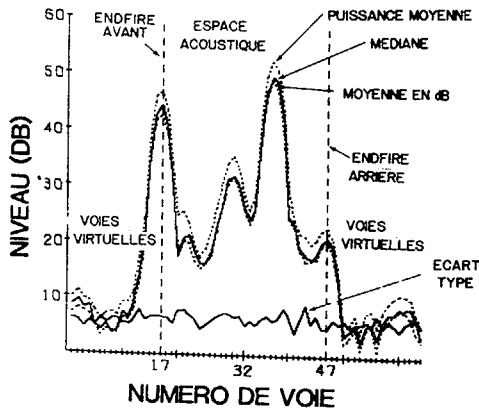


FIGURE 2

La figure 2 donne une explication partielle à ce choix. Elle montre un résultat typique de mesures de bruit à bande étroite, effectuées avec un sonar passif. Les courbes montrent en ordonnées diverses statistiques mesurées sur les voies. Celles-ci sont formées par transformée de Fourier des amplitudes complexes des signaux reçus par 40 hydrophones (la transformée de Fourier est de 64 points, les hydrophones sont pondérés par une fenêtre de Hann). La formation de voies par transformée de Fourier donne des voies équidistantes en déphasage, et non en azimuth, et aux fréquences basses le déphasage peut correspondre à un retard plus long que celui correspondant à la distance entre les capteurs. Les voies sont alors dites "virtuelles" bien qu'elles reçoivent de l'énergie bien réelle <1>.

Dans le cas de la figure 2, seulement les voies 17 à 47 "sont pointées dans des directions réelles", la voie 32 est celle qui correspond à un déphasage nul (broadside).

Les 3 courbes supérieures, quasi-parallèles, montrent 3 estimées du bruit, respectivement la moyenne en puissance, la moyenne en décibels et la médiane, estimées pour chaque voie sur une série de 50 mesures successives. La courbe inférieure montre l'écart-type de chaque série, en décibels. Bien que les courbes supérieures oscillent de près de 45 dB l'écart-type reste pratiquement indépendant du numéro des voies, et de leur niveau. Il est raisonnable de supposer que l'incertitude sur les niveaux moyens, pour un temps d'intégration fini, se comporte comme cet écart-type, et d'utiliser un test de moindres carrés en décibels, pour quantifier la ressemblance entre les niveaux de voies mesurés et ceux calculés à partir de l'estimée du champ. Un test de moindres carrés sur les puissances de voies donnerait trop de poids aux voies les plus bruyantes lors de l'évaluation de cette ressemblance.

Les autres hypothèses de WB2 sont plus "classiques". Le champ est modélisé par un "réseau" serré d'ondes planes. Ces ondes planes sont aussi supposées indépendantes, au moins localement. C'est-à-dire que deux sources "vues" par la même voie y contribuent de façon incohérente, sans interférence. De nombreuses observations montrent que pour les bandes de fréquences et les temps d'intégration des sonars passifs, cette hypothèse est raisonnable. (Une cohérence partielle provoquerait une erreur proportionnelle à l'amplitude des sources qui interfèrent, compatible avec l'hypothèse des erreurs relatives sur les niveaux de voie).

Une autre caractéristique de WB2 est le critère de maximum d'entropie, entendu ici dans un sens restreint. Si le nombre de sources dont on veut évaluer le niveau est supérieur au nombre de capteurs, la condition des moindres carrés ne suffit pas à définir une solution unique, mais donne au contraire une infinité de solutions. Le critère de maximum d'entropie, qui consiste à sélectionner entre toutes les solutions possibles celle qui est la moins "structurée", la plus isotrope, nous a semblé le mieux adapté au phénomène étudié. Pour résumer, la méthode idéale dont WB2 est une réalisation très approximative devrait, à partir de N mesures de niveaux de voies (en décibels) estimer le champ de I sources (I >> N) d'ondes planes ayant le plus d'entropie, qui satisfasse la condition des moindres carrés sur les niveaux de voie en dB.

En termes mathématiques :

Soit  $F$  le vecteur champ acoustique de dimension I ( $F_i$  est le niveau sonore en dB de la source i dans la direction  $\alpha_i$ ).

Soit  $M$  le vecteur mesure, de dimension N ( $M_n$  est le niveau sonore en dB de la voie n du sonar).

Le sonar est défini comme un opérateur  $P(F)$ , non linéaire.

$$P_n(F) = 10 \text{ Log} \left\{ \sum_i 10^{\frac{F_i + R_{ni}}{10}} \right\}$$

$R_{ni}$  est la réponse (en dB) de la voie n à une source dans la direction  $\alpha_i$ , de niveau 0 dB.

La formule (1) décrit simplement l'intégration en puissance du champ acoustique filtré par la voie n. Notre problème consiste à trouver le champ tel que

$$\sum_i F_i \quad \text{soit maximum} \quad (2)$$

sous la contrainte que

$$G(F) = \sum_n (M_n - P_n(F))^2 \quad \text{soit minimum} \quad (3)$$

UNE NOUVELLE METHODE HAUTE RESOLUTION RAPIDE ET ROBUSTE

(3) peut aussi s'écrire :

$$\frac{\partial}{\partial F_i} G(F) = 0 \quad \forall i \quad (4)$$

Ou encore, en définissant  $\nabla_F$  comme l'opérateur Jacobien

$$\nabla_F G(F) = 0 \quad (5)$$

La formule (5) représente un système de I équations non linéaires à I inconnues ( $F_i$ ). I étant plus grand que N, il existe une infinité de solutions à ce système d'équations.

Il est possible de trouver une solution en utilisant la méthode itérative de Newton-Raphson:

La série  $F_{R_i}$  ( $F_{R_i}$  est le vecteur champ de composantes  $F_{R_i}$ ) telle que

$$\nabla_{F_{R_i}} \nabla_{F_{R_i}} G(F_{R_i}) (F_{R_{i+1}} - F_{R_i}) = -\nabla_{F_{R_i}} G(F_{R_i}) \quad (6)$$

( $\nabla_F \nabla_F$  est l'opérateur doubles dérivées partielles ou Hessian)

converge vers  $F$ , solution de l'équation (5).

Et l'équation (6), est linéaire en  $F_{R_{i+1}} - F_{R_i}$ .

Pour la résoudre, il faut inverser la matrice  $\nabla_F \nabla_F G(F)$  matrice carrée de dimension (I,I).

Même si un bon nombre des éléments de cette matrice sont suffisamment petits pour être négligeables, cette inversion est laborieuse, et la solution trouvée dépendra du premier choix  $F_0$  pour le champ. De plus, nous ne savons pas comment sélectionner  $F_0$  pour que  $F$  soit aussi solution de (2).

WB2 utilise une approximation grossière de la matrice inverse de  $\nabla_F \nabla_F G(F)$  et permet de trouver en un temps raisonnable (de 5 à 20 itérations) une solution approchée au problème défini par les équations (2) et (3), en partant d'un champ  $F_0$  ayant "beaucoup d'entropie".

L'ALGORITHME

La structure de l'algorithme, représentée en figure 1, est analogue à celle de l'algorithme de Newton-Raphson.

Pour trouver un vecteur champ solution, on part d'un vecteur champ non-solution, et on le corrige jusqu'à ce que le champ résultant soit satisfaisant.

Plusieurs critères sont possibles pour décider l'arrêt de l'itération. Celui choisi pour WB2 est que, comme les corrections sont approximatives, la convergence de  $G(F)$  vers son minimum ne sera pas forcément monotone, et on arrêtera l'itération lorsque  $G(F_{R_i})$  sera supérieure ou égale à  $G(F_{R_{i-1}})$ . On prendra alors  $F_{R_{i-1}}$  comme solution. Quelquefois, la convergence est monotone et l'arrêt a alors lieu à la 25ème itération.

Le choix du champ  $F_0$  aussi est important, dans la mesure où la forme, et donc l'entropie de la solution  $F$  en dépend. Dans la présente version de l'algorithme,  $F_0$  est une "interpolation normée" entre les voies, défini par :

$$F_{0i_n} = M_n \times 10 \text{ Log } BW_n$$

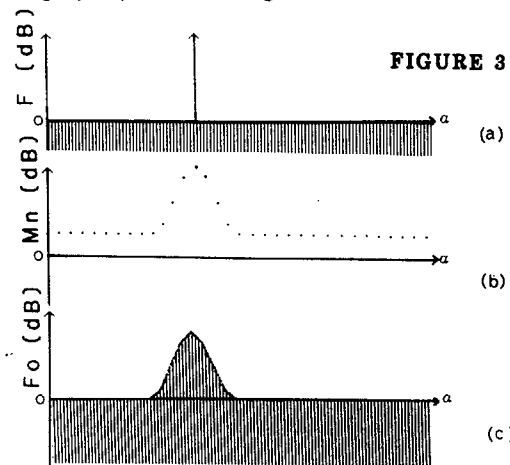
pour chaque indice  $i_n$  correspondant à la direction de pointage de la voie n.  $BW_n$  est la largeur de bruit de la voie n.

Pour les directions intermédiaires entre les directions de pointage des voies,  $F_0$  est calculé par simple interpolation.

Soit, pour  $i_n < i < i_{n+1}$

$$F_{0i} = F_{0i_n} + \frac{i - i_n}{i_{n+1} - i_n} \times (F_{0i_{n+1}} - F_{0i_n})$$

Les graphiques de la figure 3 illustrent le calcul de  $F_0$ .



Le graphe 3a montre un champ F formé par la superposition d'un champ isotrope et d'une source unique dans la direction  $\alpha_i$ .

La sortie du sonar correspondant au champ F est représentée sur la figure 3b, et le champ  $F_0$  correspondant en 3c.

Ayant  $F_0$ , l'itération consiste à appliquer le sonar au champ  $F_0$ , calculer les différences  $M_n - P_n(F_0)$  et les corrections à  $F_0$  de façon à réduire le module du vecteur différence  $M_n - P_n(F_0)$ .

La mesure effectuée par le sonar sur le champ  $F_0$  est représentée en figure 4 pour une voie n.

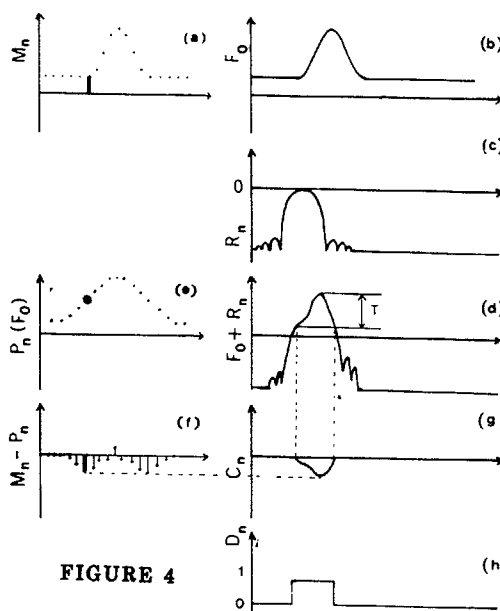


FIGURE 4

4a représente les mesures  $M_n$ ,  $n=1, \dots, N$   
 4b représente le champ  $F_0$ , en fonction de  $i$   
 4c représente la réponse  $R_{ni}$  de la voie n en fonction de  $i$ .  
 4d représente le champ  $F_0$ , "vu à travers" la voie n, considérée comme un filtre spatial :  $F_0 + R_n$ .



UNE NOUVELLE METHODE HAUTE RESOLUTION RAPIDE ET ROBUSTE

$P_n(F_0)$  est la somme des énergies des sources vues à travers la voie  $n$ , calculée par la formule (1),  $P_n(F_0)$  est représentée en 4e.

Ayant  $P_n(F_0)$  on peut calculer l'"erreur"  $M_n - P_n(F_0)$  pour la voie  $n$ . (représentée en 4g). Sur la figure, cette erreur est négative et demande une réduction de  $F_0 + R_n$ .

Pour être le plus efficace possible, cette réduction doit se faire seulement sur les parties du champ qui contribuent le plus à la voie  $n$ , c'est-à-dire les parties du champ où  $F_0 + R_n$  est proche de sa valeur maximum.

On définit donc un seuil  $T$  tel que les parties du champ, où  $F_0 + R_n$  sera supérieur à  $(F_0 + R_n)_{max} - T$  seront "corrigées" par cette voie  $n$ .

La correction à  $F_0$ , de la part de la voie  $n$ , est représentée en 4g, et s'écrit

$$C_{ni} = (M_n - P_n(F_0)) \times \frac{D_{ni}}{T} (F_{0i} + R_{ni} + T - (F_0 + R_n)_{max})$$

$D_{ni}$  représenté en 4h est un "indicateur de correction" défini par

$$D_{ni} = 1 \text{ si } F_{0i} + R_{ni} > (F_0 + R_n)_{max} - T$$

et  $D_{ni} = 0$  autrement.

Cette opération est effectuée en parallèle pour les  $N$  voies. La figure 5 explique comment les corrections requises par les différentes voies sont moyennées.

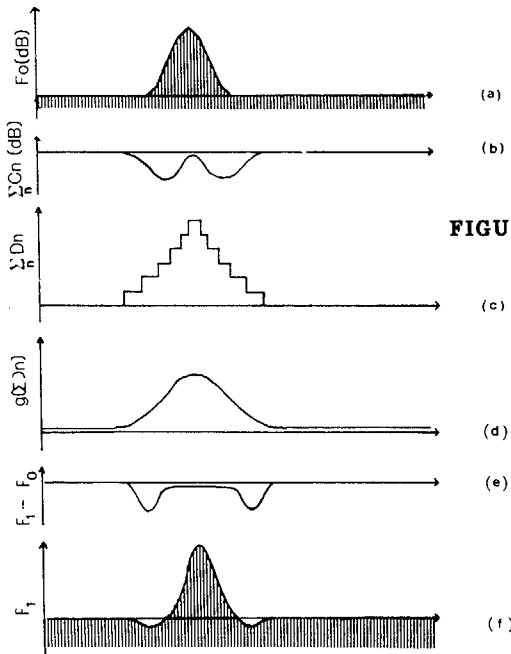


FIGURE 5

5b représente, pour chaque  $i$ , la somme des corrections  $\sum_n C_{ni}$ .

Cette correction est une somme, et non une moyenne, elle doit être normalisée.

Pour ce faire, on calcule pour chaque  $i$  le nombre de voies ayant "requis" une correction,  $\sum D_{ni}$  (représenté en 5b). On ne divise pas  $\sum C_{ni}$  par  $\sum D_{ni}$ , car cela entraînerait des discontinuités dans les corrections, et donc dans la nouvelle estimée, discontinuités en contradiction avec le principe de maximum d'entropie.  $\sum D_{ni}$  est donc "lissée" par une convolution avec une fenêtre rectangulaire  $W_i$  de largeur  $2I/N$ .

La correction "moyenne", représentée en 5c, s'écrit en fait :

$$F_1 - F_0 = (\sum_n C_{ni}) / (\frac{1}{2} + \frac{2}{3} (\sum_n D_{ni}) \otimes W_i)$$

la constante 1/2 évite le problème d'avoir à diviser zéro par zéro.

La constante 2/3 diminue la vitesse de convergence vers la solution finale, mais elle diminue aussi les risques d'oscillation des  $F_k$  autour de la solution  $F$ .

La correction  $F_1 - F_0$  est alors ajoutée à  $F_0$ , et l'itération recommence. A chaque boucle de l'itération, on compare le module du vecteur erreur  $G(F_k)$  à celui de l'itération précédente  $G(F_{k-1})$ .

Si le nouveau vecteur erreur est plus grand que le précédent, l'itération se termine et  $F_{k-1}$  est l'estimée de  $F$ .

Le seuil  $T$  qui définit la partie du champ qui "mérite" une correction de la part de la voie  $n$ , a été fixé à 10 dB si  $M_n$  est plus petit que  $P_n(F_0)$  et 6 dB si  $M_n$  est plus grand que  $P_n(F_0)$ . Ces valeurs ont été choisies par tâtonnements et donnent des résultats satisfaisants.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'algorithme, présenté dans le paragraphe précédent, a été programmé (en FORTRAN) sur un mini-ordinateur pour estimer un champ de 1024 ou 512 points, à partir de 64 ou 128 voies.

La plupart des exemples qui suivent utilisent 64 voies formées à partir d'un réseau de 40 capteurs, par FFT. (Les 40 hydrophones étaient pondérés en amplitude par une fenêtre de Hann, avec adjonction de 24 hydrophones "nuls").

Sur les figures 6, 8 et 9, les cercles représentent les mesures classiques (par FFT), les croix représentent les résidus (les différences  $M_n - P_n(F)$  à la fin de l'itération).

En trait continu est représentée l'estimée de WB2, et en pointillé le "vrai" champ.

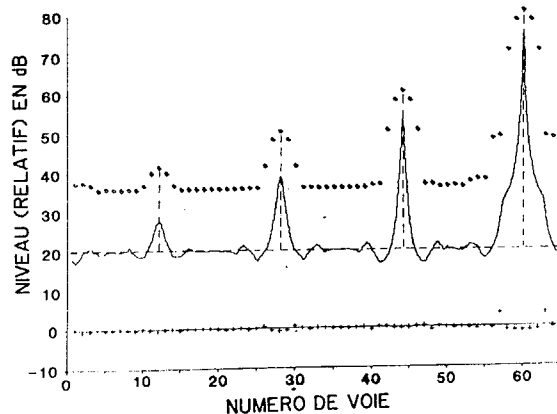


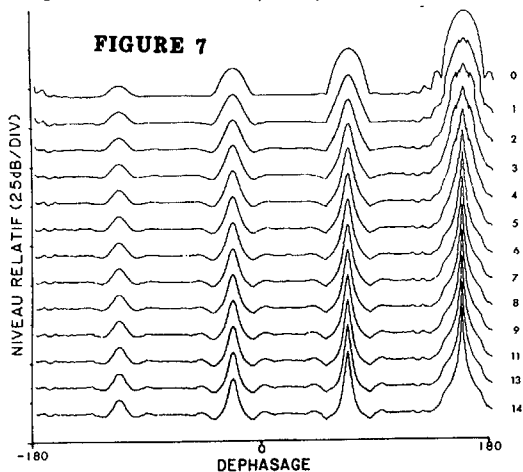
FIGURE 6

En figure 6, on a simulé un champ en superposant un champ de bruit isotrope, et 4 sources de niveau relatif - 10 dB, 0 dB, + 10 dB et + 30 dB (rapport S/B sur un capteur), on a formé 64 voies sur ce champ, et estimé ce champ sur 1024 points en utilisant WB2 sur les niveaux de 64 voies.

La finesse des estimées des sources croît avec le rapport S/B, et est toujours meilleure que celle de la formation de voie classique. WB2 augmente aussi le "gain" d'antenne pour les sources fortes, en concentrant l'énergie des voies de fort niveau dans la

UNE NOUVELLE METHODE HAUTE RESOLUTION RAPIDE ET ROBUSTE

direction de la source, tout en étalant de façon relativement uniforme l'énergie des voies de faible niveau. L'amélioration du gain dépend elle aussi du rapport signal/bruit. Les résultats sur de tels "tests" quasi parfaits, sans bruit d'estimation, ressemblent à ceux obtenus par la méthode de maximum d'entropie classique. Les oscillations du spectre aux alentours des sources sont sans doute une conséquence des approximations lors du calcul des corrections, et leur amplitude reste inférieure à 2-3 dB, même au voisinage des sources les plus puissantes.



La figure 7 correspond au même champ que la figure 6. L'échelle verticale est de 20 dB par division au lieu de 10 dB, et la figure montre, décalées, les étapes successives de l'itération. La première estimée  $F_0$  est la plus haute sur la figure. L'estimée finale (en bas) est obtenue au bout de 14 itérations, et correspond à un résidu (moyenne quadratique des  $M_n - P_n(F)$ ) de 0.7 dB, pour les 128 voies (au lieu de 64 pour la figure 6) formées à partir de 40 hydrophones pondérés par une fenêtre de Hann.

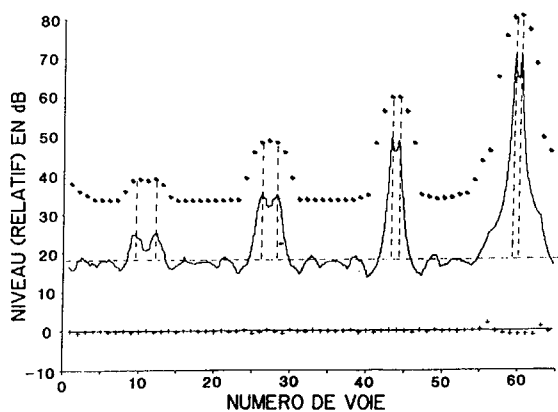


FIGURE 8

Pour le problème représenté en figure 8, on a remplacé les sources par des doublets. L'écartement des doublets a été choisi de façon à les rendre séparables par WB2, ce qui permet d'apprécier son excellent pouvoir séparateur.

Les séparations entre les deux sources de chaque doublet sont de 1.25 BW pour le doublet à - 10 dB, 1 BW pour le doublet à 0 dB, 0.5 BW pour le doublet à + 10 dB, et 0.375 BW pour le doublet à + 30 dB (BW est la largeur à 3 dB des voies classiques). Les irrégularités de l'estimée du bruit de fond sont en partie causées par les erreurs dans le modèle des réponses des voies classiques. (La directivité de chaque voie  $R_n$  est approximée), et par l'échantillonnage sous-optimal de l'image "classique" (64 voies seulement pour 40 hydrophones, ce qui provoque une légère

dégradation de l'information si on utilise seulement l'amplitude des 64 voies). Une autre cause d'erreur est le calcul, les opérations sur les niveaux en décibels se faisant sur des nombres entiers, et les niveaux étant arrondis à - 0,1 dB près. A ces erreurs près, WB2 donne une bonne estimée aussi bien des positions que des niveaux des sources (comme dans la méthode du maximum d'entropie, le niveau est l'intégrale du pic, non la hauteur du maximum) et aussi une bonne estimée du niveau du bruit de fond. Les différences représentées par les croix autour de l'axe 0 dB montrent que l'erreur résiduelle est très faible (0,4 dB en moyenne quadratique). Cette erreur résiduelle provient seulement des approximations de l'algorithme, et donne une idée de sa précision.

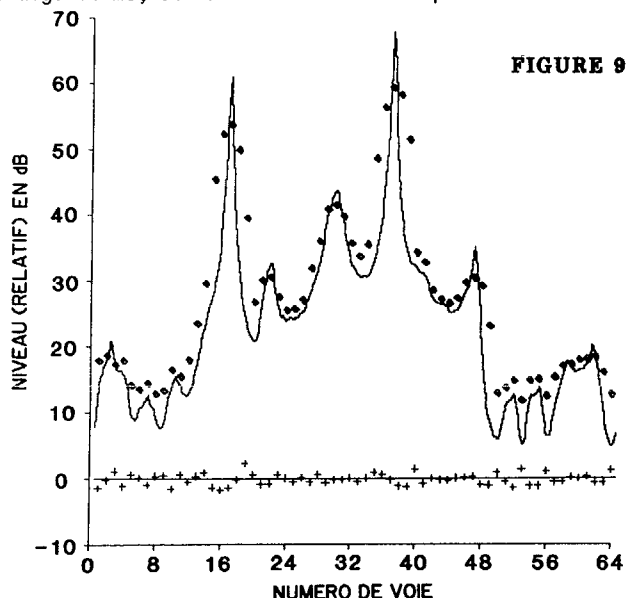


FIGURE 9

L'exemple de la figure 9 provient de mesures réelles faites à l'aide d'une antenne linéaire et correspond aux mêmes données que la figure 2. L'algorithme WB2 a été employé sur les niveaux de voie médians de la figure 2, pour 50 mesures successives. (Un avantage de WB2 est son aptitude à utiliser des estimées de bruit de voie obtenues par différentes méthodes d'"intégration", comme des moyennages géométriques ou des tris, et non pas seulement les moyennages en puissance).

Pour la figure 9, l'estimée de WB2 est calculée sur 512 points seulement (le programme est alors 2 fois plus rapide) à partir de 64 voies. Le format de la figure a été changé, on a par exemple normalisé les niveaux de voies de façon que pour un champ uniforme les niveaux de sorties des voies classiques seraient les mêmes que le niveau de sortie de WB2.

Ces mesures ont été effectuées à une fréquence correspondant à un espacement entre capteurs de  $\lambda/4$ , et la moitié des voies sont virtuelles. L'espace acoustique s'étend de la voie n° 17 à la voie n° 47, l'énergie des faisceaux 1 à 16 et 43 à 64 correspond aussi au bruit ambiant, mais ce bruit est reçu sur les lobes secondaires de ces voies <2,3>.

Dans la version utilisée sur ces données, l'algorithme suppose que les voies n'ont pas de lobes secondaires, et donc ne supprime pas leurs effets.

Le navire récepteur est reçu sur la voie 17, et aussi sur les voies 29, 30, et 31 (chemins réfléchis sur le fond). Un gros pétrolier se trouvait dans la direction de la voie 37 pendant les 13 minutes de l'observation. Le pic de la voie 22 correspond à un autre bateau, et celui de la voie 47 à un ou plusieurs bateaux (en



UNE NOUVELLE METHODE HAUTE RESOLUTION RAPIDE ET ROBUSTE

endfire arrière). Les chemins directs du navire récepteur et du pétrolier sont bien définis et stables, et leur estimée est très "pointue". Ce n'est pas le cas de la source sur la voie 22, ni du bruit réfléchi par le fond provenant du navire récepteur. La raison du manque de netteté de ces deux "sources" est leur instabilité en azimuth. Le bateau de la voie 22 se déplace en azimuth pendant la mesure, et les chemins réfléchis sont affectés à la fois par des interférences et par l'instabilité de la géométrie fond-surface-antenne dans le plan vertical.

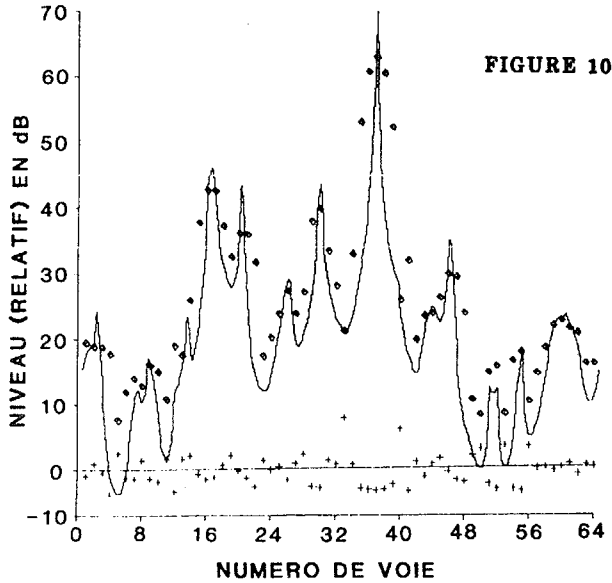


FIGURE 10

La figure 10 représente une image "instantanée" sans intégration, et montre que la haute résolution est tout à fait possible pour un produit BxT unitaire, et que l'intégration peut dégrader très vite la précision pour les sources non-stationnaires.

Les exemples montrés jusqu'ici présentent une forte anisotropie et d'autres méthodes que WB2 permettent d'obtenir des résultats analogues, au prix d'un temps d'intégration plus long.

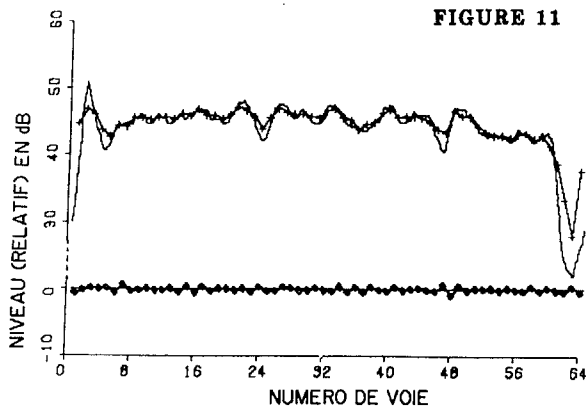


FIGURE 11

La figure 11 présente un cas différent, de bruit sans structure spatiale particulière. Les mesures de la figure 11 correspondent à une fréquence élevée, par mer forte. A cette fréquence, l'espace réel acoustique s'étend de la voie n° 2 à la voie n° 62. Le bruit du vent a très peu de composantes horizontales, et les voies "endfire" 2,3,4 vers l'avant et 60, 61, 62 vers l'arrière reçoivent très peu de bruit ambiant. (2, 3 et 4 reçoivent le bruit du navire récepteur). Le seul pic détecté par WB2 est celui correspondant à la direction du navire récepteur.

La sortie à haute résolution pour les autres directions est très proche de ce qu'on pourrait obtenir par simple interpolation entre les différentes voies. WB2 est vraiment une méthode à haute résolution pour phénomènes à large bande...

Son aptitude à estimer le bruit à large bande aussi bien que les sources localisées est mise en évidence dans le dernier exemple, sur un problème d'analyse spectrale. Jusqu'ici WB2 a été comparée seulement à la formation de voies classique, et non aux autres méthodes à haute résolution. Kay et Marple ont comparé dans leur article <2> différentes méthodes d'analyse spectrale, et donnent les valeurs numériques d'une série temporelle de 64 points réels, à laquelle ont été appliquées ces méthodes. Avec la permission des auteurs et de l'éditeur de cet article, nous reproduisons en figure 12 leurs résultats.

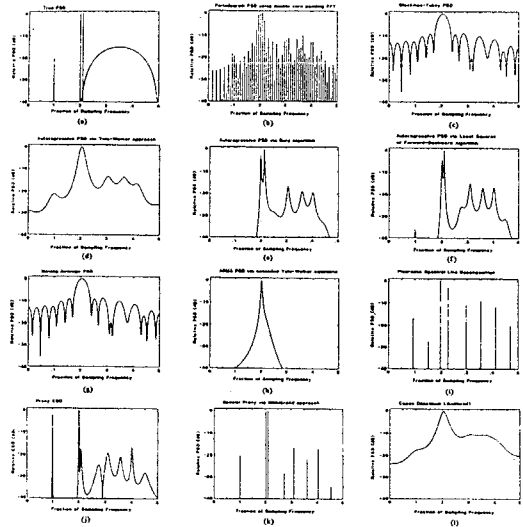


FIGURE 12 COPYRIGHT IEEE 1981

La figure 13 donne l'estimée de WB2 pour la même série de points, à partir d'une moyenne géométrique glissante de 16 FFT sur 48 points (pondérés par une fenêtre de Hann). Les niveaux et les positions des sources sont estimées avec précision, et le bruit à large bande ne produit pas de "fausses sources". Cet exemple n'est pas censé prouver une supériorité de WB2, il montre simplement son aptitude "singulière" à estimer aussi bien des spectres larges que des raies.

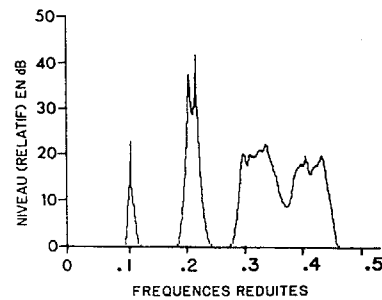


FIGURE 13

Quant au temps de calcul, il est difficile de comparer WB2 aux autres méthodes. Le nombre d'opérations élémentaires est plus grand que pour les autres méthodes, ainsi que les besoins en mémoire (à peu près  $5 \times I$ , I représentant la définition en sortie de

l'algorithme) lorsque la série à analyser est petite. Ce "défaut" est compensé par la simplicité des opérations à effectuer (addition, soustractions, comparaisons) et le peu de précision requis (nombres entier de 10 à 12 bits) par ces opérations. Par exemple, le calcul du spectre de la figure 13 a demandé 1 minute sur un mini-ordinateur HP-1000 programmé en FORTRAN.

Pour estimer des spectres de séries de grandes dimensions, soit mono, soit multidimensionnelles, WB2 devient une méthode très intéressante. Les besoins en mémoire augmentent comme  $5 \times I$ , et son temps de calcul comme  $N \times I$ ,  $N$  étant la définition en entrée, proportionnelle au nombre de points dans la série, et  $I$  la définition en sortie.

Les problèmes multidimensionnels ou de tomographie ne présentent pas de difficultés théoriques, ils demandent simplement plus de mémoire et de temps de calcul.

## CONCLUSION

### Caractéristiques principales

WB2 n'est pas à proprement parler une méthode d'analyse spectrale en ce sens qu'elle n'effectue pas de changement de domaine du type temps-fréquence. C'est plutôt une méthode de déconvolution, qui utilise des critères classiques (maximum d'entropie, méthode des moindres carrés) pour estimer à partir d'une image "classique" un objet (le plus probable??) qui, observé par l'instrument de mesure, donnerait cette image. Cette estimation est faite de façon approximative. La méthode a été mise au point pour l'estimation aussi bien de bruit non localisé que de sources d'ondes planes.

### Avantages

WB2 peut être utilisé comme "post-processeur", pour traiter les signaux provenant d'un sonar "classique", permettant de conserver le système de traitement de signal original. Il permet d'en améliorer la résolution et le gain de traitement temporel, ou spatial, ou même spatio-temporel. On peut appliquer WB2 de façon locale, dans le plan espace-temps, pour améliorer la résolution seulement sur les parties "intéressantes" de l'image sonar classique, un peu comme un "zoom". Le temps de calcul est proportionnel à  $N \times I$ ,  $N$  étant la "définition" classique (nombre de points en entrée), et  $I$  la définition en sortie de WB2. Les besoins en mémoire sont proportionnels à  $I$ , ce qui rend la méthode très compétitive pour le traitement de grandes images.

### Limites

WB2 suppose que le processus "objet" est une collection d'ondes planes (sinusoïdes) indépendantes. Un processus autorégressif, ou une source dans le champ proche ne seront pas estimés au mieux. Si le milieu de propagation produit des chemins multiples cohérents entre eux, ou si l'antenne est déformée, les performances de WB2 en seront affectées.

### Autres champs d'application possible

Il est facile de généraliser WB2 pour résoudre des problèmes du type tomographie, dans lesquels un "objet" multidimensionnel est estimé à partir d'une série de mesures de projections de cet objet sur différents sous-espaces. En fait, WB2 dérive d'une telle méthode <3,4> qui estime le champ de bruit horizontal, ou sphérique, à partir de plusieurs mesures ambiguës effectuées par un réseau linéaire remorqué sur différents caps.

La capacité qu'a WB2 de produire des estimées à haute résolution spatiale sans intégration dans le temps permet d'utiliser cette méthode de manière adaptative, par exemple en utilisant l'information d'une nouvelle acquisition pour "améliorer" l'estimée présente. Des images optiques ou infrarouges peuvent être traitées par la méthode, si on connaît la réponse impulsionnelle de l'objectif (cette réponse impulsionnelle n'a pas besoin d'être uniforme sur tout le champ). WB2 n'est pas limitée au traitement d'antenne à éléments équidistants. Si on connaît la réponse de l'instrument, on peut utiliser WB2 pour transformer l'image conventionnelle en une image à haute définition.

### REFERENCES

- <1> J.L. BERROU, R.A. WAGSTAFF : Virtual beams from an FFT beamformer and their use to assess the quality of a towed array system. ICASSP 1982, pp. 811-814
- <2> S.M. KAY, S.L. MARPLE : Spectrum Analysis - A modern Perspective proceedings of IEEE, Vol. 69, no 11, Nov. 1981: 1380-1419.
- <3> R.A. WAGSTAFF, Iterative techniques for ambient noise horizontal directionality estimation from towed array data, JASA Vol. 63, 1978: 863-869.
- <4> R.A. WAGSTAFF : Horizontal directionality estimation considering array tilt and noise field vertical arrival structure, JASA Vol. 67, 1980: 1287-1294.

