

DIXIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

339



NICE du 20 au 24 MAI 1985

UNE METHODE ITERATIVE POUR MESURER L'ANISOTROPIE HORIZONTALE DU BRUIT AMBIANT SOUS-MARIN

JEAN LOUIS BERROU*, RONALD A. WAGSTAFF**

* THOMSON CSF DASM CAGNES/MER, ** NORDA BAY ST LOUIS (MS) USA

RESUME

Des méthodes de déconvolution itératives peuvent transformer un spectre de Fourier en spectres à haute résolution analogues à ceux obtenus par des méthodes haute résolution du type MEM (maximum d'entropie). Une telle méthode (WB2) avait été présentée au GRETSI il y a deux ans. La présente communication décrit l'application d'une méthode de ce type à un problème plus complexe de résolution d'ambiguïté: déterminer l'anisotropie ou directionnalité du bruit ambiant sous-marin à partir de plusieurs mesures classiques réalisées avec une antenne linéaire horizontale qu'on réoriente de façon différente pour chaque mesure. Les méthodes classiques ont des difficultés à résoudre ce problème à cause de la non-stationarité du bruit ambiant pendant la série de mesures, qui dure quelques heures. La méthode présentée estime la composante stationnaire du bruit ambiant, éliminant avec les ambiguïtés droite-gauche de chaque mesure, toutes les sources dont la direction a changé durant la série de mesures. La description de la méthode est suivie d'exemples d'applications sur des mesures simulées.

SUMMARY

Iterative deconvolution techniques can transform a Fourier spectrum into spectra similar to the ones obtained through MEM (maximum entropy method) or MCE (minimum cross entropy method). One such method (WB2) was presented in the last GRETSI conference. This paper presents a similar technique, applied to a more complex problem of ambiguity resolution: it estimates the underwater ambient noise directionality from the ambiguous beam measurements obtained with a linear array on multiple headings. Conventional techniques to solve this problem are very sensitive to angularly resolved sources that move during the measurement period of a few hours. This technique removes together with the ambiguities, all the high level moving noise sources and gives a good unambiguous estimate of the persistent background noise. Description of the technique is followed by examples of application on simulated measurements.



UNE METHODE ITERATIVE POUR MESURER L'ANISOTROPIE HORIZONTALE DU BRUIT AMBIANT SOUS-MARIN

LE PROBLEME

Aux basses fréquences utilisées par les sonars passifs, le bruit ambiant provient en partie du trafic maritime, et en partie de la surface de la mer agitée par le vent. Il n'est pas isotrope, et il faut tenir compte de son anisotropie pour prédire la performance d'un sonar.

La "directionnalité" (de l'anglais "directionality") du champ de bruit ambiant est une mesure du spectre angulaire de bruit, en fonction de l'azimut et de l'élévation. Elle se mesure en décibels par unité d'angle solide. A partir de la directionnalité et de la directivité d'une voie, il est facile de calculer le bruit de la voie. Souvent, les symétries du champ permettent de factoriser la directionnalité en composantes verticale et horizontale, exprimées en décibels par degrés.

Le bruit dû au trafic est concentré en site autour du plan horizontal, et la mesure de sa directionnalité se réduit à une mesure de directionnalité horizontale. Cette mesure ne peut se faire directement qu'avec une antenne à deux dimensions, d'encombrement prohibitif aux basses fréquences du bruit de trafic (50 Hz à 1000 Hz).

L'antenne linéaire remorquée permet d'obtenir aux basses fréquences une résolution angulaire suffisante à peu de frais, mais son usage pour les mesures de bruit ambiant présente deux inconvénients: le premier est la présence, pas toujours discrète, du navire remorqueur. Le second est l'ambiguïté droite-gauche due à la forme des voies qui sont symétriques de révolution autour de l'axe de l'antenne. La figure 1 représente une antenne linéaire et les directivités de trois voies formées sur cette antenne. La voie (1) formée par simple addition sans retards ou déphasages est normale à l'axe de l'antenne (broadside), et se présente comme un "disque": l'antenne ne sépare pas sa droite de sa gauche (ni du fond ou de la surface). La voie "endfire" (3) obtenue en retardant les signaux des hydrophones du temps nécessaire à une onde acoustique pour se propager d'un hydrophone au suivant se présente comme un pinneau, les voies intermédiaires (2) se présentent comme des cônes de révolution autour de l'axe de l'antenne.

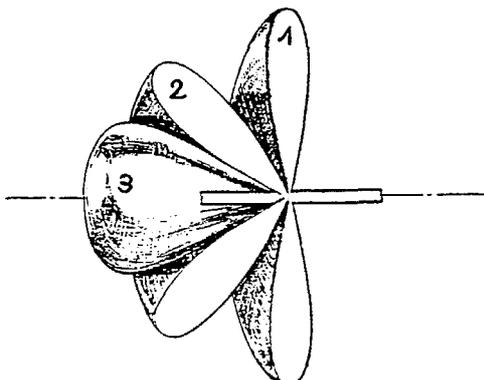


Fig.1 Antenne linéaire et directivités de trois voies préformées

Pour exploiter les mesures de bruit ambiant effectuées à l'aide de ces antennes, il faut lever les ambiguïtés résultant des symétries de voies. La résolution de ces ambiguïtés se complique en général du fait qu'une partie du champ de bruit ambiant n'est pas stationnaire pendant la durée des mesures.

Des méthodes <1,2,3> ont été élaborées pour estimer la directionnalité horizontale du bruit ambiant sous-marin à partir de mesures faites avec une antenne linéaire horizontale remorquée sur une série de caps différents (les "cotés" d'un "polygone" de mesure). La figure 2 présente de telles manoeuvres ou polygones (en 1a la manoeuvre prévue, en 1b et 1c deux tracés de la route réelle du bateau lors de deux polygones de 9 cotés).

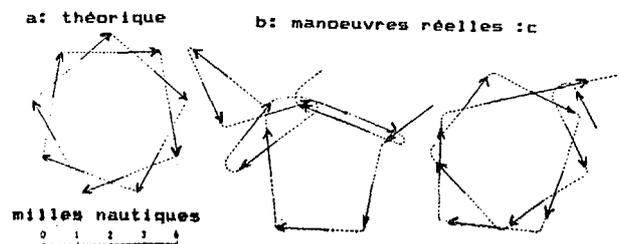


Fig.2 Polygones de mesure de bruit
----- stabilisation
→ acquisition

Les méthodes décrites en <2> et <3> traitent le problème de levée d'ambiguïté comme un problème inverse classique: elles supposent à la fois que le champ de bruit est stationnaire pendant la durée du polygone, et que les mesures sur chaque coté sont parfaites (pas de bruit propre, ni d'erreur de mesures). En pratique, le bruit dû aux sources proches et mobiles n'est pas stationnaire, et lorsqu'il domine le bruit ambiant, on ne peut plus utiliser ces méthodes. Pour obtenir des résultats raisonnables avec ces techniques, il faut "éliminer" les sources mobiles, par exemple en intégrant pendant très longtemps les mesures sur chaque coté du polygone: on obtient alors une estimée du bruit ambiant "moyen à long terme", ce qui suppose, souvent à tort, que le bruit ambiant est stationnaire sur un temps très long.

Pour prédire l'effet du bruit sur un système sonar, on a plutôt besoin de connaître le bruit tel qu'il serait observé par le sonar, avec un temps d'intégration comparable à celui du système dont on veut prédire les performances.

La méthode décrite en <1>, et celle décrite ici se distinguent des autres méthodes <2,3> en ce qu'elles décomposent le bruit ambiant en plusieurs composantes: la première est le bruit provenant de sources discrètes à faible distance, et souvent mobiles (bateaux proches), la seconde est le bruit venant de sources plus lointaines et relativement stables en azimut (trafic lointain, ports, etc.), la troisième est un bruit plus diffus, comme le bruit engendré par le vent à la surface de la mer.

Le bruit des sources proches se décrit mieux par les statistiques de leur densité angulaire en fonction de l'azimut, de leurs ni-

UNE METHODE ITERATIVE POUR MESURER L'ANISOTROPIE HORIZONTALE
DU BRUIT AMBIANT SOUS-MARIN

veaux et vitesses angulaires. La mesure du bruit ambiant se décompose alors en une mesure de la directionnalité du bruit de fond stationnaire (seconde et troisième composantes) d'une part, et les statistiques des sources ponctuelles et mobiles durant la série de mesures d'autre part.

La technique WIT (Wagstaff Iterative Technique) décrite en <1> et la technique dérivée (NEWIT) ici présentée estiment les composantes stationnaires du bruit ambiant sous-marin en réjectant l'énergie provenant des bruiteurs non-stationnaires, comme le bateau remorqueur.

WIT calcule une estimée approximée de la directionnalité de la partie stationnaire du bruit ambiant. Par itérations successives, cette estimée est ensuite corrigée pour la rendre "compatible" avec les mesures: on simule les mesures sur l'estimée, et on la modifie pour minimiser l'écart quadratique moyen (en décibels) entre les niveaux de voies simulés et ceux mesurés.

L'examen des statistiques de niveaux des voies classiques <4> montre en effet que pour des temps d'intégration comme ceux des sonars classiques (B x T entre 5 et 50), une minimisation de l'erreur quadratique moyenne sur les niveaux de voies en décibels est plus proche du critère de maximum de vraisemblance que la même minimisation sur les puissances de voie.

La simulation des mesures sur le champ estimé se faisant par convolution, la levée d'ambiguïté s'accompagne donc d'une déconvolution. Le champ de bruit ainsi obtenu peut servir à prédire les mesures de niveaux de bruit "de fond" de voie pour une antenne quelconque, par simple convolution des directivités de cette antenne avec l'estimée (il faudra aussi tenir compte des bruiteurs discrets mobiles pour avoir le bruit de voie "complet").

Le problème de levée d'ambiguïté-déconvolution est un problème inverse qui peut admettre une infinité de solutions: WIT et NEWIT utilisent comme critère de sélection complémentaire la contrainte de "maximum d'entropie", qui consiste à choisir entre les solutions celle qui présente le moins de "structure", c'est-à-dire le champ de bruit le plus lisse compatible avec les mesures.

L'algorithme WIT utilise des polygones de 3 à 9 cotés, en général on utilise 9 cotés pour avoir un peu de redondance dans les mesures, et limiter les artefacts dûs aux sources non-stationnaires. Chaque côté dure 40 minutes, dont 30 nécessaires pour stabiliser l'antenne sur le nouveau cap, et 10 pour faire une série de 50 mesures successives de niveaux spectraux de voies à diverses fréquences.

Ces niveaux sont obtenus par FFT à deux dimensions, suivie de détection quadratique et conversion en décibels. Aux basses fréquences, une partie des voies obtenues ainsi ne perçoit pas le champ acoustique (voies virtuelles <5>) et l'algorithme WIT ne les utilise pas. Pour chaque côté du polygone, les séries temporelles des niveaux de voies sont

analysées pour obtenir de nombreuses statistiques: calcul des niveaux médians, autres quantiles, niveau moyen, niveau de puissance moyenne, variance, skew, kurtosis, et tests statistiques paramétriques et non-paramétriques qui permettent de contrôler la qualité des mesures et le bon fonctionnement de tout le système de mesure.

L'estimation de la directionnalité (en décibels) à partir des niveaux médians de voies (eux aussi en décibels) rend la méthode peu sensible au bruit des sources qui se sont ostensiblement déplacées pendant la durée du polygone, en particulier le bateau porteur qui change de cap avec l'antenne.

WIT utilise les niveaux médians des voies pointées dans l'espace réel, pour calculer une estimée du champ de bruit "instantané médian". la procédure utilisée ressemble à celle utilisée dans la méthode de déconvolution WB2 <4>, mais les corrections sont très approximatives. Les oscillations parasites de l'estimée qui en résultent sont supprimées par lissage, en perdant l'avantage de la déconvolution. L'omission des voies virtuelles, et aussi le fait que WIT utilise (pour épargner de l'espace mémoire) une directivité de plus en plus fausse lorsqu'on approche des directions "endfire", créent des erreurs dans l'estimée du champ au voisinage des caps des cotés du polygone (WB2 <4> a été développée pour remédier aux défauts de WIT, lorsque cette méthode était utilisée sur un seul côté, en simple déconvolution). NEWIT (NEW Iterative Technique) est une nouvelle version de WIT, qui généralise les "formules" de WB3 <6>, et utilise les niveaux des voies virtuelles, à la fois pour améliorer l'estimée du champ acoustique dans les directions voisines de "endfire", et pour estimer (et supprimer) le bruit propre incohérent de l'antenne. La description de l'algorithme sera suivie de quelques résultats sur des simulations, pour lesquelles la vraie directionnalité est connue.

L'ALGORITHME NEWIT

NEWIT est dérivé de l'algorithme WB3 décrit en <6>, pour résoudre le problème plus complexe de la reconstruction de la directionnalité horizontale du champ de bruit ambiant à partir des "images" floues, ambiguës et bruitées comme celles formées à l'aide d'une antenne linéaire remorquée sur une série de caps différents. NEWIT diffère de WB3 sur les points suivants:

NEWIT découpe le champ de bruit en tranches angulaires équidistantes, en fonction de l'azimut. Pour WB3, le découpage est fait sur l'espace des nombres d'onde, en sinus du gisement.

NEWIT estime le niveau du bruit propre incohérent du SONAR en moyennant le niveau de bruit des voies virtuelles, aux fréquences où elles existent, lorsque la longueur d'onde est supérieure à deux fois la distance entre hydrophones adjacents <5>. Une fois que son niveau a été estimé, le bruit propre (bruit d'écoulement ou électronique) est soustrait sur les voies "réelles", pour ne pas biaiser l'estimée du bruit ambiant.



UNE METHODE ITERATIVE POUR MESURER L'ANISOTROPIE HORIZONTALE
DU BRUIT AMBIANT SOUS-MARIN

L'utilisateur de NEWIT peut marquer les secteurs en gisement qui contiennent des sources de bruit parasite (bateau remorqueur ou autres navires proches), pour indiquer à l'algorithme de ne pas utiliser les voies qui reçoivent de l'énergie acoustique en provenance de ces secteurs.

Une autre option détecte automatiquement dans la série de mesures les voies, pour chaque coté du polygone, qui ont des niveaux anormalement élevés, et ne tient pas compte de ces voies pour le calcul de la directivité. Cela permet de minimiser les effets des passages de bruiteurs proches.

La méthode reste applicable aux fréquences élevées, pour lesquelles les voies ont des lobes-images. Les ambiguïtés dues à ces lobes-images sont traitées exactement comme les ambiguïtés droite-gauche. La version codée permet de "monter" à trois fois la fréquence ou apparaissent ces lobes-images.

La version de NEWIT décrite ici suppose que le bruit ambiant est concentré dans le plan horizontal, et que l'antenne utilisée pour les mesures est parfaitement horizontale. Si on sait que le bruit n'est pas concentré dans le plan horizontal, ou que l'antenne n'est pas horizontale, il est possible de modifier les diagrammes de directivité des voies pour en tenir compte, comme dans la version de WIT décrite en <7>.

Le champ de bruit acoustique est divisé en 360 cellules de un degré chacune, centrées sur les azimuts 1 à I = 360 degrés, et indexées par la variable i. Le polygone de mesures comporte L cotés, indexés par une variable l.

Pour chaque coté, on mesure N niveaux de voies, indexées par n. Une voie qui perçoit l'espace acoustique, même si elle est pointée au-delà des directions "endfire" et que seulement une partie du lobe de directivité se trouve dans l'espace réel, est cataloguée dans l'ensemble NR des voies réelles, et possède une directivité $R_{1,n,i}$ (exprimée en décibels) et une "largeur de bruit" (noise beamwidth) $BW_{1,n}$ exprimée en degrés. La largeur de bruit d'une voie est, par analogie avec la bande de bruit pour un filtre fréquentiel, la largeur qu'aurait une voie de forme parfaitement rectangulaire, sans lobes secondaires, qui aurait dans un champ de bruit isotrope, le même niveau que la voie:

$$BW_{1,n} = \sum_I 10 \frac{R_{1,n,i}}{10} \quad (\text{equ. 2})$$

Lorsque la voie ne perçoit pas l'espace réel <5>, elle est classée dans le sous-ensemble NV des voies virtuelles (N=NV+NR). Les voies virtuelles n'ont ni diagramme de directivité, ni largeur de bruit, leur niveau est utilisé pour évaluer le bruit propre SNL_1 de l'antenne pour chaque coté l du polygone de mesure:

$$SNL_1 = \frac{1}{NV} \sum_{NV} M_{1,n} \quad (\text{equ. 3})$$

$M_{1,n}$ est le niveau de la voie n, pour le coté l.

Si $F_{k,i}$ est l'estimée du niveau de bruit (en décibels) pour la direction i à la k-ième itération, les prédictions de niveau de voies $P_{1,n}(F_{k,i})$ pour toutes les voies réelles (n NR) sont données par:

$$P_{1,n} = 10 \log \left(10 \frac{SNL_1}{10} + \sum_I 10 \frac{F_{k,i} + R_{1,n,i}}{10} \right) \quad (\text{equ. 4})$$

L'algorithme permet, si l'utilisateur le désire, de marquer pour chaque coté du polygone les secteurs en gisement contaminés par le bateau remorqueur ou d'autres sources proches, pour que les voies qui perçoivent ces secteurs ne soient pas utilisées lors de l'évaluation du champ de bruit ambiant. Une autre option détecte les voies de niveau anormalement élevé et les élimine automatiquement. Les voies restantes font partie du sous-ensemble NU_1 (Nombre de voies Utilisées pour le coté l).

Comme WB3, NEWIT est une méthode itérative pour résoudre de façon approchée le système de contraintes:

$$\sum_I F_i \text{ maximum} \quad (\text{exp. 5})$$

$$\text{et:} \quad \sum_{L, NU_1} (M_{1,n} - P_{1,n}(F))^2 \text{ minimum} \quad (\text{exp. 6})$$

L'expression 5 est une mesure de l'entropie du champ F, l'expression 6 représente une minimisation d'erreur quadratique moyenne.

L'organigramme de NEWIT ressemble à celui de WB2, en Fig.1 de la référence <4>. La première estimée du champ de bruit est obtenue de façon légèrement différente, pour tenir compte du fait que toutes les voies n'ont pas la même largeur angulaire:

$$F_{0,i} = \frac{1}{3 L, NU_1} \text{ MIN } (M_{1,n} - R_{1,n,i}) + \frac{2}{3 L, NU_1} \text{ MIN } (M_{1,n} - R_{1,n,i} - 10 \log(BW_{1,n})) \quad (\text{equ. 7})$$

Le premier terme de l'expression 7 est une borne maximum pour les sources ponctuelles, le deuxième terme est "normalisé" par la largeur de bruit de chaque voie pour mieux estimer le bruit diffus. la moyenne pondérée par 1/3 et 2/3 de ces deux termes est un bon compromis de départ.

A chaque itération, on calcule les niveaux de voies qui correspondent au champ estimé $P_{1,n}(F_{k,i})$, et, à partir des différences entre les niveaux mesurés $M_{1,n}$ et ceux $P_{1,n}(F_{k,i})$ calculés on dérive les valeurs des corrections à l'estimée courante du champ:

$$F_{k+1,i} = F_{k,i} + \frac{\sum_L \sum_{NU_1} M_{n,i} \times (IMP_{1,n,i})^2}{\sum_L \sum_{NU_1} (IMP_{1,n,i})^2} \times W_i \quad (\text{equ. 8})$$



UNE METHODE ITERATIVE POUR MESURER L'ANISOTROPIE HORIZONTALE
DU BRUIT AMBIANT SOUS-MARIN

avec:

$$W_i = \min\left(1, \frac{IMP_i}{AVIMP_i}\right) \quad (\text{equ. 9})$$

et:

$$IMP_i = \sum_{L} \sum_{NU_i} IMP_{i,n,i} \quad (\text{equ. 10})$$

avec:

$$IMP_{i,n,i} = \frac{F_{k,i} + R_{i,n,i} - P_{i,n}}{10} \quad (\text{equ. 11})$$

et:

AVIMP_i = IMP_i pour un bruit ambiant isotrope (F_i = constante).

L'algorithme est arrêté après un nombre pré-déterminé d'itérations (6 pour les exemples de cet article), ou lorsque l'erreur moyenne quadratique:

$$\sum_{L} \sum_{NU_i} (M_{i,n} - P_{i,n}(F_k))^2 \quad (\text{exp. 12})$$

cesse de décroître, si cela se produit avant le nombre maximum d'itérations.

RESULTATS

Pour les simulations qui suivent, l'antenne est de 64 hydrophones, séparés d'une demi-longueur d'onde à 750 Hz, et on forme 128 voies (par FFT), pour chaque coté d'un polygone régulier de 9 cotés à 4 fréquences différentes: 150, 300, 750, and 1000 Hz. On peut ainsi tester l'algorithme sur des voies très larges (150 Hz, ouverture 6.4), de largeur moyenne (300 Hz, ouverture 12.8), des voies fines (750 Hz, ouverture 32), et des voies ultra-fines avec lobes-images (1000 Hz, ouverture 43). Dans ces exemples, le bruit propre est simulé à un niveau de 20 dB sur toutes les voies (bruit incohérent). Les voies virtuelles ont donc un niveau de 20 dB, et les voies réelles sont calculées à l'aide de l'équation 4, sans erreur d'estimation.

Le champ de test utilisé pour la plupart des exemples est illustré en figure 3 (courbe du haut). Ce champ est composé d'un "fond" légèrement anisotrope (6dB entre Nord et Sud), et de 7 sources de niveaux et positions variables: ces sources restent stationnaires (en niveau et en azimuth), durant les mesures sur 9 "cotés".

Les mesures de niveau de voies à la fréquence de 750 Hz sont représentées sur les courbes du milieu, avec les niveaux des voies en ordonnée et leurs angles de pointage en abscisse: chaque voie a, du fait de l'ambiguïté droite-gauche, deux angles de pointage symétriques par rapport à l'axe du "coté".

La courbe du bas présente l'estimée fournie par NEWIT après six itérations, l'erreur quadratique moyenne résiduelle est de 0,34 dB, et l'estimée ressemble bien au champ de test, les ambiguïtés sur les sources ponctuelles sont résolues, l'estimée du bruit de fond s'écarte du champ réel de moins de 2 dB, l'écart maximum se trouve dans le secteur Sud, là où le bruit est minimum, et où par

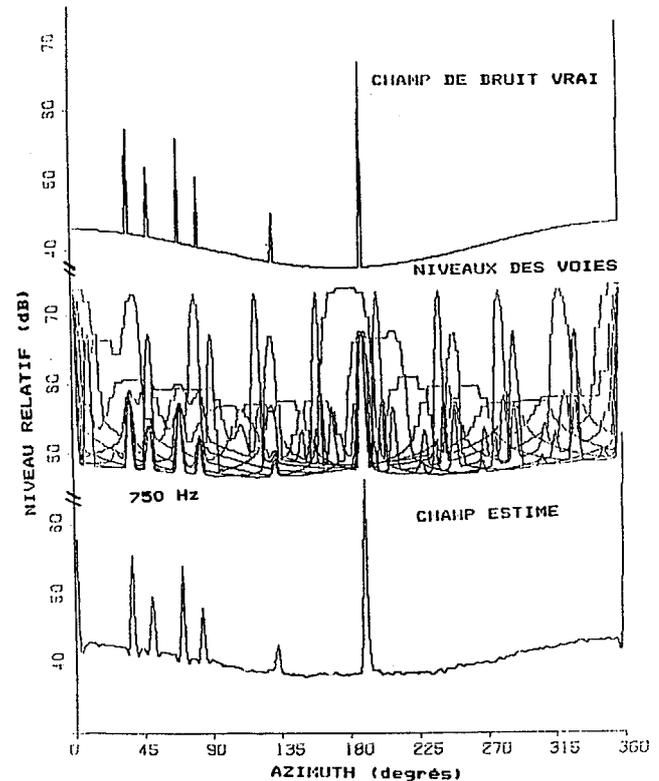


Fig.3 champ de test, mesures et estimée à 750 Hz.

conséquent les mesures classiques apportent très peu d'information sur son niveau exact. L'écart est positif (niveau estimé supérieur au niveau réel), c'est dû la contrainte d'entropie maximum.

La figure 4 représente les mesures classiques sur le même champ de test à 300 et 150 Hz, et les estimées correspondantes. La résolution décroît avec la fréquence, mais les ambiguïtés sont toujours résolues. La résolution de NEWIT reste aussi supérieure à celle des mesures classiques.

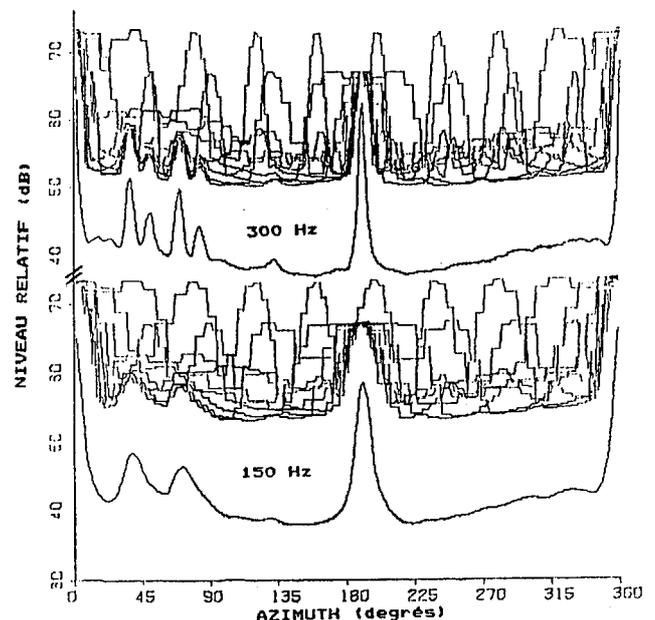


Fig.4 mesures et estimées à 300 Hz et 150 Hz.



UNE METHODE ITERATIVE POUR MESURER L'ANISOTROPIE HORIZONTALE
DU BRUIT AMBIANT SOUS-MARIN

La figure 5 correspond à un problème plus réaliste, pour lequel les mesures classiques sont "polluées" par le bruit du bateau porteur. Celui-ci est représenté dans notre modèle comme une source (de niveau 73 dB) qui tourne avec l'antenne, à six degrés de site et sur la même course que l'antenne. Le champ de test est le même que pour les exemples précédents. En comparant les mesures de niveau des voies à celles de la figure 3, on constate que la présence du bateau porteur distord considérablement les mesures. L'estimée du champ obtenue sans "écarter" les voies contaminées par le bateau porteur est pratiquement indiscernable de celle en figure 3, mais après les six itérations l'erreur quadratique moyenne est de 2,43 dB, au lieu de 0,34 dB.

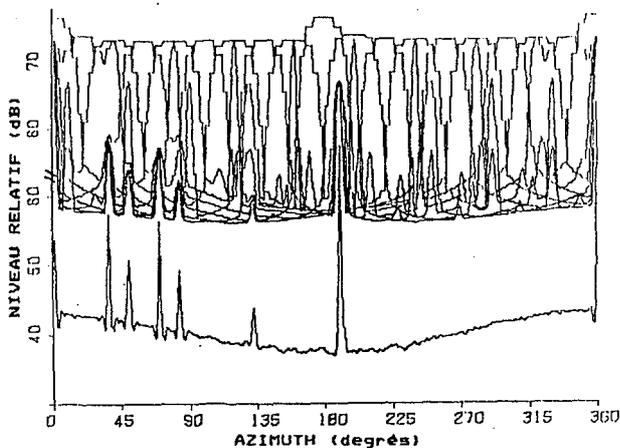


Fig.5 mesures et estimée à 750 Hz,
avec bateau remorqueur bruyant

La figure 6 montre le même test à 300 Hz. Ici la largeur des voies classiques est contaminé par le bruit du bateau porteur (courbes du haut), et il faut écarter les voies contaminées pour obtenir une estimée aussi bonne qu'en figure 4 (courbe du bas, la courbe du milieu est l'estimée obtenue en utilisant toutes les voies).

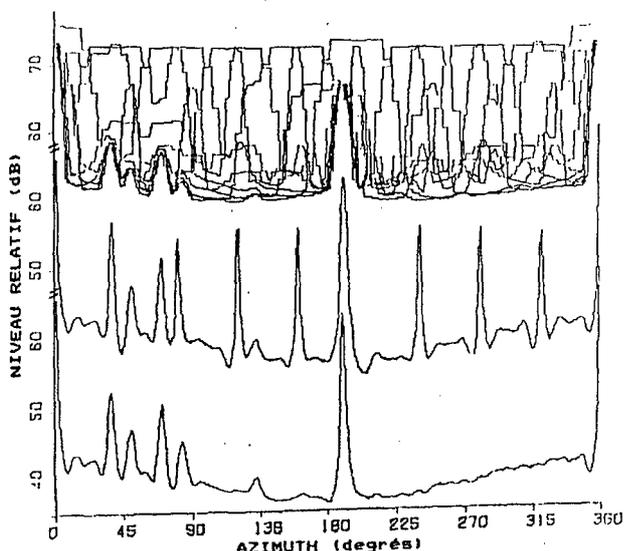


Fig.6 mesures et estimées à 300 Hz,
avec bateau remorqueur bruyant

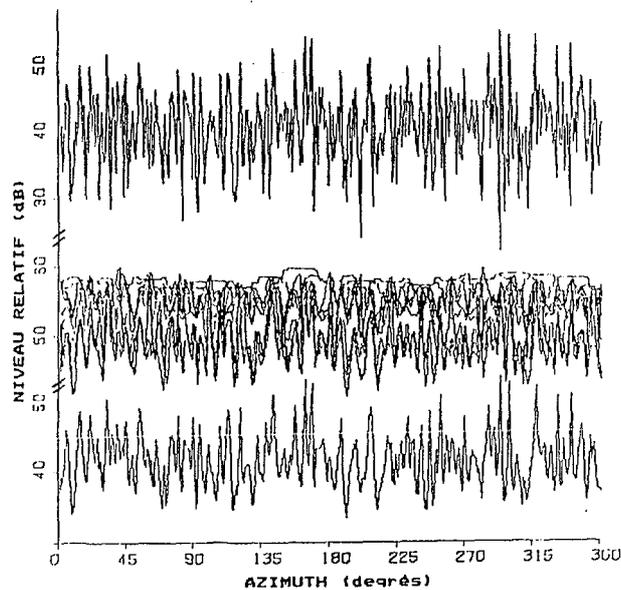


Fig.7 champ de bruit très "structuré",
mesures à 1000 Hz, et estimée.

Le dernier exemple, en figure 7, montre un champ de bruit stationnaire très "structuré" (courbe du haut), les mesures classiques sur 9 cotés à 1000 Hz (courbes du milieu), et l'estimée de NEWIT (courbe du bas). L'algorithme résout très bien les ambiguïtés sur ce test compliqué: la plupart des "sources" sont perçues dans la bonne direction, il n'y a aucune "fausse alarme", et les "trous" sont proprement lissés comme le veut la contrainte d'entropie maximum.

CONCLUSIONS

NEWIT permet d'estimer la directionnalité du bruit ambiant à partir de plusieurs mesures faites sur des azimuts différents avec une antenne linéaire remorquée. Les simulations présentées démontrent les capacités originales de cette méthode non-linéaire à résoudre des problèmes pratiques comme la "pollution" des mesures par des bruiteurs puissants et mobiles. La "robustesse" de la méthode par rapport à ces bruiteurs permet des mesures rapides du bruit ambiant, même avec un bateau porteur bruyant. La levée d'ambiguïté est accompagnée d'une déconvolution des directivités de voies classiques, ce qui donne à la méthode des performances haute-résolution. La méthode est d'un emploi facile, sans calculs compliqués, et peut être aussi appliquée à des antennes quelconques, à condition de connaître les directivités des voies dont on mesure les niveaux.

REFERENCES

- <1>WAGSTAFF R.A. JASA 63-3 1978 pp863-869
- <2>NUTTALL A.H. NUSC TR 4385, 1972.
- <3>WILSON J.H. JASA 60-4 1976 pp955-960
- <4>BERROU J.L, BOULON P. GRETSI 1983 pp 1015-1021
- <5>BERROU J.L. WAGSTAFF R.A. ICASSP 1982 Paris, pp 811-814.
- <6>BERROU J.L, SANDKULHER U. GRETSI 85
- <7>WAGSTAFF R.A. JASA 67,1980 pp1287-1294