



COMMUNICATION ACOUSTIQUE SOUS MARINE
PAR UTILISATION DE CODES PSEUDO-ORTHOGONAUX

Gérard Loubet et Xavier Niziers

* CEPHAG/ENSIEG bp 46 - 38402 St-Martin-d'Hères Cédex - France

RÉSUMÉ

Nous présentons les résultats d'une expérimentation de communication acoustique sous-marine utilisant le codage pseudo-orthogonal : codes coset [cf 6] (qui font partie de la famille des Gold) et séquences de Kasami. Le canal de transmission est analysé en détail : il correspond à un canal multitrajets très fluctuant à cause de sa faible profondeur (ceci malgré la courte distance de propagation et la faible valeur de la porteuse). Le principe de la communication, basé sur une réception sur une batterie de corrélateurs, est rappelé ainsi que les propriétés des codes. Pour tirer partie des trajets multiples, nous présentons divers types de filtrages adaptés aux caractéristiques statistiques du milieu (obtenues par une séquence d'apprentissage par exemple). Les résultats obtenus sont présentés en termes de taux d'erreur. Nous comparons les types de récepteurs adaptés au milieu.

1 - INTRODUCTION

La communication acoustique sous-marine a fait l'objet de bien peu d'expérimentations à ce jour. Nous présentons ici les résultats d'une manipulation effectuée en Mer du Nord pour tester l'efficacité de méthodes utilisant le codage orthogonal, préalablement étudié en [1].

Grossièrement, les communications ASM peuvent se diviser en deux domaines, celui de distances de propagation très faibles (≤ 1 km), de fréquences élevées (> 10 kHz), type transmission d'images, et celui de communications à moyenne ou longue distance avec des fréquences ne pouvant excéder 5 kHz. C'est ce dernier domaine qui nous intéresse dans ce papier.

Les techniques d'égalisation, bien sur optimales au niveau débit d'information, sont dans ce cas peu envisageables car elles sont peu robustes et le rapport signal à bruit est mauvais (souvent pour des raisons de discrétion). Le milieu marin est essentiellement caractérisé par des trajets multiples de propagation (causes d'interférences pouvant être destructrices). Ceci nous a conduit à préférer des signaux large bande (modulation PSK) à des fréquences pures (correspondant à une modulation FSK) d'autant plus que de nombreuses expérimentations dépouillées au CEPHAG nous ont montré que le terme de phase des ondes transmises dans le canal marin était remarquablement stable [2] [3].

Le type de transmission choisi consiste à émettre des mots code pseudo-orthogonaux. On retrouve à la réception le message par simple intercorrélacion, gagnant ainsi un facteur important sur le rapport signal à bruit. Ce type de transmission a déjà été testé en lac [4].

Dans une première partie, nous présentons les résultats concernant la caractérisation proprement dite du canal de

ABSTRACT

We present the results of an acoustic underwater communication experiment using pseudo-orthogonal codes : coset (pseudo-Gold [6]) and Kasami codes. The transmission channel is characterised in detail. It is very fluctuating on account of the slenderness of the sea, although the propagation distance and central frequency are weak. The communication principles (which consist of a bank of correlators) are briefly described and the codes properties recalled. Several reception schemes, which take into account the a priori medium knowledge, are presented. The obtained performances are given in terms of error probability. The different matched filters, adapted to several propagation models, are tested and compared.

transmission qui confirment les hypothèses généralement formulées sur la modélisation du milieu marin. Plusieurs sortes de récepteurs peuvent être implantés suivant les connaissances a priori que l'on a du milieu. Nous donnons, pour chacun d'eux, leurs performances sur les données de l'expérience en mer, en termes de taux d'erreurs.

2 - CARACTERISATION DU CANAL DE TRANSMISSION

2 - 1 Généralités

Le milieu marin a été étudié depuis de nombreuses années au CEPHAG pour différents domaines d'applications (détection, tomographie...). Récemment l'accent a particulièrement été mis sur des applications en communication acoustique. Différents paramètres entrent en ligne de compte: la distance de propagation et la fréquence porteuse qui sont liées pour des raisons énergétiques mais aussi les profondeurs des gisements des émetteurs et récepteurs ainsi que celle du fond qui interviennent en relation avec le profil de célérité du son dans l'eau. *Dans tous les cas*, la caractéristique essentielle du milieu marin (en dehors de l'atténuation avec la distance de propagation bien connue) est l'existence de *trajets multiples* dus aux réflexions fond et surface et au phénomène de réfraction qui tend à ramener les rayons autour de l'axe correspondant à la célérité minimale. En termes de système, il est maintenant bien admis que l'on peut représenter le canal entre un émetteur et un récepteur par un filtre linéaire dont la réponse impulsionnelle en bande de base, *complexe* est donnée de façon très *réaliste* par une somme de Dirac retardés de τ_k , affectés d'un déphasage ϕ_k et d'amplitude a_k :



$$h(t) = \sum_{k=1}^N a_k \delta(t - \tau_k) e^{j\phi_k}$$

L'élargissement fréquentiel est en effet négligeable devant la bande des signaux transmis et on ne décèle pas d'élargissement temporel autour d'un trajet. Une explication théorique d'un tel modèle de réponse impulsionnelle a été donnée en [2]. Ce sont les propriétés statistique des trois paramètres τ_k , a_k , ϕ_k qui vont caractériser tel ou tel type de milieu de transmission.

2 - 2 Expérimentation

L'expérimentation qui fait l'objet de cet article a eu lieu en Mer du Nord sur une faible distance de propagation (4,5 km), avec une faible fréquence porteuse (550 Hz) mais ce canal s'est avéré plus "difficile" que bien d'autres milieux définis par une distance de propagation et une fréquence porteuse nettement plus élevées car la profondeur de 500 m de la mer favorisait de nombreux trajets voisins et donc des interférences. La transmission s'effectuait entre un bateau et une bouée.

Le milieu est estimé par des séquences binaires de longueur maximale (SBLM) de longueur 255 bits modulant en phase (BPSK) la porteuse à 550 Hz. La résolution temporelle de l'ordre de deux bits soit 14,5 ms est assez faible. La durée d'une séquence est de 1,85 s. Ces séquences encadrent les signaux de communication et peuvent donc servir à la synchronisation et à l'estimation périodique du canal. Le détail des résultats obtenus est disponible en [5].

Amplitudes a_k

Nous donnons (figure 1) l'estimation du module carré de la réponse impulsionnelle à partir de dix mots transmis successivement soit toutes les 1,85 s pour une émission à une profondeur de 18 m et une réception à 90 m (abscisse des temps en secondes). On constate de très *grosses variations d'amplitudes* sur tous les trajets. Seul le premier (qui n'est pas le plus grand) fluctue de manière pas trop importante. On a, sur l'amplitude de ce dernier, un écart type de l'ordre de 15% de sa valeur moyenne, les autres présentant des variations allant de 25% à 40% de leur valeur moyenne respective. Ces très grandes fluctuations, non relevées sur d'autres expérimentations, s'expliquent difficilement. L'état de la surface de la mer ou la nature des fonds ne justifient pas de telles valeurs. Seules des interférences entre trajets très proches, non résolus par la méthode d'estimation, peuvent les expliquer. Un tracé de rayon, obtenu à partir de données (température) relevées sur place, confirme cette hypothèse car il prévoit plusieurs chemins très voisins. La Transformée de Fourier des variations des a_k semble révéler la présence de la houle ; celle-ci modulerait différemment (selon leurs parcours) des trajets très proches. L'étude d'une sinusoïde de fréquence basse (137 Hz) confirme cette hypothèse. D'autre part, son amplitude variant dans un rapport de 1 à 15, semble indiquer qu'une modulation FSK est peu envisageable pour ce genre de milieu de transmission.

Retards τ_k et phases ϕ_k

Les dates d'arrivé des trajets sont, comme toujours en ASM, très constantes. Ceci se voit bien sur la figure 1. Notons une dispersion temporelle de l'ordre de 400 ms. Ce temps doit être pris en compte à l'émission des mots code dont la durée ne doit pas être inférieure à cette valeur.

Les phases sont également très stables (c'est moins connu mais conforme à des résultats souvent relevés en ASM :

[3],[2]). La figure 2 montre les variations de la phase des trois trajets les plus importants relevés figure 1. On voit que ces

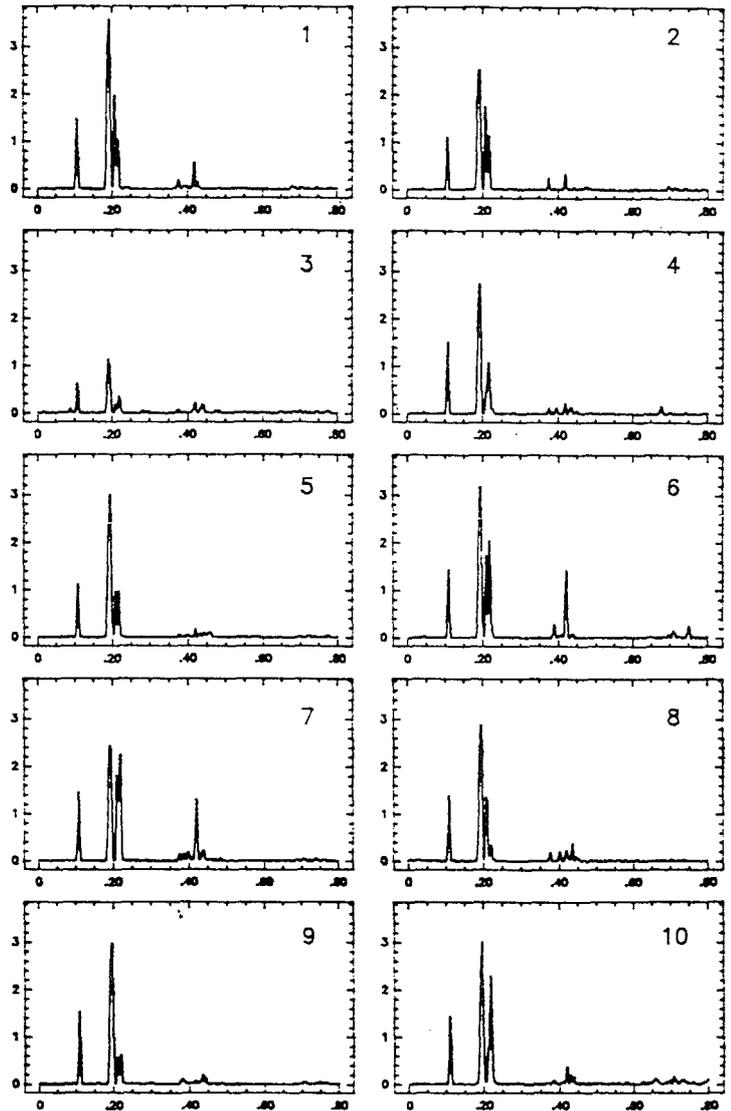


figure 1 : module carré des intercorrélations

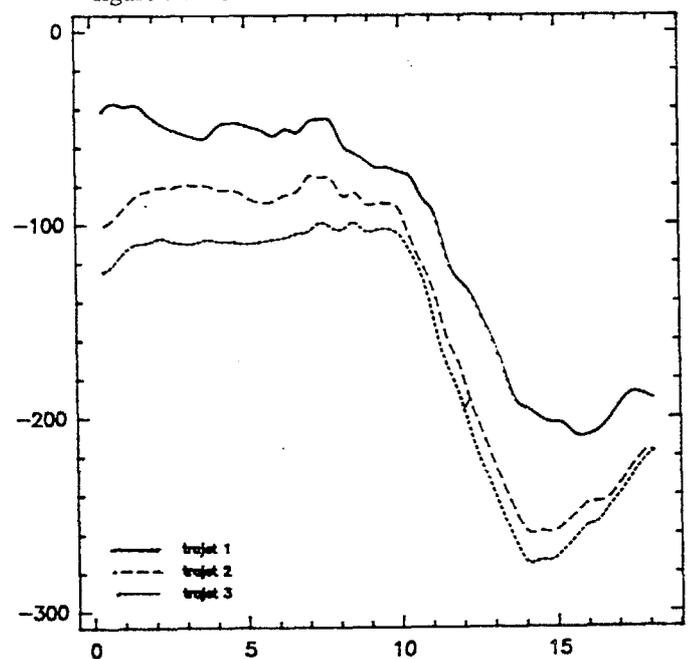


figure 2 : phase (en degrés) des 3 premiers trajets

phases sont mesurables, que les *différences de phase* restent *constantes*, en moyenne, au cours du temps. Leurs variations ne sont pas aléatoires (contrairement à une hypothèse souvent avancée en communication). On peut envisager de les suivre par un dispositif adaptatif. Ces variations traduisent les fluctuations fines des retards qui, dans ce cas, sont de l'ordre de 1 ms.

3 - COMMUNICATION SOUS-MARINE PAR CODAGE PSEUDO-ORTHOGONAL

3 - 1 Principe

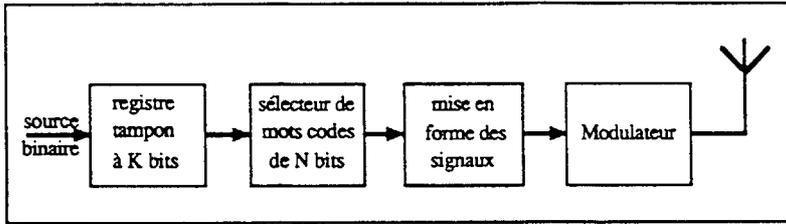


figure 3

Le codage consiste à associer aux k bits d'information à transmettre (figure 3), une séquence binaire de N bits appartenant à une famille de $M = 2^k$ codes. C'est le rôle joué par le registre tampon et le sélecteur de mots code. Après mise en forme, ces signaux ont tous même énergie, même largeur de bande, même durée T. A la réception, la discrimination d'un mot parmi les M possibles s'effectue (figure 4) sur une batterie de M corrélateurs ou filtres adaptés aux M mots code utilisés. Le corrélateur dont la sortie affiche, à l'instant T, la plus grande énergie, indique le mot code reçu. C'est le récepteur optimal pour un canal mono-trajet à bruit blanc.

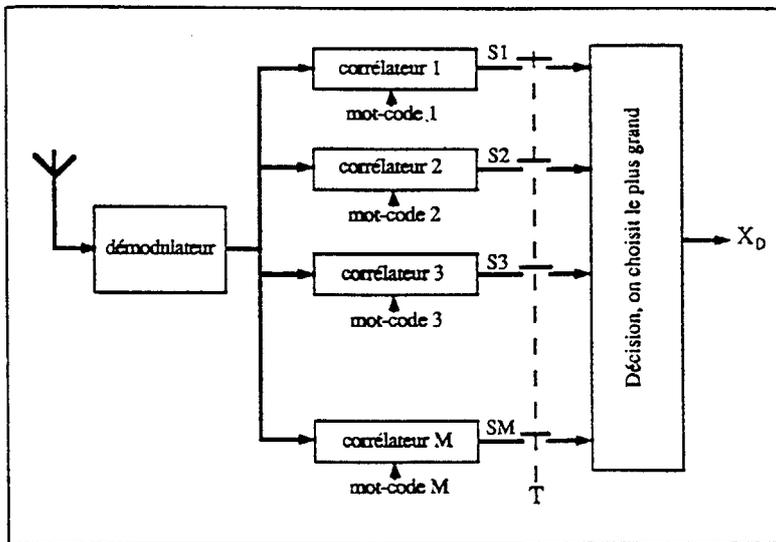


figure 4

3 - 2 Séquences utilisées

En présence de trajets multiples (cas général en ASM, le milieu décrit plus haut constituant un exemple particulièrement délicat), le récepteur précédent prendra de fausses décisions. Elles sont dues aux pics de corrélation engendrés par les trajets secondaires (cas où la dispersion temporelle du canal est supérieure à la durée T d'un mot) mais surtout à la grandeur des intercorrélations entre mots code différents et des secondaires de l'autocorrélation aperiodique de chaque code.

Soit $\Gamma_{ij}(\tau) = \Gamma_{X_i Y_j}(\tau)$ l'intercorrélation entre le mot code émis Y_j et le mot code X_i avec lequel on effectue la

corrélation. On doit choisir les séquences de façon à minimiser, par rapport à $\Gamma_{ii}(0)$, les quantités :

$$\Gamma_{ij}(\tau) \text{ pour } \tau \neq 0$$

$$\Gamma_{ij}(\tau) \text{ quelsoit } \tau$$

Les séquences binaires qui vérifient ces hypothèses sont appelées "codes pseudo-orthogonaux".

D'autre part, pour avoir un débit d'informations le plus élevé possible, on doit introduire une deuxième condition qui est la maximisation du taux de codage défini par :

$$\alpha = k / N \text{ avec } k = \log_2 M$$

(k nombre de bits d'information d'une séquence, N nombre total de bits d'une séquence, M nombre de séquences possibles). Nous avons choisi (cf [1]), parmi les codes répondant à l'optimisation de ces deux critères, les codes de Gold et de Kasami. Les paramètres des familles de séquences utilisées dans l'expérimentation sont donnés ci dessous :

	Gold-pseudo	Kasami
longueur.....	N = 31	N = 15
nombre de mots.....	M = 31	M = 4
max. de la corrél. aperiodique.....	$\Gamma_{\max}=11$	$\Gamma_{\max}=5$
rapport entre pic max. et second..	R = 0,35	R = 0,33
taux de codage.....	$\alpha = 0,16$	$\alpha = 0,13$

La première famille est dite "Gold-pseudo" car elle correspond au code pseudo-orthogonal Coset, noté "V45 C75 Rot0" étudié en [6]. Elle constitue une famille de Gold amputée de l'une de ses SBLM génératrices. La longueur 31 constitue le meilleur compromis portant sur le taux de codage α et la hauteur des secondaires (rapport R) en comparaison avec les autres longueurs de séquences. Par ailleurs, cette longueur offre une assez bonne protection contre le bruit.

La famille Kasami présente l'intérêt de posséder pratiquement les mêmes taux de codage et le même rapport R que la famille de Gold pour une longueur deux fois plus faible. Par contre le rapport signal à bruit devra être assez bon.

3 - 3 Les différents types de récepteurs utilisés

Plutôt que de considérer le phénomène de trajets multiples comme une nuisance dont on doit supprimer les effets, il est préférable, d'un point de vue énergétique (rapport signal à bruit), de concevoir des systèmes de communication capables d'en tirer partie. Ces systèmes, après une phase d'apprentissage du milieu, utilisent au mieux la connaissance de celui-ci pour retrouver le message émis. Nous n'avons pas testé des techniques adaptatives qui pourraient aussi être efficaces.

Nous appellerons récepteur mono-trajet, le récepteur qui, en sortie des M corrélateurs, ne prend en compte que les échantillons issus du trajet de plus forte énergie. C'est le récepteur optimal lorsque le canal est mono-trajet, d'où son nom. Avec un canal à trajets multiples comme le notre, ce type de récepteur est sous optimal, mais il présente l'avantage d'être simple à implémenter. La phase globale étant souvent inconnue, le système de détection consiste à comparer, aux instants nT correspondant au trajet principal, le module carré des sorties des M corrélateurs.

Le récepteur multi-trajets combine les pics issus de tous les trajets pour améliorer les performances du système de communication. On peut faire deux remarques : si le produit BT des signaux utilisés est faible, les pics correspondant à des trajets proches ne sont plus résolubles et des interférences induites par ces trajets proches peuvent fortement dégrader les résultats attendus (indépendamment du rapport signal à bruit).



Pour que le système soit vraiment optimal, il faut d'autre part (cf [7]) que la dispersion temporelle Δ du milieu n'excède pas la durée T d'un mot. Ceci n'est d'ailleurs vrai que si le traitement est un véritable filtrage adapté continu (à chaque échantillon) des données reçues par les différents mots code. Si l'on dispose de la synchronisation (par une séquence d'apprentissage comme lors de notre expérimentation) et que l'on effectue les corrélations toutes les T secondes, il faut prévoir un temps de garde égal à la dispersion du milieu. Le traitement aura alors lieu toutes les $T+\Delta$ secondes ce qui est bien plus léger au niveau temps de calcul.

Appelons X_{ji} la valeur donnée par la sortie du corrélateur à l'instant $t = t_i + \Delta$. Trois types de détection sont envisageables selon la connaissance préalable du milieu :

Amplitudes et phases connues et stables

Dans ce cas, le récepteur optimal calcule la grandeur :

$$W_j = \sum_{i=0}^{N-1} a_i e^{-j\phi_i} X_{ji}$$

Cette opération est facilement réalisable par un filtre transversal dont la réponse impulsionnelle correspond au filtre adapté au milieu estimé. Les résultats seront bons si on estime bien les paramètres du milieu et si celui-ci est stable sur un intervalle de temps suffisamment long.

Amplitudes connues, phases aléatoires

Si les phases sont aléatoires, indépendantes et équiparties sur $[0, 2\pi]$, le récepteur optimal calcule (N_0 densité spectrale du bruit) :

$$W_j = \sum_{i=0}^{N-1} \ln I_0 \left(\frac{2a_i |X_{ji}|}{N_0} \right) \approx \frac{2a_i |X_{ji}|}{N_0}$$

En ne tenant compte que des trajets importants, le récepteur optimal prend la forme approchée d'un filtre adapté au module de la réponse impulsionnelle complexe du milieu.

Amplitudes et phases aléatoires

Si les amplitudes sont également aléatoires, indépendantes et suivent une loi de Rayleigh de variance γ_i , le récepteur optimal calcule (E énergie d'un mot code) :

$$W_j = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\gamma_i |X_{ji}|^2}{N_0 + \gamma_i E}$$

dont une version sous-optimale consiste à effectuer le filtrage adapté au module carré de la réponse impulsionnelle du milieu. Nous avons appliqué ces types de récepteurs à nos données. Le cas où les retards seraient aléatoires n'est pas réaliste en ASM.

3 - 4 Résultats obtenus

Les débits binaires lors de l'expérimentation étaient de 137,5 bits/s pour les codes émis sans blancs. Mais le débit d'information utile tenant compte du taux de codage α valait 22 bits/s pour les Gold sans blancs, 11 pour les Gold avec blancs, 17,87 bits/s pour les Kasami sans blancs et 8,94 pour les Kasami avec blancs. Ceci est très faible comparé à la capacité du canal donnée par Shannon qui vaudrait autour de 788 bits/s dans notre cas : bande de 275 Hz correspondant à la largeur du lobe principal et rapport signal à bruit de 2dB (valeur très difficile à estimer, fluctuant en gros entre 0 et 10 dB à cause des interférences).

Nous présentons les résultats obtenus dans le cas où l'émetteur était à 18 m de profondeur et le récepteur à 90 m, en utilisant les différents filtres adaptés au milieu. Celui-ci est estimé en moyenne sur 19s avant chaque période de communication.

récepteur séquences	TAUX D'ERREURS				DEBIT
	mono-trajet	filtre adapté au module	au module carré	à la réponse complexe	
Gold	11%	9,5%	7,5%	22%	22b/s
Gold avec blancs	6,5%	6%	4,5%	1,9%	11b/s
Kasami avec blancs	9%	15%	6,6%	42%	9b/s

On constate que seule la détection des codes de Gold avec blancs est utilisable. En effet, lorsque les codes sont émis sans temps de garde, on a des effets de bord nuisibles pour le traitement par corrélation effectué toutes les T secondes. Et surtout, la longueur des mots (225 ms pour les Gold, 112 ms pour les Kasami) est inférieure à la dispersion temporelle du milieu qui est de 400 ms. Ce n'est que pour les Gold avec blancs que la durée d'un mot dépasse cette valeur (450 ms). Des simulations nous ont montré qu'il est préférable d'utiliser des séquences courtes émises avec un blanc plutôt que des séquences plus longues mais émises bout à bout.

On a obtenu, lors de l'expérimentation, le meilleur résultat en considérant le milieu connu et stable ce qui tendrait à prouver qu'il n'était pas aussi aléatoire qu'on pouvait le penser.

4 - CONCLUSION

Nous avons vu combien une estimation du milieu, non seulement était utilisable pour la synchronisation mais pouvait améliorer fortement les performances d'un système de communication. Le canal marin est un milieu complexe où interviennent non seulement des critères de fréquence porteuse, de rapport signal à bruit, de distance de propagation mais aussi de profondeur du chenal et de position des émetteurs et récepteurs vis à vis de la courbe de célérité du son. Une transmission sur une courte distance s'avère souvent plus difficile que sur une longue, surtout à cause des interférences.

Ce travail a été réalisé avec le concours de la Direction des Constructions Navales.

Références

- [1] Hakizimana G. : Codages adaptés aux communications avec trajets multiples - Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, 84.
- [2] Lacoume J.L., Loubet G. : Sur le déphasage entre l'enveloppe et la porteuse en ASM - 12^{ème} coll. GRETSI, 89.
- [3] Loubet G., Pallas M.A. : Caractérisation du milieu marin en tant que canal acoustique - J. Acoustique 1 (1988) 129-134.
- [4] Hakizimana G., Jourdain G., Loubet G. : Coding for communication through multipath channels and application to underwater case - Signal Processing 111, Theo. & Appl., 1986
- [5] Niziers X. : Communications acoustiques au travers d'un canal multitrajets par utilisation de codes pseudo-orthogonaux - Rapport CEPHAG N° 37 / 1990.
- [6] Chavand F. : Transmission d'informations dans les canaux multitrajets à caractéristique aléatoire par codage pseudo-orthogonaux, Application au canal ionosphérique - Thèse d'état, Paris Sud Orsay, 1981.
- [7] Turin G.L. : Introduction to spread-spectrum antimultipath techniques and their application to urban digital radio - Proc. IEEE, Vol 68, n°3, pp 328 - 353, 1980.