

HUITIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

613



NICE du 1^{er} au 5 JUIN 1981

COHERENCE SPATIALE D'UNE SURFACE D'ONDE ET DU BRUIT DE FOND
EN EAU PEU PROFONDE *

SPATIAL COHERENCE OF A WAVEFRONT AND OF BACKGROUND NOISE IN A SHALLOW
WATER ENVIRONMENT *

A. PLAISANT et G. BIENVENU

THOMSON - C.S.F, Division A.S.M., Chemin des Travails - 06802 Cagnes-sur-Mer - France

RESUME

La connaissance de la cohérence spatiale d'une surface d'onde issue d'une source ponctuelle après propagation dans le milieu ainsi que celle du bruit de fond, peut être exploitée dans des traitements d'antenne performants. On présente des résultats expérimentaux obtenus sur un réseau linéaire horizontal fixe de 12 capteurs en zone petit fond. La cohérence spatiale des signaux reçus est mesurée par l'intermédiaire des propriétés des valeurs et vecteurs propres de la matrice des densités spectrales croisées. Dans le cas d'une source seule parfaitement cohérente, et si le bruit est incohérent sur les capteurs, cette matrice est de rang 1, et le vecteur propre correspondant à la valeur propre maximum coïncide avec le vecteur direction de la source. On analyse les propriétés du module et de la phase des composantes de ce vecteur propre qui montrent une déformation des surfaces d'onde, ainsi que celles du rapport de la plus grande valeur propre à la seconde. Dans le cas de la cohérence du bruit de fond seul, on montre la répartition des valeurs propres et on évalue les qualités d'un modèle pour la matrice des densités spectrales basé sur une répartition anisotrope de bruiteurs en surface.

SUMMARY

The knowledge of the spatial coherence of a sound wave produced by a point source after propagation in the underwater medium and the coherence of the background noise can be used to improve array processing. Experimental results concerning horizontal coherence in a shallow water area are presented. Horizontal coherence, observed with a 12 hydrophone array, is measured through the properties of the eigenvalues and eigenvectors of the spectral density matrix. If only one perfectly coherent source is present and if the background noise is incoherent on the sensors, this matrix is of rank 1 and the eigenvector associated with the highest eigenvalue indicates the source direction. The values of the ratio of the highest eigenvalue to the second one, are examined and statistics are made on the components of the "highest" eigenvector, indicating small deformation of the wavefront. A simple model for horizontal coherence of background noise based on a surface distribution of noise sources with anisotropy both in the vertical and horizontal direction, is tested against experimental results.

* Etude financée par la DRET (Paris - France)

* Work sponsored by DRET, Paris, France



1. - INTRODUCTION.

Le domaine des traitements d'antenne en écoute passive sous-marine s'est enrichi ces dernières années de nouvelles techniques qui présentent l'intérêt de posséder un pouvoir de résolution asymptotique infini ([1 à 4]). Cela veut dire que leur pouvoir séparateur n'est fonction que du temps d'observation, dans un contexte stationnaire bien sûr. Cependant, pour parvenir à une telle propriété, ces méthodes s'appuient sur un modèle du champ de bruit plus élaboré que les méthodes utilisées jusqu'à présent : formation de voies classique et antenne adaptative, qui ont, elles, un pouvoir de résolution asymptotique limité par le rapport signal à bruit des sources. Elles utilisent les mêmes hypothèses que les méthodes classiques pour les sources, mais elles font une hypothèse sur le bruit de fond alors que les méthodes classiques n'en font aucune. C'est cette hypothèse supplémentaire qui permet d'obtenir un pouvoir de résolution asymptotique infini.

Le modèle utilisé peut être brièvement décrit de la façon suivante :

- Les sources sont ponctuelles, parfaitement cohérentes spatialement, la forme des surfaces d'onde reçues est une fonction connue de la position des sources (les fonctions de transfert des capteurs sont supposées connues), et leur nombre N est inférieur à celui K des capteurs de réception ;
- La cohérence spatiale du bruit de fond est une fonction connue de paramètres inconnus [4].

Il est donc apparu nécessaire d'effectuer des mesures en mer afin de juger de la qualité du modèle et, par la suite, de l'améliorer. On présente dans cette conférence les résultats obtenus lors d'une première expérience dans un site assez particulier puisque par petit fond et très près de la côte.

2. - PROPRIETES DE LA MATRICE DES DENSITES SPECTRALES.

Les méthodes hautes résolutions sont basées sur la décomposition en vecteurs et valeurs propres de la matrice des densités spectrales des signaux reçus $\Gamma(f)$. On rappelle ici ses propriétés essentielles. On peut écrire :

$$\Gamma(f) = \Gamma_S(f) + \Gamma_B(f)$$

où f est la fréquence, $\Gamma_S(f)$ la matrice des densités spectrales des sources seules, et $\Gamma_B(f)$ celle du bruit de fond.

Supposons le bruit de fond indépendant entre les capteurs ; il vient :

$$\Gamma_B(f) = \sigma(f)I$$

I , matrice unité, est la matrice de cohérence spatiale du bruit de fond ; $\sigma(f)$, sa densité spectrale est inconnue.

Les sources étant parfaitement cohérentes spatialement, le signal reçu d'une source est identique sur tous les capteurs à un filtrage linéaire près, et connu puisque la forme de la surface d'onde est connue. On peut donc écrire :

$$\Gamma_S(f) = \sum_{n=1}^{N < K} \gamma_n(f) \vec{D}_n(f) \vec{D}_n^+(f)$$

où $\gamma_n(f)$ est la densité spectrale de la n ième source et $\vec{D}_n(f)$ son vecteur direction constitué des filtres linéaires précédents qui sont assimilables dans le cas général à des retards purs. On montre que :

$$\Gamma(f) = \sigma(f) I + \sum_{n=1}^{N < K} \gamma_n(f) \vec{D}_n(f) \vec{D}_n^+(f)$$

a les propriétés suivants : elle possède :

- $(K-N)$ valeurs propres minimales égales à $\sigma(f)$; les vecteurs propres correspondants sont orthogonaux aux vecteurs direction des sources $\vec{D}_n(f)$
- N valeurs propres égales à : $\lambda_n(f) + \sigma(f)$ où les $\lambda_n(f)$ sont les valeurs propres non nulles de $\Gamma_S(f)$ et les vecteurs propres correspondants $\vec{V}_n(f)$ sont aussi vecteurs propres de $\Gamma_S(f)$

Ces vecteurs propres sont liés aux vecteurs direction des sources par :

$$\sum_{n=1}^N \gamma_n(f) \vec{D}_n(f) \vec{D}_n^+(f) = \sum_{n=1}^N \lambda_n(f) \vec{V}_n(f) \vec{V}_n^+(f)$$

Si le bruit de fond n'est pas incohérent entre les capteurs, on sait se ramener au cas précédent, même si sa cohérence spatiale n'est pas parfaitement connue [3] [4].

3. - ETUDE DES SURFACES D'ONDE DES SOURCES.

Dans le cas particulier d'une source seule dans le milieu, la matrice des densités spectrales est de rang un et le vecteur propre qui correspond à la valeur propre non nulle est égal au vecteur direction de la source. Donc la mesure de ce vecteur propre donne une mesure de la surface d'onde. Si la source n'est pas parfaitement cohérente spatialement, d'autres valeurs propres non nulles apparaissent. Dans le cas où le bruit de fond comporte en outre un bruit de fond incohérent,



COHERENCE SPATIALE D'UNE SURFACE D'ONDE ET DU BRUIT DE FOND EN EAU PEU
PROFONDE
SPATIAL COHERENCE OF A WAVEFRONT AND OF BACKGROUND NOISE IN A SHALLOW
WATER ENVIRONMENT

le vecteur propre qui correspond à la valeur propre maximum, et que l'on appellera vecteur propre maximum, est encore égal au vecteur direction de la source. L'effet de la décohérence de la source sur les valeurs propres est bien sûr plus difficile à voir : on le verra d'autant mieux que le rapport signal à bruit est plus grand. Si de plus le bruit de fond n'est pas incohérent, ses valeurs propres ne sont plus égales, et les propriétés ci-dessus seront d'autant plus vraies que le rapport signal à bruit est plus grand.

Il est donc nécessaire pour l'étude des surfaces d'onde reçues des sources, d'effectuer des mesures à fort signal à bruit, donc sur des bâtiments à faible distance.

3.1. Conditions expérimentales et traitements effectués.

Le récepteur est un réseau linéaire d'hydrophones fixe et horizontal, immergé par 40 mètres de fond à une distance d'environ 6 m de celui-ci. Le réseau est constitué de 12 capteurs régulièrement espacés de 1,04 m. La source de signal est le bruit des machines d'un remorqueur au point fixe, c'est-à-dire hélices stoppées, situé à une distance de 400 à 800 m du réseau ; la profondeur du fond au niveau de la source est d'environ 60 m.

L'étude de la cohérence spatiale des surfaces d'onde se fait à l'aide de la matrice des densités spectrales croisées estimée pour une fréquence donnée en fonction des paramètres résolution en fréquence et nombre de spectre intégrés (temps total d'intégration).

Les signaux reçus sur les 12 capteurs sont donc découpés en tranches temporelles élémentaires, de durée T, sans pondération d'amplitude. On prend par convention, la résolution en fréquence Δf égale à $1/T$. Une analyse de Fourier permet de calculer les densités spectrales croisées pour chaque tranche élémentaire. L'estimée $\hat{\Gamma}(f)$ de $\Gamma(f)$ est ensuite obtenue par moyennage sur N tranches temporelles successives, ce qui correspond à un temps total d'intégration de $T_{\text{tot}} = NT = N/\Delta f$. On effectue ensuite une "normalisation" de $\hat{\Gamma}(f)$, c'est-à-dire qu'on calcule la matrice $\hat{\Gamma}'(f)$ dont les éléments sont égaux à :

$$\hat{\Gamma}'_{ij} = \frac{\hat{\Gamma}_{ij}}{\sqrt{\hat{\Gamma}_{ii} \cdot \hat{\Gamma}_{jj}}}$$

L'effet de cette normalisation est d'égaliser les gains des capteurs. Après normalisation, la matrice des densités spectrales a ses éléments diagonaux égaux à 1. C'est sur cette matrice qu'on effectue la décomposition en vecteurs et valeurs propres.

On se propose ici d'étudier les surfaces d'onde ; il faut donc minimiser l'effet du bruit de fond. Les fréquences de travail choisies pour chaque point fixe sont celles qui correspondent aux rapports signal sur bruit les plus élevés.

3.2. Diagrammes d'antenne.

On a voulu voir si, dans le cas d'une source seule, le vecteur propre maximum \vec{v}_{max} de $\hat{\Gamma}'(f)$ (on travaille sur les matrices normalisées) a bien la même direction que le vecteur source. Pour cela, on a tracé le diagramme d'antenne classique, c'est-à-dire la fonction :

$$\gamma_c(\theta) = \vec{D}_\theta^+ \hat{\Gamma}' \vec{D}_\theta \quad \text{où } \vec{D}_\theta = \begin{pmatrix} e^{-2\pi j f r} \\ \vdots \\ e^{-2\pi j k f \tau} \end{pmatrix} \text{ est le vecteur}$$

direction en supposant que la surface d'onde est un plan, et la fonction obtenue en remplaçant la matrice $\hat{\Gamma}'$ par la matrice $(\vec{v}_{\text{max}} \vec{v}_{\text{max}}^+)$ qui est la réduction de $\hat{\Gamma}'$ à la seule contribution de la source, soit :

$$\gamma_{vm}(\theta) = |\vec{D}_\theta^+ \vec{v}_{\text{max}}|^2$$

Ces deux fonctions sont présentées sur les Fig. 1 et 2 qui correspondent à deux positions de la source différentes et à deux fréquences différentes. La coïncidence entre $\gamma_c(\theta)$ et $\gamma_{vm}(\theta)$ dans la même direction montre que \vec{v}_{max} indique bien la direction de la source quand celle-ci est unique.

3.3. Répartition des valeurs propres.

La Figure 3 montre la répartition des 12 valeurs propres de Γ' en fonction du temps pour une séquence de durée environ 4 minutes. Le temps d'intégration est de 3,28 s pour une résolution de 19,53 Hz, c'est-à-dire que l'estimée $\hat{\Gamma}'$ de Γ' a été calculée par moyennage de 64 matrices élémentaires. La séquence présentée sur la Fig. 3 correspond à un rapport signal sur bruit sur un capteur estimé à 22 dB. La valeur propre maximum est donc nettement plus forte que les autres.



COHERENCE SPATIALE D'UNE SURFACE D'ONDE ET DU BRUIT DE FOND EN EAU
PEU PROFONDE
SPATIAL COHERENCE OF A WAVEFRONT AND OF BACKGROUND NOISE IN A SHALLOW
WATER ENVIRONMENT

3.4. Visualisation des surfaces d'onde à partir des composantes de \vec{V}_{\max} .

Dans le but de découvrir une éventuelle déformation systématique des surfaces d'onde, on a relié entre elles les phases des 12 composantes successives du vecteur propre maximum \vec{V}_{\max} . On se souvient qu'en présence d'une source seule et de bruit de fond décorrélé, ce vecteur propre est colinéaire au vecteur direction de la source. On obtient ainsi, comme le montrent les Figures 4, 5 et 6, des lignes brisées très proches d'une droite dont la pente est liée à la fréquence et au dépointage de la source.

On voit sur les Figures 4 et 5 qui correspondent à des points fixes différents et à des fréquences différentes, que le dépointage de la source varie légèrement entre le début et la fin de la séquence exploitée qui dure ici 60 secondes (faible dérive du bateau source).

Pour mieux visualiser les déformations, on a tracé sur les mêmes figures les écarts de phase par rapport à l'écart de phase moyen entre composantes, avec indication de l'écart quadratique moyen obtenu sur les 36 matrices successives analysées dans la séquence. Les figures 4 et 5 montrent que les déformations des surfaces d'onde par rapport au plan ont un caractère systématique et qu'elles sont différentes pour les deux cas analysés. Ce fait est confirmé par la Figure 6 où on a fait varier le temps d'intégration de 1,64 à 26,24 s pour l'estimation des matrices à diagonaliser. On voit que les écarts de phase ne s'atténuent pas quand le temps d'intégration augmente, ce qu'ils devraient faire si ces écarts étaient aléatoires.

On constate donc que les surfaces d'onde représentées à partir de \vec{V}_{\max} ne sont pas parfaitement planes (ou d'ailleurs sphériques) mais que les écarts au plan d'onde ne sont pas très importants.

3.5. Statistiques sur λ_{\max}/λ_2 et \vec{V}_{\max} . Influence des différents paramètres.

Les différents paramètres étudiés sont : le temps total d'intégration, le rapport signal sur bruit, la résolution en fréquence et le dépointage de la source. On s'intéresse ici particulièrement au rapport λ_{\max}/λ_2 de la plus grande valeur propre à la seconde et aux composantes de \vec{V}_{\max} , le vecteur propre correspondant à λ_{\max} . On a calculé l'écart type sur le module (σ_0) et la phase (σ_ϕ) des 12 composantes de \vec{V}_{\max} .

Pour un signal parfaitement cohérent et un bruit de fond indépendant entre les capteurs, le rapport λ_{\max}/λ_2 est lié au rapport signal sur bruit par :

$$\lambda_{\max}/\lambda_2 \text{ th} = 1 + K(S/B)_{\text{lin}}$$

Si le signal est partiellement incohérent, ou que la matrice Γ est mal estimée, on devrait obtenir un rapport inférieur à la valeur théorique.

Pour essayer de séparer les effets dus à la perte de cohérence éventuelle du signal source des effets dus aux erreurs d'estimation de Γ , on a procédé à une simulation sur ordinateur où le signal source était parfaitement cohérent et le bruit de fond parfaitement indépendant entre les capteurs. Les écarts entre les résultats obtenus par simulation et les valeurs expérimentales obtenues pour les mêmes paramètres, donnent une idée sur la façon dont les pertes de cohérence dues au milieu se traduisent sur λ_{\max}/λ_2 et sur \vec{V}_{\max} .

Les résultats obtenus sont présentés sur les tableaux suivants :

- Tableau 1 : correspond au point fixe 5 - distance de la source au centre du réseau environ 450 m. Dépointage variant de 42° à 45° en fin de séquence de 4 mn
- Tableau 2 : correspond au point fixe n° 6 - distance de la source au centre du réseau environ 780 m ; dépointage variant de 17° à 19° en fin de séquence de 4 mn
- Tableau 3 : Correspond au point fixe n° 6 - influence de la résolution en fréquence et du dépointage de la source.

On note sur ces tableaux que les valeurs de λ_{\max}/λ_2 obtenues par simulation sont systématiquement inférieures aux valeurs théoriques lorsque la source est dépointée : cela est un effet normal dû au dépointage de la source qui introduit un biais dans l'estimation de $\Gamma(f)$ d'autant plus grand que le dépointage est plus grand [5]

Qualité de l'estimation de la matrice Γ :

Effet du temps total d'intégration :

Cet effet est difficile à observer expérimentalement à cause des fluctuations rapides de S/B observées qui entraînent des fluctuations importantes du rapport λ_{\max}/λ_2 . L'étude en simulation permet de voir que l'augmentation du temps d'intégration améliore la qualité de la mesure de λ_{\max}/λ_2 . L'écart type de l'erreur relative par rapport à la valeur théorique ainsi que le biais (toujours négatif, c'est-à-dire que λ_{\max}/λ_2 simul

COHERENCE SPATIALE D'UNE SURFACE D'ONDE ET DU BRUIT DE FOND EN EAU
PEU PROFONDE
SPATIAL COHERENCE OF A WAVEFRONT AND OF BACKGROUND NOISE IN A SHALLOW
WATER ENVIRONMENT

est toujours inférieur à λ_{\max}/λ_2 théorique) diminuent quand T_{tot} augmente.

Point fixe 5 $\Delta f = 9,77$ Hz $T_{\text{tot}} = 52,4$ s Dépointage $\theta = 42$ degrés		
\hat{S}/\hat{B}	Fréquence	Fréquence
	390 Hz	660 Hz
	15 dB	8 dB
λ_{\max}/λ_2 théorique	380	77
λ_{\max}/λ_2 simulation dép. = 27°5	89	50
$\hat{\lambda}_{\max}/\hat{\lambda}_2$ expérimental	46,3	7,9
σ_{ρ} théorique	0%	0%
σ_{ρ} simulation dép. = 27,5°	0,3%	0,4%
$\hat{\sigma}_{\rho}$ expérimental	0,89%	3,58%
σ_{φ} théorique	0°	0°
σ_{φ} simulation dép. = 27°5	0,7°	1,3°
$\hat{\sigma}_{\varphi}$ expérimental	5,9°	9,6°

TABLEAU 1

Point fixe 6 $\Delta f = 9,77$ Hz $T_{\text{tot}} = 26,2$ s Dépointage $\theta = 18^\circ$					
Fréquence (Hz)	360	490	610	710	760
\hat{S}/\hat{B}	8 dB	12 dB	22 dB	18 dB	15 dB
λ_{\max}/λ_2 théor.	77	191	1903	758	380
λ_{\max}/λ_2 simul. $\theta = 27,5^\circ$	43	71	125	106	113
$\hat{\lambda}_{\max}/\hat{\lambda}_2$ exp.	13	17,2	89,9	132,5	66,1
σ_{ρ} théor.	0%	0%	0%	0%	0%
σ_{ρ} simul. $\theta = 27,5^\circ$	0,56%	0,37%	0,29%	0,33%	0,31%
$\hat{\sigma}_{\rho}$ exp.	3,27%	2,28%	0,57%	0,33%	0,65%
σ_{φ} théor.	0°	0°	0°	0°	0°
σ_{φ} simul. $\theta = 27,5^\circ$	1,72°	0,96°	0,53°	0,53°	0,78°
$\hat{\sigma}_{\varphi}$ exp.	3°	4,5°	3,7°	4,3°	6,8°

TABLEAU 2

Effet du rapport signal sur bruit :

On observe que quand la source est dépointée, plus S/B est grand, plus λ_{\max}/λ_2 est sous-estimé par rapport à sa valeur théorique.

Effet de la résolution en fréquence :

Quand la source est dépointée, plus la résolution en fréquence est grande (c'est-à-dire les tranches temporelles élémentaires courtes), plus λ_{\max}/λ_2 est sous-estimée. Pour un signal dans l'axe, la qualité des mesures de λ_{\max}/λ_2 et \hat{V}_{\max} augmente avec la résolution car le nombre de spectres élémentaires intégrés est proportionnel à Δf .

Point fixe 6 Fréquence = 610 Hz $T_{\text{tot}} = 26,2$ s Dépointage source $\theta = 18^\circ$ $\hat{S}/\hat{B} = 22$ dB					
$\Delta f = 1/T$ (Hz)	2,44	4,88	9,77	19,53	39,06
λ_{\max}/λ_2 théor.	1903	1903	1903	1903	1903
λ_{\max}/λ_2 simul. $\theta = 27,5^\circ$	490	235	125	64	37
λ_{\max}/λ_2 simul. $\theta = 0^\circ$	1292	1484	1835	1845	2087
$\hat{\lambda}_{\max}/\hat{\lambda}_2$ exp.	125,3	105,5	89,9	70,5	46,3
σ_{ρ} théor. (%)	0%	0%	0%	0%	0%
σ_{ρ} simul. $\theta = 27,5^\circ$	0,07%	0,14%	0,29%	0,59%	1,03%
σ_{ρ} simul. $\theta = 0^\circ$	0,032%	0,020%	0,013%	0,010%	0,008%
$\hat{\sigma}_{\rho}$ exp.	0,35%	0,31%	0,28%	0,30%	0,57%
σ_{φ} théor. (°)	0°	0°	0°	0°	0°
σ_{φ} simul. $\theta = 27,5^\circ$	0,45	0,45	0,53	0,63	0,82
σ_{φ} simul. $\theta = 0^\circ$	0,39	0,33	0,32	0,20	0,12
$\hat{\sigma}_{\varphi}$ exp.	3,7	3,6	3,7	3,7	3,8

TABLEAU 3

Effet du dépointage de la source :

Cet effet est prépondérant quand S/B est grand. Le phénomène qui intervient est le suivant : quand la source est dépointée par rapport à l'axe acoustique du réseau, les tranches temporelles cohérentes de signal sont retardées d'un capteur à l'autre ; il y aura donc une partie du signal non corrélé d'autant plus importante que la durée T de la tranche temporelle est courte, c'est-à-dire que la résolution Δf est grande. Le dépointage de la source entraîne une réduction importante de λ_{\max}/λ_2 par rapport à sa valeur théorique, d'autant plus que S/B et Δf sont grands.

Pertes de cohérence dues au milieu :

On peut apprécier ces pertes en comparant dans les tableaux 1 à 3 les résultats expérimentaux aux résultats obtenus par simulation. Le milieu entraîne une réduction du rapport λ_{\max}/λ_2 qui peut être importante ; par contre la dispersion des composantes du vecteur propre maximum qui représente la source reste faible : écart type sur le module inférieur à 0,5% (matrices normalisées) écart type sur la phase inférieur à 4° à 610 Hz.



COHERENCE SPATIALE D'UNE SURFACE D'ONDE ET DU BRUIT DE FOND EN EAU
 PEU PROFONDE
 SPATIAL COHERENCE OF A WAVEFRONT AND OF BACKGROUND NOISE IN A SHALLOW
 WATER ENVIRONMENT

4. - COHERENCE SPATIALE DU BRUIT DE FOND.

On présente ci-dessous les résultats obtenus à partir d'une séquence de bruit de fond de durée 4 mn correspondant à un état de mer de force 4 à 5 en l'absence de trafic proche. Pour l'analyse du bruit de fond seul, on n'a pas fait l'opération de "normalisation" comme pour les points fixes ; on a voulu conserver la notion d'amplitude sur chaque capteur ; d'autre part on a aussi effectué une pondération de Hanning sur les tranches temporelles élémentaires de durée T analysée ce qui a pour effet d'abaisser les lobes secondaires de la fenêtre temporelle en élargissant le lobe principal. Par convention, on appelle toujours résolution en fréquence la quantité $\Delta f = 1/T$

4.1. Directivité en gisement du bruit de fond.

Sur la Fig. 7 on a présenté la répartition du niveau de bruit en fonction du gisement en sortie d'une formation de voie classique, pour deux fréquences 290 Hz et 720 Hz. On voit que pour 290 Hz, le bruit de fond ne peut pas être considéré comme isotrope dans un plan horizontal à cause de la dissymétrie du niveau mesuré par rapport à l'axe du réseau. A 720 Hz, l'anisotropie horizontale est très peu marquée.

4.2. Répartition des valeurs propres.

Le tableau 4 donne les valeurs numériques des 12 valeurs propres de la matrice Γ correspondant à une tranche de signal de 3,28 s en début de séquence.

$T_{\text{int}} = 3,28 \text{ s}$ $\Delta f = 9,77 \text{ Hz}$ - Bruit n° 7			
Fréquence	290 Hz	580 Hz	720 Hz
d/λ	0,193	0,387	0,480
valeur propre			
n° 1	4,656	2,871	2,485
2	3,505	2,547	1,741
3	1,997	1,643	1,556
4	1,097	1,430	1,243
5	0,487	1,110	1,039
6	0,202	0,823	0,972
7	0,045	0,590	0,860
8	$8,099 \cdot 10^{-3}$	0,403	0,629
9	$1,407 \cdot 10^{-3}$	0,265	0,508
10	$4,212 \cdot 10^{-4}$	0,247	0,446
11	$3,612 \cdot 10^{-4}$	0,067	0,330
12	$2,391 \cdot 10^{-4}$	$5,261 \cdot 10^{-3}$	0,192

TABEAU 4

Le fait que les plus petites valeurs propres soient très petites pour les basses fréquences ne signifie pas forcément que les matrices Γ soient de rang inférieur à 12 ; le phénomène que l'on observe ici n'est pas lié aux caractéristiques du milieu mais à l'échantillonnage spatial imposé par la taille du réseau. En effet, le champ de bruit est caractérisé par la corrélation qui existe entre deux points de l'espace ; cette corrélation s'affaiblit quand la distance entre les deux points augmente.

Si les paramètres sont tels (fréquence suffisamment basse et réseau petit) que tous les capteurs se trouvent à une distance inférieure à $\lambda/2$ en présence d'un bruit de volume supposé isotrope, on trouvera une bonne corrélation entre toutes les paires de capteurs et on aura ainsi une idée fautive du champ de bruit ; dans ce cas on observera une grande dispersion des valeurs propres. A la limite, si la taille du réseau est très inférieure à $\lambda/2$, on aura le même signal sur tous les capteurs, c'est-à-dire une situation identique à celle d'une source cohérente qui se traduit par une seule valeur propre différente de zéro.

Si au contraire l'espace est sous-échantillonné, c'est-à-dire que la distance entre capteurs est grande par rapport à $\lambda/2$, on ne verra que des bruits non corrélés et les valeurs propres seront toutes égales (en l'absence d'erreur d'estimation de Γ).

Les dispersions des valeurs propres observées sont du même ordre de grandeur que celles des valeurs propres théoriques obtenus à partir de modèles de bruit de fond isotropes [3].

Pour vérifier que la qualité de l'estimation de Γ n'était pas responsable de la dispersion des valeurs propres observées à 290 Hz, on a augmenté le temps d'intégration, l'estimation de Γ étant meilleure pour des temps d'intégration élevés. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5 et on voit que la dispersion varie peu quand T_{int} passe de 3,28 à 52,43 s.

Bruit n° 7, fréquence 290 Hz, $\Delta f = 9,77 \text{ Hz}$			
T_{int}	3,28 s	13,11 s	52,43 s
λ_1	4,656	4,452	4,901
λ_2	$2,391 \cdot 10^{-4}$	$5,164 \cdot 10^{-4}$	$6,295 \cdot 10^{-4}$

TABEAU 5

COHERENCE SPATIALE D'UNE SURFACE D'ONDE ET DU BRUIT DE FOND EN EAU
 PEU PROFONDE
 SPATIAL COHERENCE OF A WAVEFRONT AND OF BACKGROUND NOISE IN A SHALLOW
 WATER ENVIRONMENT

On en conclut que le phénomène prépondérant qui fixe la dispersion des valeurs propres est celui mentionné plus haut, c'est-à-dire l'échantillonnage spatial de l'antenne par rapport à la fonction de corrélation du bruit de fond.

4.3. Corrélation spatiale du bruit de fond - Modélisation.

On s'intéresse ici à la corrélation horizontale du bruit de fond. On trouve dans la littérature plusieurs modèles, en particulier B.F. CRON et C.H. SHERMAN [6] donnent les expressions de l'intercorrélation du champ de bruit en fonction de la distance entre capteurs dans les cas suivants :

- bruit de volume uniformément réparti avec propagation en $1/r^2$:

$$\rho(d) = \sin(kd)/kd \quad \text{avec } k = 2\pi/\lambda$$

- bruit de surface avec une directivité verticale en $\cos^m \alpha$ où α est l'angle par rapport à la verticale ; propagation en $1/r^2$:

$$\rho(d) = 2^m m! J_m(kd)/(kd)^m \quad J_m : \text{fonction de Bessel d'ordre } m$$

Ces deux types de bruit sont isotropes en gisement, ce qui conduit à une fonction de corrélation réelle.

Dans le cas d'un bruit de surface, on peut introduire une anisotropie en gisement en pondérant chaque élément source par une fonction $A^2(\theta)$ de période 2π où θ est le gisement d'une source élémentaire qui est alors affecté d'une pondération à la fois en site et en gisement de la forme :

$$A(\alpha, \theta) = A^2(\theta) \cos^m \alpha$$

Le calcul de la fonction de corrélation correspondante ou celui du terme général de la matrice J de corrélation spatiale qui s'en déduit à un facteur près pour une anisotropie horizontale de la forme :

$$A^2(\theta) = 1 + a \cos \theta$$

donne :

$$R_{el} \{J_{k,l}\} = 2^m m! / (2\pi d/\lambda)^m J_m(2\pi d/\lambda)$$

$$I_m \{J_{k,l}\} = 2m a \int_0^{\pi/2} \sin \alpha \cos \alpha^{2m-1} J_1(2\pi d/\lambda \sin \alpha) d\alpha$$

Le modèle théorique pour la cohérence spatiale du bruit de fond proposé est donc un modèle à 2 paramètres :

- . Le paramètre m qui caractérise l'anisotropie verticale
- . Le paramètre a qui caractérise l'anisotropie horizontale.

On a comparé les résultats expérimentaux aux prédictions du modèle pour un choix optimum des paramètres m et a.

Les valeurs $J_{k,l}$ qui représentent le coefficient de corrélation entre les capteurs k et l sont calculées par moyennage des éléments diagonaux de la matrice de corrélation spatiale : on ne tient compte que de la différence (k-l) c'est-à-dire l'écartement entre capteurs et non pas leur position absolue.

L'optimisation des paramètres m et a s'est faite par la méthode des moindres carrés avec une pondération qui favorise les valeurs de (k-l) faibles car alors les valeurs de $J_{k,l}$ sont obtenues par moyennage sur un plus grand nombre de termes diagonaux et sont donc plus précises.

Les résultats sont présentés sur les Figures 8 et 9. On voit que le modèle présenté serait acceptable pour la fréquence 720 Hz ; mais pour la fréquence 290 Hz, on observe des écarts assez importants. Il semble que l'anisotropie horizontale qui se manifeste sur la partie imaginaire de J(L), soit assez mal décrite par le modèle. Si on veut s'en tenir à un modèle simple tel que celui présenté ici, les paramètres de l'anisotropie verticale et horizontale pour les conditions de l'expérience, sont :

- anisotropie verticale : m compris entre 0,71 et 0,291
- anisotropie verticale : a compris entre -0,07 et -0,08

5. - CONCLUSIONS.

Dans la configuration particulière du milieu étudié : fond variable d'immersion 40 à 60 m, source à des distances de l'ordre de 400 à 800 mètres, on a pu constater une bonne cohérence spatiale des surfaces d'onde sur un réseau fixe horizontal. En effet :

- . En présence d'une source seule, le vecteur propre \vec{V}_{max} qui correspond à la valeur propre maximum, indique la même direction de source que l'antenne classique.
- . Les fluctuations de phase des composantes de \vec{V}_{max} sont de faible amplitude ; les surfaces d'onde sont proches d'un plan mais on observe des déformations systématiques.
- . Les rapports λ_{max}/λ_2 de la plus grande valeur propre à la seconde, sont nettement inférieurs à leur valeur théorique à cause surtout de l'effet de dépointage



COHERENCE SPATIALE D'UNE SURFACE D'ONDE ET DU BRUIT DE FOND EN EAU
PEU PROFONDE
SPATIAL COHERENCE OF A WAVEFRONT AND OF BACKGROUND NOISE IN A SHALLOW
WATER ENVIRONMENT

de la source qui se manifeste d'autant plus que les tranches temporelles élémentaires de signal servant à calculer les matrices des densités spectrales sont plus brèves et que le rapport signal sur bruit est grand.

L'étude expérimentale de la cohérence spatiale du bruit de fond a permis de montrer qu'il est nécessaire, pour une bonne modélisation de cette cohérence, d'introduire une anisotropie horizontale pouvant avoir une forme assez complexe donc nécessitant plusieurs paramètres pour la décrire, surtout aux basses fréquences (inférieures à 500 Hz).

REFERENCES.

- [1] G. BIENVENU "Détection passive des sources ponctuelles dans un bruit isotrope" Cinquième Colloque National sur le Traitement du Signal et ses Applications, Nice (16-21 juin 1975), pp 473-479
- [2] H. MERMOZ "Imagerie, corrélation et modèles" Annales des Télécommunications, Janv. Fev. 1976 t. 31, n° 1-2, pp 17-36
- [3] G. BIENVENU "Influence de la cohérence spatiale du bruit de fond sur la résolution de sources ponctuelles" Sixième Colloque GRETSI, Nice (26-30 avril 1977), pp 17/1-17/9
- [4] G. BIENVENU et L. KOPP "Principe de la goniométrie passive adaptative" Septième Colloque GRETSI, Nice (28 mai-2 juin 1979), pp 106/1-106/10
- [5] G. BIENVENU "Cohérence des signaux et du bruit de fond en écoute passive" Contrat DRET 77/225, Rapport d'étude, mai 1978
- [6] B.F. CRON and C.H. SHERMAN "Spatial correlation functions for various noise models", JASA 34, 2, Nov. 62, pp 1732-1736

POINT FIXE NUMERO 5

FREQUENCE (HZ) 660.00
RESOLUTION (HZ) 9.77
TEMPS INTEGRATION (S) 1.64
RETARD/DEBUT DE SEQUENCE (S) 2.00

PONDERATION: RECTANGULAIRE - MATRICES NORMALISEES

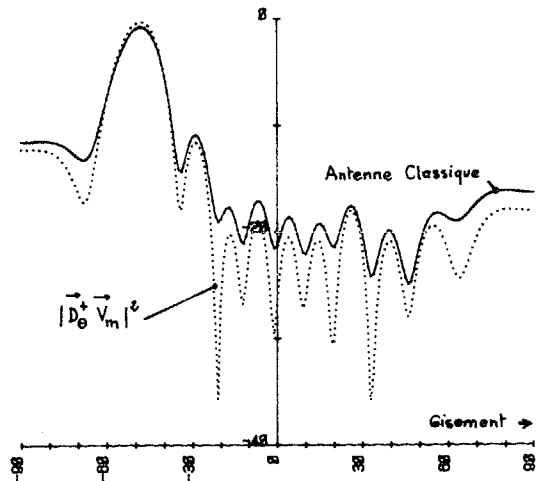


Fig. 1 - Diagramme de l'antenne classique et du vecteur propre maximum. Point fixe 5 - Fréquence 660 Hz

POINT FIXE NUMERO 6

FREQUENCE (HZ) 610.00
RESOLUTION (HZ) 9.77
TEMPS INTEGRATION (S) 1.64
RETARD/DEBUT DE SEQUENCE (S) 2.00

PONDERATION: RECTANGULAIRE - MATRICES NORMALISEES

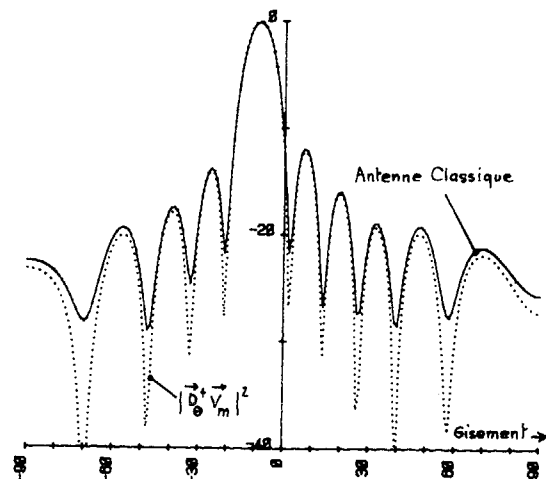


Fig. 2 - Diagramme de l'antenne classique et du vecteur propre maximum - Point fixe 6 Fréquence 610 Hz

COHERENCE SPATIALE D'UNE SURFACE D'ONDE ET DU BRUIT DE FOND EN EAU
 PEU PROFONDE
 SPATIAL COHERENCE OF A WAVEFRONT AND OF BACKGROUND NOISE IN A SHALLOW
 WATER ENVIRONMENT

POINT FIXE NUMERO 6

FREQUENCE (HZ) 610.00
 RESOLUTION (HZ) 9.77
 TEMPS INTEGRATION (S) 6.55

PONDERATION : RECTANGULAIRE - MATRICES NORMALISEES

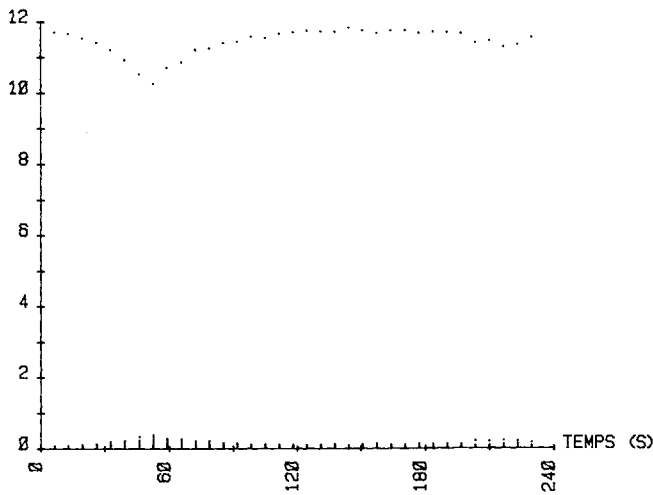


Fig. 3 - Diagramme des valeurs propres
 Point fixe 6 - fréquence 610 Hz

POINT FIXE NUMERO 6

FREQUENCE (HZ) 610.00
 RESOLUTION (HZ) 9.77
 TEMPS INTEGRATION (S) 1.64

PONDERATION : RECTANGULAIRE - MATRICES NORMALISEES

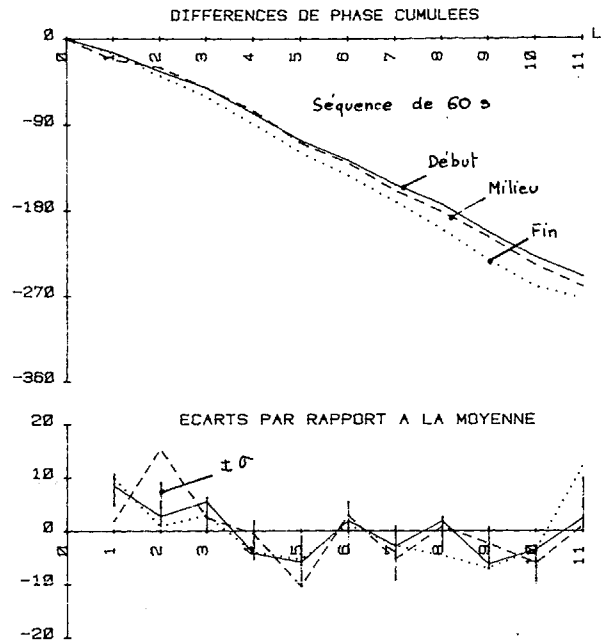


Fig. 5 - Visualisation des surfaces d'onde à partir
 des phases des composantes du vecteur propre
 maximum - Point fixe n° 6

POINT FIXE NUMERO 5

FREQUENCE (HZ) 390.00
 RESOLUTION (HZ) 9.77
 TEMPS INTEGRATION (S) 1.64

PONDERATION : RECTANGULAIRE - MATRICES NORMALISEES

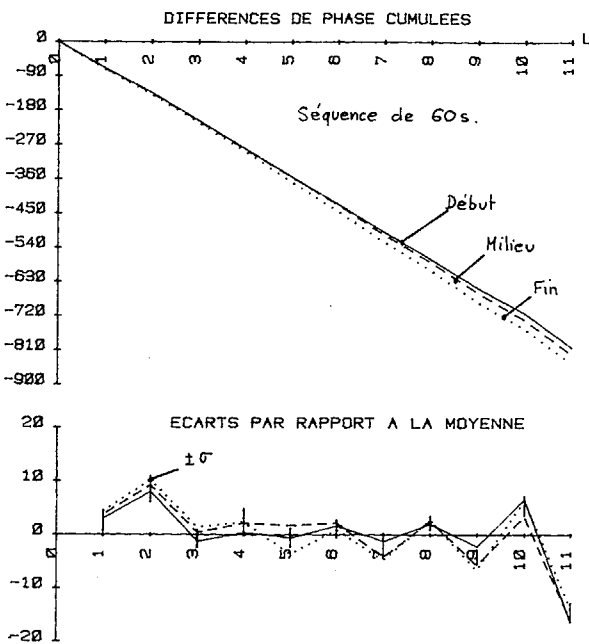


Fig. 4 - Visualisation des surfaces d'onde à partir des
 phases des composantes du vecteur propre maxi-
 mum - Point fixe n° 5

POINT FIXE NUMERO 6

FREQUENCE (HZ) 610.00
 RESOLUTION (HZ) 9.77
 TEMPS INTEGRATION (S) 1.64, 6.55 et 26.24

PONDERATION : RECTANGULAIRE - MATRICES NORMALISEES

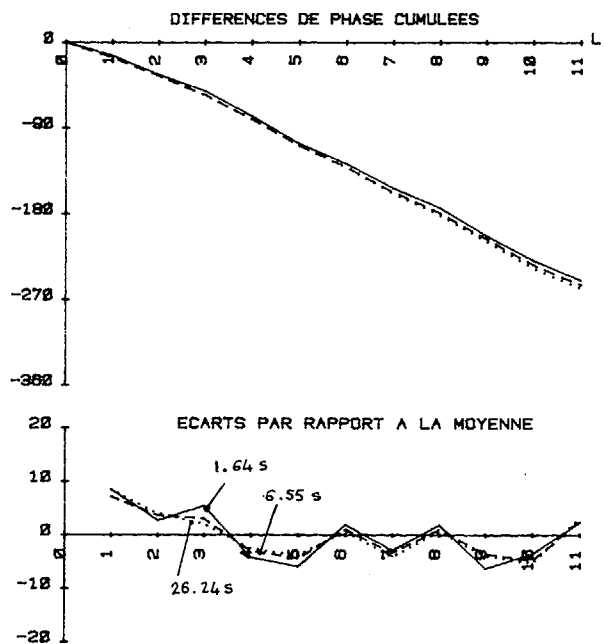


Fig. 6 - Visualisation des surfaces d'onde à partir
 des phases des composantes du vecteur propre
 maximum - Temps d'intégration variable



COHERENCE SPATIALE D'UNE SURFACE D'ONDE ET DU BRUIT DE FOND EN EAU
 PEU PROFONDE
 SPATIAL COHERENCE OF A WAVEFRONT AND OF BACKGROUND NOISE IN A SHALLOW
 WATER ENVIRONMENT

BRUIT NUMERO 7

FREQUENCE (HZ) 720.00 et 290.00
 RESOLUTION (HZ) 9.77
 TEMPS INTEGRATION (S) 229.38
 RETARD/DEBUT DE SEQUENCE (S) 0.00

PONDERATION: HANNING - MATRICES BRUTES

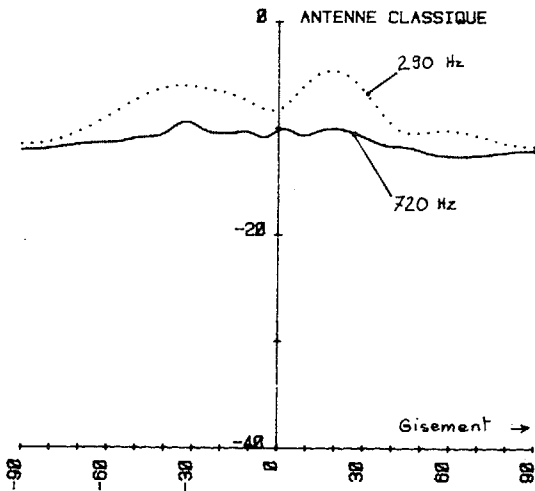


Fig. 7 - Bruit de fond observé à 720 Hz et 290 Hz
 Diagrammes de l'antenne classique

BRUIT NUMERO 7

FREQUENCE (HZ) 290.00
 RESOLUTION (HZ) 9.77
 TEMPS INTEGRATION (S) 229.38

PONDERATION: HANNING - MATRICES BRUTES

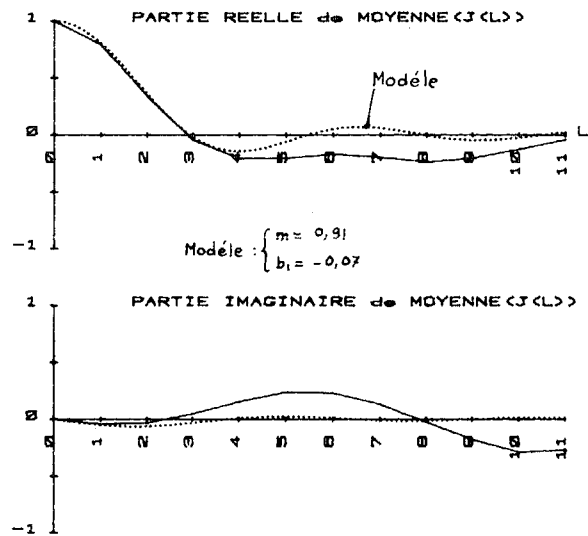


Fig. 8 - Cohérence spatiale du bruit de fond à 290 Hz
 Valeurs expérimentales et modélisation

BRUIT NUMERO 7

FREQUENCE (HZ) 720.00
 RESOLUTION (HZ) 9.77
 TEMPS INTEGRATION (S) 229.38

PONDERATION: HANNING - MATRICES BRUTES

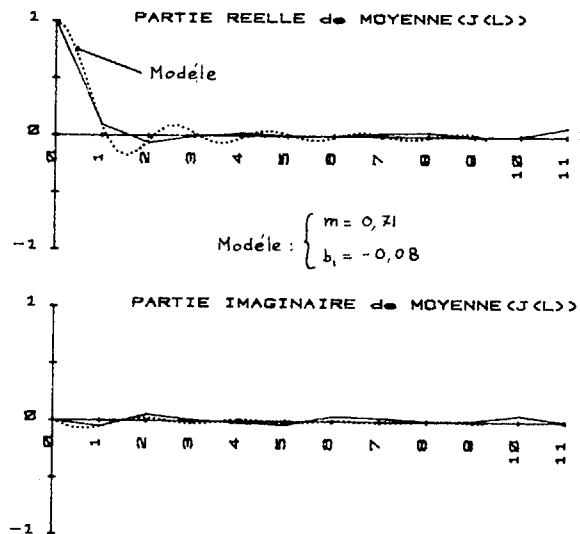


Fig. 9 - Cohérence spatiale du bruit de fond à 720 Hz
 Valeurs expérimentales et modélisation