

NEUVIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 20 MAI 1983

PROPAGATION DE SIGNAUX CODES EN PHASE :
APPLICATION A LA CONNAISSANCE DU MILIEU ACOUSTIQUE SOUS-MARIN

P. LAMBERT

C.E.P.H.A.G. (Laboratoire Associé au CNRS 346), B.P. 46, 38402 Saint-Martin-d'Hères. Tél. (76)44.82.45

RESUME

La réalisation d'un filtrage adapté à la réception de signaux codés en phase (P.S.K.) donne un pic de corrélation caractéristique de la date d'arrivée du signal. L'étude de la stabilité des retards sur un trajet, entre trajets ou entre plusieurs capteurs est un test de la stationnarité du milieu acoustique sous-marin. On présente les résultats obtenus dans une transmission basse fréquence à courte distance en milieu fortement bruité. Le faible étalement des retards apporté par le milieu permet un gain de traitement par formation de voies. Sous certaines conditions de propagation, les composantes basse fréquence du signal P.S.K. reçu permettent de retrouver le codage de phase. Nous obtenons un taux d'erreur nul dans une transmission verticale à courte distance (2300 m) et de l'ordre de 4 % dans une transmission horizontale à moyenne distance (60 km).

SUMMARY

The implementation of a matched filter to a received phase-shift-keying (P.S.K.) signal gives a correlation peak which characterizes signal arrival time. By studying delays stability along a single path between two paths or between several hydrophones, we study underwater acoustical medium stationnarity. We present results of a low frequency transmission over 10 km range, in a very noisy medium. Delays fluctuations are small enough to get better detection by beam forming. With particular propagation conditions, the low frequency components of the received P.S.K. give the coding sequence. We found the error probability equal to 0 in a vertical transmission (2300 m) and equal to 4 % in an horizontal transmission (60 km).



PROPAGATION DE SIGNAUX CODES EN PHASE :
APPLICATION A LA CONNAISSANCE DU MILIEU ACOUSTIQUE SOUS-MARIN

INTRODUCTION

Les mécanismes de propagation des ondes acoustiques dans le milieu sous-marin sont complexes et font intervenir un grand nombre de phénomènes à caractère souvent probabiliste. Aussi utilise-t-on une représentation "externe" en termes de filtre linéaire aléatoire à paramètres variables [1]. Cette modélisation facilitera la réalisation de systèmes de communication, détection, mesures... Un tel filtre peut être caractérisé par sa "réponse bitemporelle" $H(t, \tau)$; c'est la réponse à l'instant t à une impulsion émise à l'instant $t - \tau$. Alors :

$$S_{reçu}(t) = \int S_{émis}(t - \tau) \cdot H(t, \tau) d\tau + B(t)$$

$B(t)$ désigne le bruit ambiant additif supposé indépendant du signal.

L'étude de l'action du milieu sur différents signaux test permet une estimation du filtre modèle. Dans ce travail, les fluctuations de la fonction $H(t, \tau)$, image de la stationnarité du milieu, seront analysées à travers la réception de signaux P.S.K. (Phase Shift Keying) - fréquence pure modulée en phase de manière "pseudo-aléatoire" par 0 ou π , ce qui donne au signal une fonction d'autocorrélation très "pointue" -

Le traitement effectué consiste en un filtrage adapté [2]. Il fournit un pic de corrélation dont la position caractérise la date d'arrivée du signal. La figure 1 résume le principe du traitement.

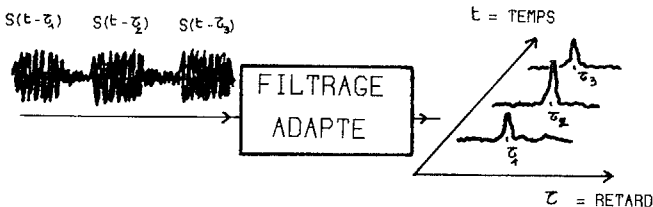


FIGURE 1

Nous examinerons les fluctuations du retard " τ " sous trois angles différents :

- fluctuations des durées de propagation selon un trajet ;
- fluctuations des retards de propagation entre deux trajets ;
- fluctuations des retards de propagation entre différents trajets.

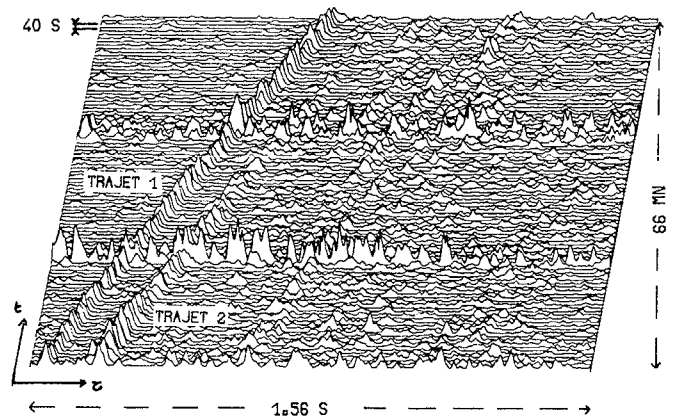
Le signal P.S.K., en plus de l'aspect test du milieu, peut être considéré comme le support d'une transmission d'information. Il est en effet possible, dans des conditions de propagation "favorables", de retrouver le code de modulation. Nous verrons quelles sont ces conditions et présenterons quelques résultats.

1) FILTRAGE ADAPTE : ETUDE DES DUREES DE PROPAGATION

Nous présenterons dans ce paragraphe les résultats obtenus au cours d'une expérimentation en méditerranée, près des côtes, à faible distance (10 km), en milieu fortement bruité. L'émission se faisait d'un bâtiment arrêté sans ancrage, le récepteur était fixe.

1.1) Observation du résultat fourni par le filtrage adapté (figure 2).

Nous observons deux trajets principaux. Le premier, présent sur toute la séquence, donne un pic de corrélation bien marqué. C'est le trajet direct. La figure de corrélation obtenue sur le deuxième trajet est plus large, avec un maximum souvent mal défini qui décroît lentement pour disparaître totalement en fin de séquence. On distingue par intermittence quelques trajets secondaires dont l'amplitude reste faible.



FREQUENCE CENTRALE P.S.K = 128 HZ
BANDE = 32 HZ DUREE = 3.97 S BT = 127

FIGURE 2

Ces trajets sont tous affectés d'une lente dérive correspondant à un accroissement constant du retard de propagation :

$$\frac{d\tau}{dt} = 0,15 \text{ ms/s}$$

En interprétant ce phénomène par une évolution lente de la distance émetteur-récepteur, nous obtenons une vitesse de dérive de 800 m/h qui correspond tout à fait aux relevés de position faits à bord du bâtiment émetteur au cours de l'expérimentation.

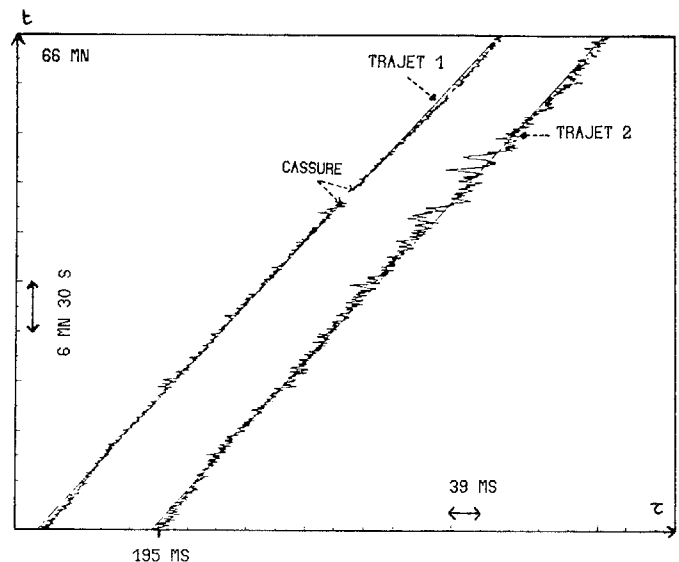


FIGURE 3

PROPAGATION DE SIGNAUX CODES EN PHASE :
APPLICATION A LA CONNAISSANCE DU MILIEU ACOUSTIQUE SOUS-MARIN

Pour étudier plus précisément les retards de propagation, nous avons extrait comme paramètre caractéristique la position du maximum du pic de corrélation. Nous écartons alors toute analyse d'amplitude. Nous nous sommes ensuite intéressés aux fluctuations de la position de ce maximum autour de la dérive "moyenne" (figure 3) obtenue par régression linéaire.

1.2) Remarque sur l'estimation du retard

Les fluctuations de retard que nous estimons par la méthode présentée ci-dessus peuvent avoir trois origines :

- Influence du milieu : les variations de célérité, la houle, les courants... entraînent des écarts sur la durée de propagation.
- Le bruit ambiant additif, essentiellement dû au trafic maritime. A titre indicatif, le rapport signal sur bruit, obtenu dans la transmission de fréquences pures émises quelques heures auparavant, n'était que de quelques dB. Ce bruit important va déformer le pic de corrélation et dégrader les qualités de l'estimeur de retard.
- Nos mesures reposent sur la correction d'une dérive supposée constante. Ce n'est pas tout à fait exact et il persiste donc, dans la mesure des fluctuations des temps de propagation, un terme provenant des conditions expérimentales. Notons que ce terme sera négligeable dans l'analyse des retards entre trajets ou entre capteurs.

En diversifiant ces analyses globales du retard, nous allons évaluer l'influence de chacun de ces termes.

1.3) Fluctuations du retard de propagation

1.3.1) Selon un trajet

Des études statistiques nous ont donné les résultats résumés dans le tableau suivant :

	écart type	écart type relatif (*)
1er trajet	5.4 ms	0.07 %
2e trajet (1ère partie de la séquence : 0 à 40 min)	6.8 ms	0.11 %
2e trajet (2e partie de la séquence : évanouissement progressif du pic)	15.0 ms	0.22 %

(*) Le temps de propagation moyen sur 10 000 m est de 6.7 sec.

Rappelons que la période de la fréquence porteuse du P.S.K. est de 8 ms.

Nous avons tracé (figures 4 & 5) les autocorrélations des fluctuations de chacun des deux trajets. Nous observons sur ces fonctions un pic à l'origine.

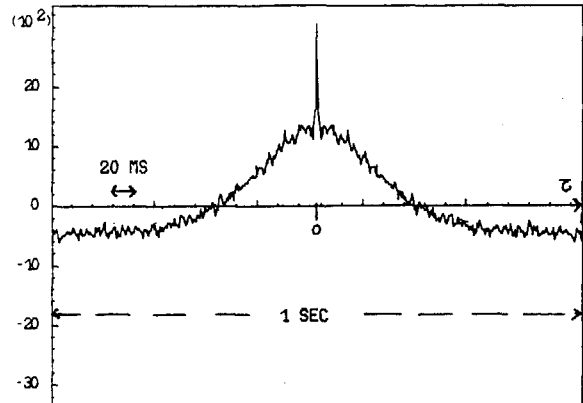


FIGURE 4
Autocorrélation des fluctuations du 1er trajet

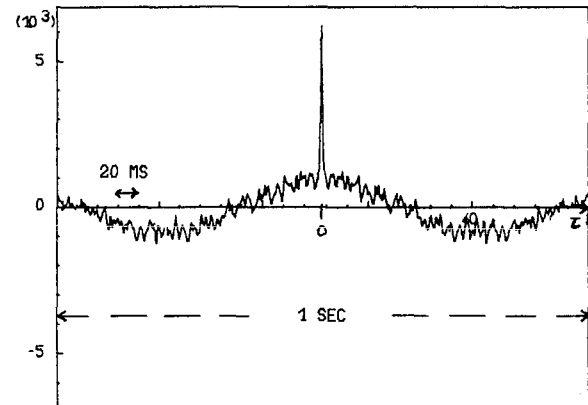


FIGURE 5
Autocorrélation des fluctuations du 2e trajet

Les fluctuations que nous mesurons se présentent comme des bruits, la puissance de bruit étant bien sûr plus forte sur le second trajet que sur le premier (trajet direct).

1.3.2) Entre deux trajets

L'étude de la différence des temps de propagation entre les trajets 1 et 2 (figure 6) fait apparaître un écart à peu près stable dans le temps.

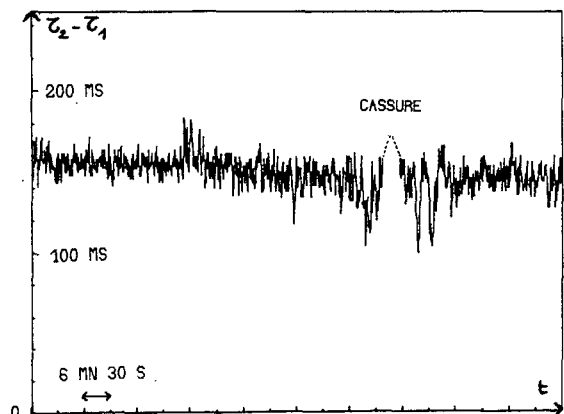


FIGURE 6
Evolution du retard entre les trajets 1 et 2



PROPAGATION DE SIGNAUX CODES EN PHASE :
APPLICATION A LA CONNAISSANCE DU MILIEU ACOUSTIQUE SOUS-MARIN

Valeur moyenne : $E\{\tau_2 - \tau_1\} = 150 \text{ ms}$
 Ecart type : $\sigma_{\tau_2 - \tau_1} = 7.7 \text{ ms}$
 (estimation faite sur les 40 premières minutes de la séquence).

Cet écart de temps correspond à une différence entre les deux chemins de propagation supérieure à 200 mètres. La géométrie de l'expérimentation (profondeur de l'ordre de 1 000 mètres à quelques kilomètres des côtes) tend à prouver que ce deuxième trajet provient d'une réflexion sur le fond. L'évanouissement du second trajet peut alors s'expliquer par un changement de la configuration géométrique de la propagation dû à la dérive.

Le calcul de la fonction d'intercorrrelation (figure 7) illustre l'indépendance des fluctuations du retard entre les deux trajets.

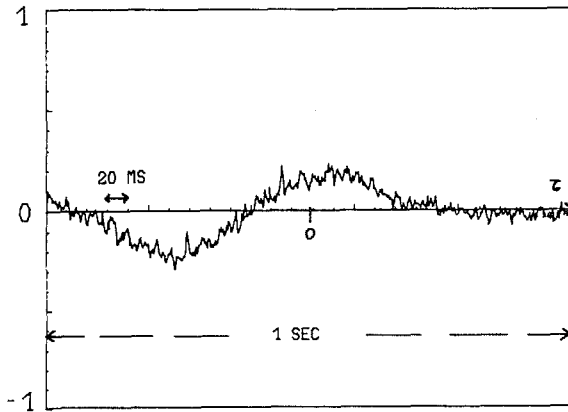


FIGURE 7

Intercorrélation fluctuations trajet 1 - trajet 2

Cette indépendance se retrouve dans la comparaison de termes :

$$\sqrt{\sigma_{\tau_2}^2 + \sigma_{\tau_1}^2} = 8.7 \text{ ms} \quad \text{avec} \quad \sigma_{\tau_2 - \tau_1} = 7.7 \text{ ms}$$

L'écart entre ces deux valeurs provient certainement de l'erreur de correction de dérive (cf § 1.2) qui n'intervient que dans le premier terme.

On pressent déjà dans ces résultats l'influence prépondérante du bruit ambiant.

1.3.3) Entre capteurs

Sur une courte séquence -15 mn- (ne présentant malheureusement qu'un trajet de propagation), nous disposons de l'enregistrement simultané des signaux reçus sur 3 hydrophones disposés comme l'indique la figure 8.

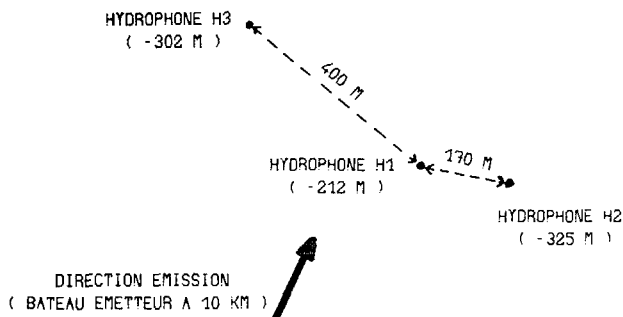


FIGURE 8

Disposition des capteurs

L'étude des retards entre capteurs a donné les résultats suivants :

Retard entre	Valeur moyenne	Ecart type
H ₁ et H ₂	59 ms	8 ms
H ₁ et H ₃	128 ms	8.5 ms
H ₂ et H ₃	69 ms	6 ms

D'autre part, aucune corrélation significative n'a été décelée entre les fluctuations de retard mesurées sur les différents hydrophones.

Il semble donc que ces fluctuations soient essentiellement causées par le bruit ambiant. La mesure que nous présentons dans le paragraphe suivant va le montrer.

1.3.4) Formation de voies

Nous avons réalisé une formation de voies et un filtrage adapté sur le signal ainsi construit. Pour apprécier le gain de ce traitement, nous avons défini un coefficient de détection, moyenne sur toute la séquence des rapports signal sur bruit en sortie du filtre adapté (*). Ce traitement a donné les résultats suivants (voir figure 9a-b-c) :

Hydrophone	Retard compensatoire	Coefficient de détection
1		15
2		21
3		19
2 + 3	68 ms	32
1 + 3	129 ms	26
1 + 2 + 3	68 ms - 129 ms	36

Le gain de détection obtenu prouve :

- d'une part, que les variations de retard apportées par le milieu sont faibles devant la période de la porteuse (8 ms) et donc inférieures aux valeurs globales mesurées dans les études statistiques ;
- d'autre part, qu'il n'y a pas de corrélation au niveau du bruit ambiant reçu sur chaque capteur.

Une contre expérimentation a remarquablement confirmé ces conclusions. Nous avons effectué une formation de voies sur les signaux 1 et 3 avec un retard compensatoire de 125 ms. Cela représente une différence de 4 ms par rapport au retard moyen entre ces deux voies, soit exactement une demi-période de la porteuse. Dans cette situation, le filtrage adapté (figure 9d) ne détecte plus le signal P.S.K. Il y a parfaite opposition de phase entre les deux voies et ceci sur toute la durée de la séquence.

(*) Le rapport signal sur bruit en sortie du filtre adapté est le rapport entre l'amplitude du maximum du pic et l'amplitude moyenne des fluctuations autour du pic.

PROPAGATION DE SIGNAUX CODES EN PHASE :
APPLICATION A LA CONNAISSANCE DU MILIEU ACOUSTIQUE SOUS-MARIN

Sur la figure 9, nous avons présenté les résultats du filtrage adapté pour les différentes formations de voie réalisées.

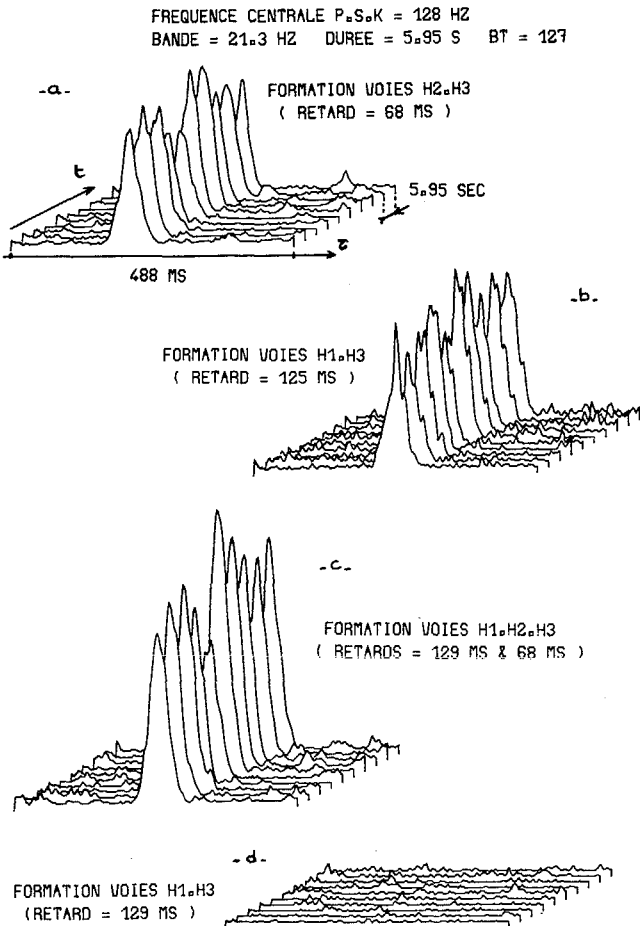


FIGURE 9

1.4) Analyse des résultats - Conclusion

Les fluctuations de retard que nous mesurons sont essentiellement causées par le bruit ambiant additif. L'absence de corrélation de ces fluctuations entre trajets ou entre capteurs signifie que le rayon de corrélation "r" du bruit ambiant est faible et en tout cas inférieur à la distance séparant trajets ou capteurs ($r < 200$ m).

Le gain de traitement obtenu par formation de voies permet de chiffrer l'importance des variations de retard apportées par le milieu. La période de la porteuse du P.S.K. étant de 8 ms, nous les estimons inférieures à 2 ms. Des études de ce type [3] à [5] effectuées en analysant la réception d'impulsions de courte durée ont donné des résultats de même nature.

Ainsi, la stationnarité observée permet raisonnablement (c'est-à-dire à l'échelle des signaux étudiés ici) de représenter le canal sous-marin par un bruit additif et un filtre du type "retard" dont la réponse bitemporelle serait :

$$H(t, \tau) = \sum_{\text{différents trajets}} A_i \cdot \delta(t - \tau_i(t))$$

δ désigne la distribution de Dirac

(Les termes d'amplitude A_i étant à étudier plus précisément).

Les retards τ_i sont des variables aléatoires dont les caractéristiques peuvent être déterminées expérimentalement à condition de pouvoir négliger l'influence du bruit additif et l'instabilité de la distance émetteur-récepteur.

2) RECHERCHE DU CODE P.S.K. - COMMUNICATION

Les composantes basse fréquence d'un signal P.S.K. peuvent parfois être l'image du code de modulation [2]. Il faut pour cela réunir des conditions de propagation bien particulières :

- un bon rapport signal sur bruit
- des modulations de phase et d'amplitude ayant des périodes négligeables à l'échelle du code. Cela signifie en particulier que le Doppler devra être stable sur la durée du code
- une transmission par trajet unique. Dans le cas contraire, on peut espérer isoler un des trajets en construisant le filtre inverse du milieu, peu simple à réaliser en général, ou en jouant sur la directivité des antennes

2.1) Etude en propagation verticale

(Etude réalisée en association avec le CNEOX)

La transmission se fait du fond vers la surface (sur 2300 m) à haute fréquence (26504 Hz). Les conditions expérimentales imprimant une forte modulation de fréquence au signal reçu, la recherche du code s'est effectuée à l'aide d'une boucle à verrouillage de phase [6]. Sur la figure 10, nous avons superposé le code émis au code "reçu". Sur la partie de séquence observée, on retrouve le code de façon parfaite.

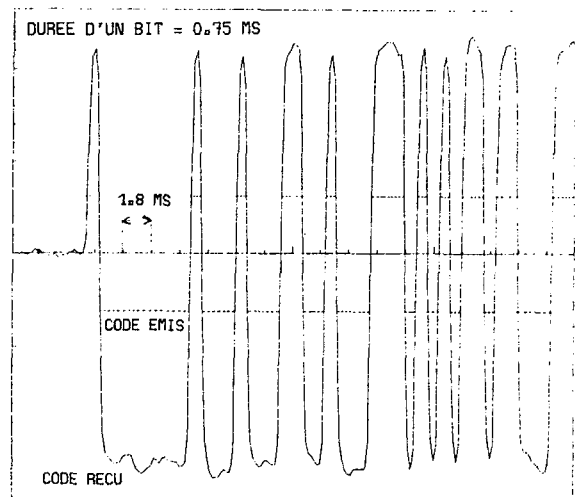


FIGURE 10

FREQUENCE CENTRALE P.S.K = 26504 HZ
BANDE = 1325 HZ DUREE = 386 MS BT = 512

Une étude systématique sur 750 codes a permis de mesurer un taux d'erreur pratiquement nul. Le débit, il est vrai, reste faible (1325 bits/sec). Cependant, les conditions de propagation (en particulier la grande stabilité de la phase) permettent d'envisager une nette augmentation du débit par transmission à plus haute fréquence et à plus large bande de signaux codés sur 4 ou 8 états de phase.

L'aspect "communication" de cette étude est très important. Des applications comme la transmission d'images entre le fond et la surface intéressent actuellement beaucoup le monde industriel. Il est certain qu'une meilleure connaissance du canal de propagation entraînera un gain dans le débit d'informations transmises.



PROPAGATION DE SIGNAUX CODES EN PHASE :
APPLICATION A LA CONNAISSANCE DU MILIEU ACOUSTIQUE SOUS-MARIN

2.2) Etude en propagation horizontale à 60 km
(Etude réalisée en association avec la DRET)

Les caractéristiques de la séquence étudiée sont :

Fréquence centrale du P.S.K. : 2200 Hz
Bande = 59.5 Hz Durée = 2.153 sec BT = 128

Nous avons réalisé 3 traitements de cette même séquence utilisant 3 fréquences de démodulation (f_{dem}) :

- * $f_{dem} = 2200$ Hz Fréquence centrale du P.S.K.
- * $f_{dem} = 2199.9$ Hz Correction d'un Doppler de -0.1 Hz
- * Simultanément au P.S.K., a été émise une fréquence à 2500 Hz. Translatée à 2200 Hz, cette fréquence a été utilisée comme fréquence de démodulation. Dans la suite, nous appellerons cette méthode l'autodémodulation.

Sur la figure 11, nous présentons un code ou la comparaison code émis-code reçu n'a révélé aucune erreur pour $f_{dem} = 2200$ Hz (18 erreurs avec $f_{dem} = 2199.9$ Hz, 9 erreurs avec l'autodémodulation).

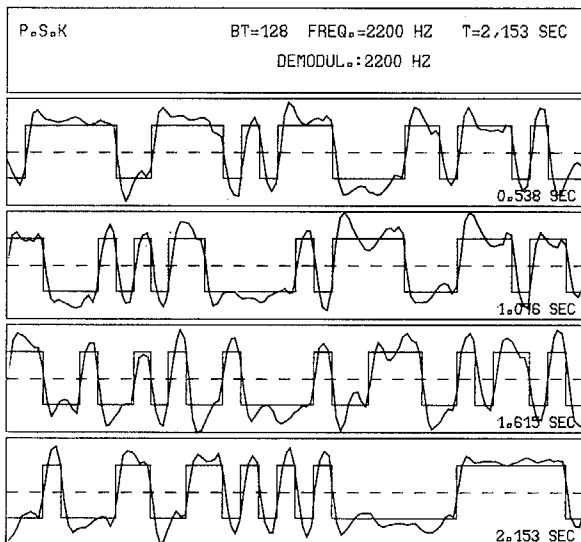


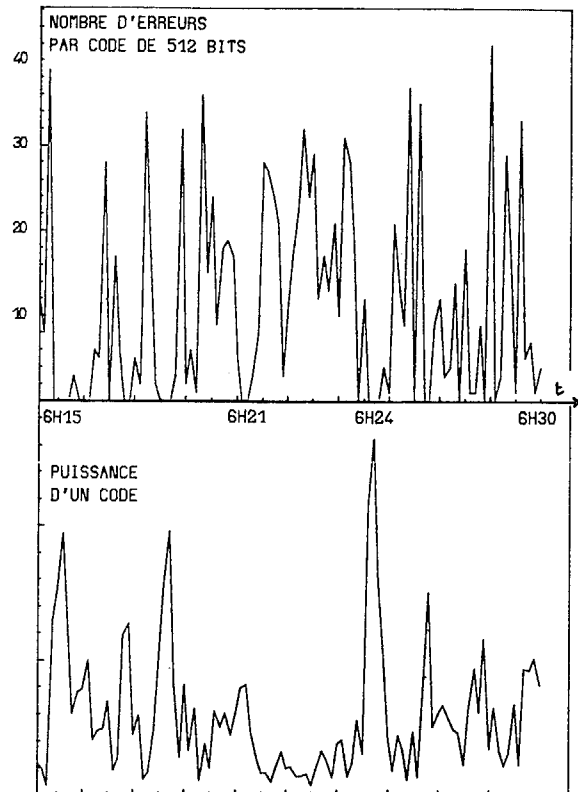
FIGURE 11

L'analyse sur 15 minutes de 100 codes de 128 bits a donné les résultats suivants :

f_{dem}	taux d'erreurs
2200 Hz	8.7 %
2199.9 Hz	9.3 %
Autodémodulation	8.8 %

Si les taux d'erreurs sont globalement semblables, la répartition des erreurs au cours de la séquence est sensiblement différente. Ainsi, en imaginant une démodulation "pseudo-adaptative" qui consiste à choisir pour chaque code la fréquence de démodulation donnant le moins d'erreurs, nous avons ramené le taux d'erreurs à 3.7 %. En pratique, un filtrage adapté multi-Doppler permettrait de choisir la fréquence de démodulation optimale.

Sur les figures 12 et 13, nous avons tracé d'une part le nombre d'erreurs par code en fonction du temps et d'autre part, la puissance de chaque code au cours du temps (pour $f_{dem} = 2200$ Hz). On constate sans surprise que les erreurs se répartissent essentiellement dans les régions où la puissance du code est faible, notamment entre 6h21' et 6h24'. Cette transmission d'informations (60 bits/sec), sur une distance de 60 km, avec un taux d'erreurs de 3.7 % est remarquable. On y trouve une nouvelle preuve de stabilité de la phase d'une onde acoustique se propageant selon un trajet.



FIGURES 12 & 13

CONCLUSION

Cette étude de la propagation des signaux codés en phase permet de faire ressortir les points suivants :

- 1) L'estimateur de retard utilisé dans cette expérimentation est sensible au bruit ambiant. Il ne permet donc pas d'isoler l'influence des mécanismes physiques entraînant des fluctuations du retard.
- 2) Dans les conditions de nos expérimentations, il semble raisonnable de modéliser le milieu par un filtre du type "retard aléatoire" et un bruit additif.

Outre les possibilités de communication entrevues à travers ces analyses, il faut noter les implications de ces résultats sur le traitement d'antenne en acoustique sous-marine. Les méthodes d'imagerie acoustique font souvent des hypothèses simplificatrices sur le comportement du milieu, en particulier au niveau des phases (ou retards) de chaque capteur. L'utilisation de modèle prenant en compte de façon plus réaliste la physique du milieu permettra une amélioration des performances obtenues jusqu'ici.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. JOURDAIN "Filtres linéaires, aléatoires et non stationnaires. Modèles, simulations & applications" Thèse de Doctorat d'Etat, INPG/USMG, Sept. 76.
- [2] P. LAMBERT "Contribution par l'étude de la phase transmise à la modélisation du milieu acoustique sous-marin", Thèse de Docteur-Ing., INPG, Mars 83.
- [3] S.M. FLATTE "Sound transmission through a fluctuating ocean", Cambridge, University Press.
- [4] H.W. BROEK, J.E. LAWLOR "Fluctuations in Underwater acoustic delay differences between orders of arrival", JASA, Vol.70, n°3, Sept. 1981.
- [5] H.W. BROEK "Temporal and spatial fluctuations in single-path underwater acoustic wave fronts" (I, II, III), JASA, Vol. 72, n°5, Nov. 1982.
- [6] J.Y. JOURDAIN, P. LAMBERT, G. REVOL "Altération de la phase dans une transmission acoustique sous-marine" Colloque GRETSI, Juin 1981.