

**ETUDE STOCHASTIQUE DE LA SURFACE D'ONDE
RECUE SUR UNE GRANDE ANTENNE
EN ACOUSTIQUE SOUS MARINE**

B. FAURE, G. JOURDAIN, F. VIAL

CEPHAG, UA346 CNRS, ENSIEG, BP46, F-38402 St Martin d'Hères Cedex

RÉSUMÉ

Dans le contexte des campagnes de mesures utilisant une antenne longue de type flûte pétrolière en acoustique sous marine, en propagation horizontale, grands fonds et longues distances, nous avons montré qu'il était possible de connaître l'allure du front d'onde reçu sur l'antenne de réception dans le cas d'émission monochromatique ou multifréquence [1,2,3] et dans le cas de signaux large bande de type BPSK [4]. La présente étude porte sur le traitement des signaux reçus lors d'une émission multifréquence et a pour objectif d'étudier les fluctuations propres du milieu. Il est difficile de séparer, au sein des fluctuations observées, la contribution de l'antenne, qui étant souple, se déforme, de la contribution propre du milieu et il existe peu de résultats expérimentaux sur ce type de fluctuations. Nous proposons d'effectuer une étude statistique sur les signaux reçus pendant une durée telle qu'on considère que l'antenne ne se déforme pas et d'analyser en fonction du temps, de la durée de l'épreuve et de la fréquence reçue, les fluctuations que l'on attribuera alors au milieu. L'analyse faite concerne la puissance moyenne des fluctuations, les corrélations spatio-temporelles et la stationnarité spatiale. Mais auparavant, on doit s'affranchir de la déformation moyenne de l'antenne et du dépointage de la source.

SUMMARY

In the context of the analysis of the underwater acoustic channel by using a long towed received antenna, in long range, deep water, horizontal propagation, the form of the wavefront received on the antenna has been shown to be carried out by using polychromatic emission [1,2,3] or wide band BPSK signals[4]. The main objective of this paper is to exhibit and study the fluctuation due to the medium itself. This analysis is performed from a polychromatic emission. It is a priori difficult to separate the fluctuations coming from the deformation of the flexible antenna, from the medium's, or source's fluctuations. On the other hand, there are very few experimental results about this problem. We propose here a statistical study based on the hypothesis that during the analysis time, the antenna is not deformed and we attribute the fluctuations to the medium itself. The statistical analysis concerns the medium fluctuation mean power, spatio-temporal correlation and spatial stationarity. However we have first to eliminate the mean antenna deformation and the mean source displacement.

I APPROCHE THEORIQUE DES TRAITEMENTS

Soit une émission multifréquence continue de type

$$e(t) = \sum_{j=1}^4 a_j \cos(2\pi v_j t - \psi_j)$$

où v_j , a_j , ψ_j sont respectivement la fréquence, l'amplitude et la phase de la composante fréquentielle j .

Le signal reçu sur le capteur k de l'antenne horizontale pendant la durée T est

$$r_k(t) = \left[\sum_{j=1}^4 a_{jk} \cos(2\pi F_j t - \psi_{jk} - \psi_j) + b_k(t) \right] \Pi_{T/2}(t - T/2) \quad (1)$$

ψ_{jk} est le déphasage dû à la propagation émetteur-capteur k .

La fréquence reçue $F_j = v_j - \Delta v$ est différente de celle émise par suite du Doppler relatif entre l'émetteur et l'antenne de réception. $b_k(t)$ est le bruit additif lié à la propagation dans le milieu.

Dans le cadre de l'expérimentation, l'écart entre deux fréquences émises est toujours nettement supérieur à $1/T$, si bien qu'à la fréquence $v = F_j$, la transformée de Fourier de (1) conduit à l'expression (2)

$$R_k(F_j) = A_{jk} e^{-i\varphi_{jk}} + B_k(F_j) \quad (2)$$

$$\text{où : } \varphi_{jk} = \psi_{jk} + \psi_j; A_{jk} = \frac{T}{2} a_{jk}; B_k(F_j) = T B_k(F_j) * \text{sinc}(\pi F_j T) e^{-i\pi F_j T}$$

Dans l'expression (2), le terme $A_{jk} e^{-i\varphi_{jk}}$ résume toutes les informations sur le signal émis et reçu sur le capteur k à la fréquence F_j . Le terme $B_k(F_j)$ représente le bruit additif; dans la gamme de fréquences étudiées, il sera considéré comme négligeable (rapport signal à bruit suffisamment grand).

L'étude porte donc sur l'analyse de $R_k(F_j) = A_{jk} e^{-i\varphi_{jk}}$.

Il est aisé de relier les valeurs de phase aux valeurs de retard; en prenant pour référence le premier capteur, on peut écrire la suite $\tau_j^{(k)}$ des retards

$$\tau_j^{(k)} = \frac{\varphi_{jk} - \varphi_{j1}}{2\pi v_j} = \frac{\psi_{jk} - \psi_{j1}}{2\pi v_j} \quad (3)$$

On admet que le retard $\tau_j^{(k)}$, "mesuré" entre le capteur k et le capteur de référence à la fréquence j , est formé de 3 termes :

- un terme linéaire en k $\tau_{jL}^{(k)}$, dû à l'écart angulaire entre la direction moyenne de l'onde supposée plane et l'antenne supposée rectiligne; il est relié à l'azimut de la source par la relation



$$\tau_L(k) = (k - 1) \times \frac{D}{c} \sin \theta_m \quad \text{avec}$$

D = distance entre capteurs, c = célérité du son dans l'eau,

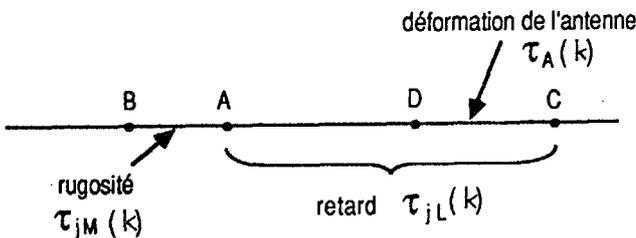
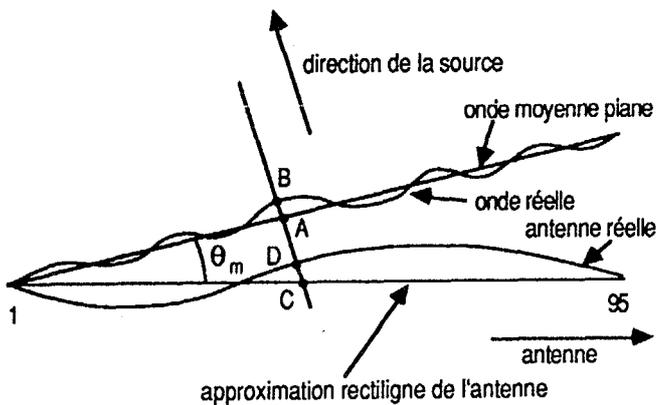
θ_m = azimut de la source

- un retard $\tau_A(k)$ indépendant de la fréquence dû à la déformation de l'antenne,

- un terme résiduel aléatoire $\tau_{jM}(k)$ dû à la rugosité de l'onde incidente que l'on attribue aux fluctuations du milieu, auquel on s'intéressera in fine et qu'on cherchera à analyser statistiquement.

Nous avons $\tau_j(k) = \tau_{jL}(k) + \tau_A(k) + \tau_{jM}(k)$ et on schématise ces différentes grandeurs par la représentation suivante:

Figure1



À partir des valeurs mesurées de $\varphi_j(k)$, on en déduit celles des $\tau_j(k)$, et en considérant des durées d'analyse courtes, on peut statistiquement estimer les valeurs moyennes des retards $\tau_A(k)$ et $\tau_{jL}(k)$ comme suit:

1°) En considérant que la valeur moyenne de la rugosité du front d'onde est nulle sur N réalisations, on peut écrire

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tau_j(k) = \frac{1}{N} \sum \left[\tau_A(k) + \tau_{jL}(k) + \tau_{jM}(k) \right] = \hat{\tau}_A(k) + \hat{\tau}_{jL}(k) + \varepsilon \quad \text{avec } \varepsilon \rightarrow 0$$

On estime alors conjointement, la forme moyenne de l'antenne et l'azimut moyen de la source.

2°) En effectuant une régression linéaire sur la longueur de l'antenne, on estime le terme $\hat{\tau}_{jL}(k)$ significatif de l'azimut de la source, puis par différence, on accède à $\hat{\tau}_A(k)$:

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\tau_j(k) - \hat{\tau}_{jL}(k)) = \hat{\tau}_A(k)$$

Remarque: il est possible d'obtenir l'estimation de la forme de l'antenne en moyennant les observations par rapport aux différentes fréquences (j).

La rugosité du front d'onde est finalement estimée en enlevant aux données de départ les valeurs moyennes estimées $\hat{\tau}_A(k)$ et $\hat{\tau}_{jL}(k)$. Il est alors possible d'obtenir pour T donné, l'estimation de la rugosité du plan d'onde :

$$\hat{\tau}_{jM}(k) = \tau_j(k) - \left[\hat{\tau}_A(k) + \hat{\tau}_{jL}(k) \right]$$

les deux paramètres intéressants sont T = la durée et j = la fréquence d'analyse.

Les fluctuations de phase (ou de retard) restantes sont celles que l'on attribuera au milieu de propagation, ou encore à la fluctuation du plan d'onde. On en déduira les propriétés statistiques au 2ème ordre en termes de puissance moyenne, corrélation spatio-temporelle et stationnarité spatiale.

II ANALYSE DES DONNEES EXPERIMENTALES

Pratiquement pour cette étude nous avons analysé 32 secondes de signal reçu sur les 95 capteurs (ou traces) d'une antenne de type flûte pétrolière tractée, de 2.4km de long, lors de l'émission d'un peigne de quatre raies de fréquences. L'émetteur est situé suffisamment loin de la flûte de réception pour admettre l'hypothèse onde plane en moyenne. Pour chaque trace nous avons analysé chaque fréquence sur une durées de 0.5 seconde, ce qui correspond à une série de 64 épreuves supposées indépendantes.

II-1 Obtention de la rugosité de la surface d'onde

Pour chaque fréquence, nous avons obtenu l'évolution des retards bruts $\tau_j(k)$ le long de l'antenne pour chaque épreuve à partir de (1) et nous en déduisons:

-l'évolution en fonction du temps de l'azimut de la source obtenu par l'estimation du plan d'onde moyen,

-l'estimation de la déformée moyenne de l'antenne, donnée par la moyenne des différentes épreuves, et nous avons tracé l'évolution de la phase centrée donnant une image de la rugosité du front d'onde. La Figure2 présente les 64 réalisations de cette rugosité pour chaque réalisation $\hat{\tau}_{jM}(k)$ pour une seule des quatre fréquences (F=45Hz). Les allures estimées pour les autres fréquences sont similaires.

II-2 Etude statistique de la rugosité du plan d'onde

Effectuons l'analyse statistique à l'ordre 2 des quantités $X_{in} \triangleq \hat{\tau}_{jM}(k)$ où l'indice i représente les capteurs de l'antenne et l'indice n les réalisations différentes. Les paramètres importants sont la durée et la fréquence d'analyse.

II-2-1 Etude des moyennes et écarts types de la rugosité

On peut réaliser différents types de moyennages sur les X_{in}
 1°) En moyennant sur les réalisations, donc temporellement, on obtient des quantités représentant l'évolution spatiale de la rugosité, intégrée temporellement pendant 0.5 seconde.
 2°) En moyennant sur l'antenne, on calcule

$$M_1(n) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L X_{in} \quad M_2(n) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L X_{in}^2 \quad V(n) = M_2(n) - M_1^2(n)$$

Les quantités obtenues $M_1(n)$ et $\sigma(n)$ représentent l'évolution temporelle de la rugosité intégrée spatialement sur une

distance de 2.4km. La **Figure 3** donne un exemple de ce type de fluctuations, pour une durée d'analyse de 0.5 seconde et pour une fréquence de 45Hz. Les fluctuations obtenues sont relativement faibles au cours du temps; nous avons pu le vérifier aussi pour les autres fréquences. Par ailleurs nous avons constaté qu'il n'y a pas de corrélation entre ces différents tracés relatifs à chaque fréquence; le milieu réagit donc différemment en fonction de la fréquence.

L'analyse statistique des quantités $M_1(n)$ et $V(n)$ peut être faite en utilisant l'axe temporel; il en résulte que les grandeurs $M_1(n)$ sont centrées avec des écarts-type exprimés en mètres de 2.1, 3.5, 1.9, 1.2 m pour les fréquences de 45, 65, 82, 115 Hz.

Quant à l'évolution de $\sigma(n)$ en fonction des réalisations, on obtient en moyenne des valeurs de σ exprimés également en mètres de 2.8, 3.7, 4.3, 3.5m pour les fréquences de 45, 65, 82, 115 Hz.

Remarque: un écart-type de 3 m signifie qu'une onde incidente de fréquence égale ou supérieure à 500 Hertz est totalement incohérente sur cette portion de milieu de 2.4 km, mais rappelons que l'antenne utilisée (et donc l'analyse faite) est valable pour des fréquences de l'ordre de 80 Hz.

La comparaison de l'écart type de $M_1(n)$ et la moyenne des écarts type $\sqrt{V(n)}$ donne déjà une idée sur la corrélation spatiale de la rugosité; en effet l'écart-type de $M_1(n)$ est obtenu à partir de (4)

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [M_1(n)]^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L X_{in} X_{jn} \right) \quad (4)$$

alors que la moyenne des écarts-type $\sqrt{V(n)}$ revient à calculer l'expression:

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [M_2(n)]^2 = \frac{1}{NL} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^L X_{in}^2 \quad (5)$$

Dans les deux cas nous avons supposé que la moyenne des $M_1(n)$ est nulle.

Si les fluctuations X_i et X_j sont non corrélées alors l'expression (4) tend vers l'expression (5) en supposant que N est suffisamment grand pour que l'erreur d'estimation soit faible. Ainsi on est en mesure d'interpréter les résultats donnés précédemment en terme de corrélation globale des signaux X_i . Cela pour chaque fréquence et pour des durées d'analyse T données. Plus les deux chiffres donnant l'écart-type de la moyenne et la moyenne des écarts-type seront proches, plus les signaux seront spatialement non-corrélés.

En considérant l'ensemble des résultats trouvés [5] on en tire les remarques suivantes:

- l'ordre de grandeur de toutes les valeurs calculées est sensiblement le même, toutefois nous constatons bien que lorsque T augmente les valeurs de la moyenne et de l'écart-type diminuent ce qui est la conséquence de l'effet d'intégration.
- par rapport aux fréquences d'analyse, le milieu ne réagit pas de la même façon. En effet pour $F=45$ Hz, l'écart entre les deux nombres est de 0.7 alors qu'à 82 Hz cet écart est de 2.4 ce qui tend à montrer que le milieu est plus corrélé spatialement aux basses fréquences.

Intéressons nous maintenant directement à l'intercorrélation des signaux soit sur l'axe des temps soit sur l'axe des distances.

II-2-2 Etude des corrélations spatio-temporelles de la rugosité.

Nous nous intéressons d'abord au coefficient de **corrélation temporelle** entre épreuves, en prenant pour référence l'épreuve numéro 1. Le coefficient de corrélation est défini par la relation

$$\rho_{1n} = \frac{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L X_{i1} X_{in}}{\left[\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L X_{i1}^2 \cdot \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L X_{in}^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

donc moyennée spatialement

Nous présentons, sur la **Figure 4** l'évolution de ce coefficient de corrélation pour des épreuves de 0.5 seconde et pour une des 4 fréquences traitées.

On peut aussi s'intéresser au coefficient de **corrélation spatiale**, en définissant un 2ème coefficient de corrélation, entre le capteur 1 et le capteur i , et en effectuant le moyennage temporel. Cette corrélation spatiale peut être étudiée en changeant le capteur de référence, et ceci constitue l'étude de la stationnarité spatiale de la corrélation. Nous présentons **Figure 5** l'évolution du coefficient de corrélation spatiale pour une des 4 fréquences étudiées, en prenant pour référence le capteur N°35.

En résumé, sur l'ensemble des résultats obtenus pour les 4 fréquences, l'intercorrélation moyenne au cours du temps est sensiblement la même (de l'ordre de +/- 0.15). Nous pouvons donc dire qu'il n'y a pas de corrélation d'une épreuve à l'autre. Cela indique que les fluctuations résiduelles dues au milieu sont des phénomènes très rapides ou très rapidement variables (inférieures à la durée d'analyse qui est de 0.5 seconde). Par contre, lorsque l'on considère l'évolution du signal reçu sur chaque capteur en fonction du temps, et que l'on trace l'évolution du coefficient de corrélation entre capteurs, nous pouvons constater que:

- 1° La distance de corrélation est de l'ordre de 1 ou 2 capteurs
- 2° La corrélation spatiale est assez différente avec la fréquence. Notons qu'elle est plus forte à 65 et 82 Hz qu'aux deux autres fréquences.
- 3° il y a stationnarité spatiale pour la corrélation.

III CONCLUSION

Dans le cadre du traitement des signaux expérimentaux issus de la campagne "Flûte pétrolière IFP 84-85", nous avons dans cette étude essayé d'analyser les fluctuations du milieu, pour cela il faut d'abord s'affranchir des autres contributions dues à la déformation de l'antenne et au dépointage de la source. Pour atteindre ces objectifs, nous avons utilisé le traitement classique déjà décrit, basé sur l'analyse des signaux reçus dans le domaine fréquentiel. Toutefois nous avons considéré des durées d'analyses courtes de telle sorte que d'une réalisation à la suivante, la déformation mécanique de l'antenne puisse être négligeable.

Nous avons chiffré en terme de retard de propagation et en terme de déformation (exprimée en mètres), les différentes composantes de cette décomposition.

Un 1er résultat est l'ordre de grandeur respectif des 3 contributions; pour l'exemple traité :

- i) le dépointage de la source (vis à vis de la normale) représente une distance de propagation de 270m,
- ii) la déformation de l'antenne (vis à vis de l'approximation rectiligne) est de l'ordre de 30m,
- iii) la rugosité du front d'onde entraîne des déformations de quelques mètres.

Un 2e résultat est qu'il n'y a pas de corrélation entre les résultats obtenus pour les 4 fréquences analysées. Le milieu réagit donc de façon indépendante par rapport à la fréquence.



Enfin, l'étude statistique de la rugosité du front d'onde a permis de voir que sa corrélation temporelle était inférieure à la durée d'analyse de 0.5 seconde. Quant à sa corrélation spatiale elle semble être de l'ordre de quelques capteurs ce qui, exprimé en longueur revient à 100 ou 200 mètres et qu'il y a stationnarité spatiale; par contre cela n'est pas forcément identique en fonction de la fréquence.

Cette étude a été conduite avec le soutien de la DCAN.

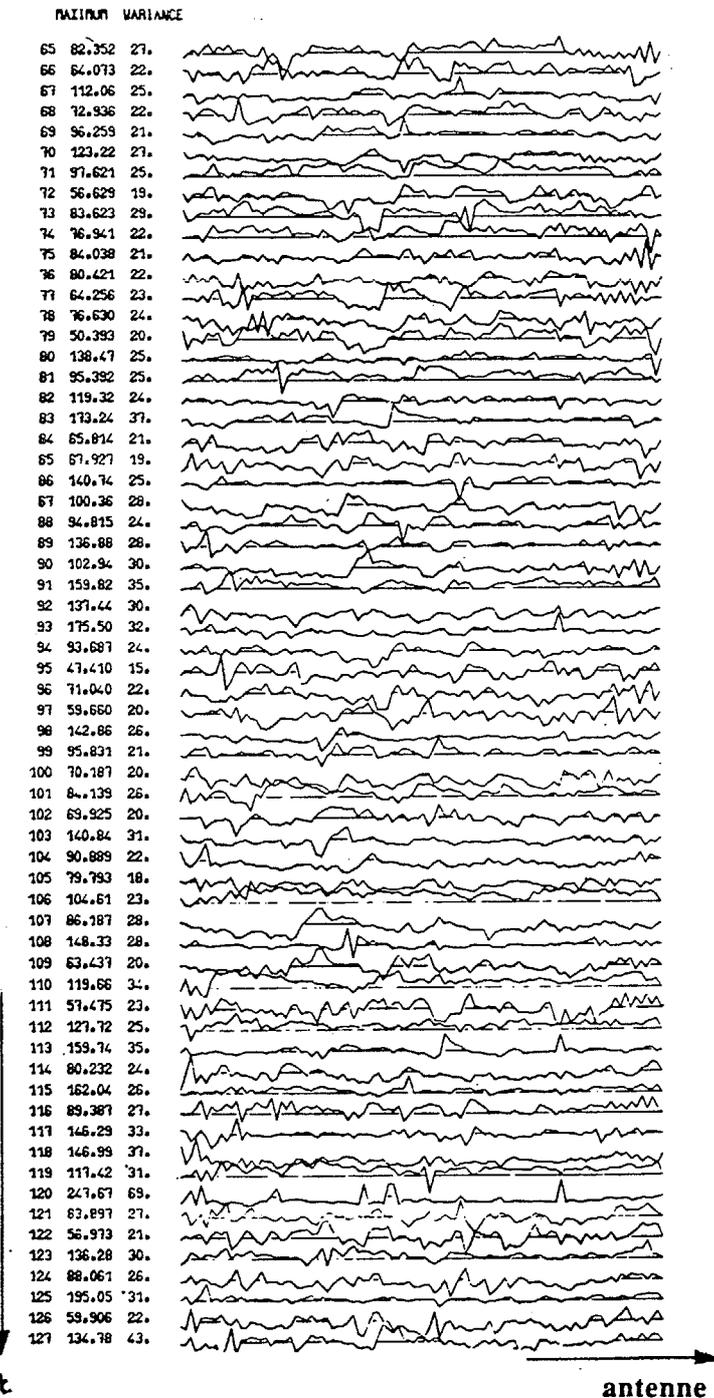


Figure 2 Evolution des retards $\hat{\tau}_{jM}(k)$ (rugosité de la surface d'onde) pour les 64 épreuves de 0.5 seconde. Fréquence d'analyse = 45 Hz

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B.FAURE - S.BOURENNANE - J.L.LACOUME : Analyse temporelle et spatiale de l'onde reçue sur une grande antenne à longue distance en acoustique sous marine. Revue T.S volume 4 - n°4 - 1987 , pp 341-352.
- [2] B.FAURE : Estimation des déformées d'une antenne longue en acoustique sous marine. 3ème colloque national sur la localisation en mer Rueil 1987, pp 387 - 396
- [3] S.BOURENNANE - B.FAURE - P.GOUNON - J.L.LACOUME : Localisation de sources avec estimation de la forme d'antenne. Revue T.S à paraître.
- [4] B.FAURE - G.JOURDAIN - F.VIAL : Traitement et analyse spatio-temporelle de signaux large-bande reçus sur une antenne longue en acoustique sous marine. 11ème GRETSI Nice 1987, pp 369 - 372.
- [5] B.FAURE - G.JOURDAIN - F.VIAL: Etude stochastique de la surface d'onde reçue sur une grande antenne en acoustique sous-marine. Rapport CEPHAG 39/88

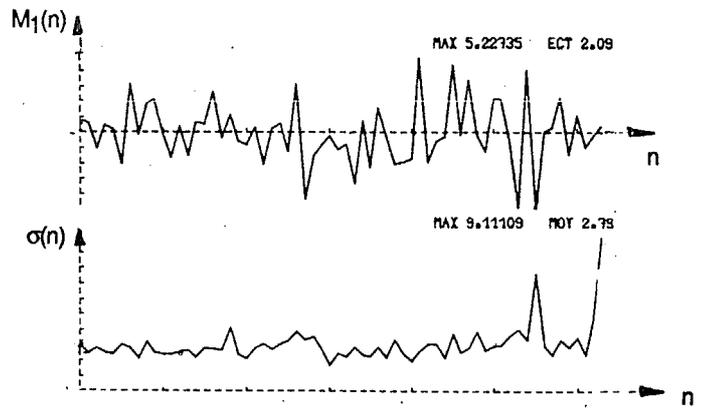


Figure 3 Evolution de la moyenne et de l'écart type de chaque tracé des $\hat{\tau}_{jM}(k)$ obtenus pour l'analyse des 64 épreuves de 0.5s. F=45Hz.

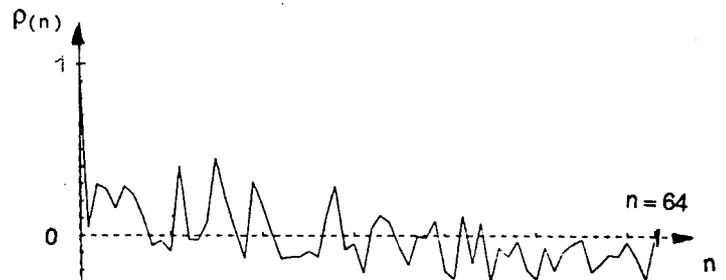


Figure 4 Corrélation temporelle des fluctuations du milieu. Pas de corrélation = 1/2 seconde, l'épreuve 1 est prise comme référence.

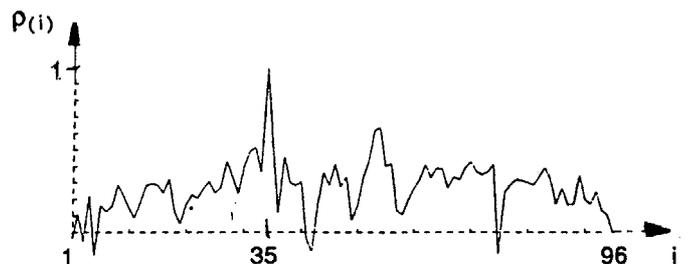


Figure 5 Corrélation spatiale des fluctuations du milieu. Evolution du coefficient de corrélation entre signaux reçus sur chaque capteur pour les 64 épreuves de 0.5 seconde. Le capteur 35 est pris pour référence.