

Les communications acoustiques sous-marines

Gérard Lapiere

Agence Nationale des Fréquences
Rue Pierre Rivoalon
29200 Brest
E-mail : lapiere@anfr.fr

Xavier Lurton

IFREMER
NSE/AS
BP 70
29280 Plouzané
E-mail : lurton@ifremer.fr

Résumé

Le milieu sous-marin offre une opportunité de transmettre par voie acoustique des signaux de communication mais pose aussi des problèmes spécifiques qui limitent sérieusement les performances. Les contraintes physiques sont dues essentiellement à l'étalement temporel lié aux trajets multiples, mais aussi aux modulations d'amplitude et de fréquence spécifiques à l'acoustique sous-marine. Les besoins opérationnels en transmissions sans fil dans le milieu océanique ont néanmoins amené au développement de divers systèmes de transmission. Les techniques utilisées pour combattre les contraintes physiques du milieu incluent l'exploitation de directivité d'antennes, des modulations robustes aux divers effets subis, et des techniques spécifiques de compensation de la réponse du canal. Les performances obtenues pratiquement permettent de nombreuses applications, mais restent très en deçà de celles des systèmes électromagnétiques utilisés dans l'atmosphère ou l'espace.

Abstract

The acoustic channel is the most suitable way to transmit signals for underwater communication purposes, but on the other hand it raises specific issues limiting seriously the achieved performances. Physical limitations are essentially due to time spreading given by multipath structure, but also to amplitude and frequencies modulations specific of underwater acoustics. However, operational needs in wireless transmissions in the ocean lead to the development of various transmission systems. Techniques used to cope with the physical constraints feature array directivity, robust modulations, and specific techniques to equalize the transfer function of underwater channel. The performances actually achieved make possible numerous applications, even if they stay below those of electromagnetic waves used in atmosphere or space.

Spécificités des transmissions acoustiques sous-marines

Pourquoi l'onde acoustique ?

L'onde acoustique est le seul support physique de transmission d'informations sans fil viable dans le milieu marin. Les ondes électromagnétiques sont inutilisables à cet effet (sauf à très basses fréquences et à faible débit) et l'onde optique ne porte qu'à quelques dizaines de mètres, même dans la gamme bleu vert dont les caractéristiques de propagation sont spécialement favorables.

À l'instar des autres systèmes acoustiques sous-marins, les performances de fonctionnement d'une liaison acoustique sont régies par le bilan énergétique résumé par l'équation du sonar, qui permet d'exprimer le rapport signal à bruit obtenu en réception [1]. À l'image du traitement sonar, où les performances s'expriment soit en termes de probabilités de détection et de fausse alarme dépendant du rapport signal sur bruit, pour un système de communication la probabilité d'erreur est aussi dépendante de ce rapport. Elle dépend aussi des caractéristiques du milieu de transmission.

Si l'on raisonne en termes de distances de propagation, on constate que les longues portées ne sont accessibles qu'en utilisant une fréquence porteuse basse, qui ne subit qu'un faible amortissement dans l'eau de mer, mais qui induit, dans la pratique, bon nombre de conséquences fâcheuses (instrumentation volumineuse et lourde, amplification délicate, temps d'émission continu...) [1].

En terme d'efficacité de la transmission, on doit considérer que les débits envisageables dépendent de la largeur de bande fréquentielle disponible, et sont donc liés à la bande passante des transducteurs par un paramètre appelé efficacité spectrale (exprimé en bits/s/Hz). On comprend dès lors que les facteurs de qualité des transducteurs conditionnent les limites des transmissions acoustiques et que l'on s'intéresse aux modulations ayant une efficacité spectrale la plus grande possible.

En résumé,

Grande portée --> fréquence porteuse basse --> faible bande passante --> faible débit

À l'inverse,

Haut débit --> grande bande passante --> fréquence porteuse élevée --> courte portée

Un compromis technique entre portée et débit est donc toujours à trouver, lors du dimensionnement d'un lien de transmission au regard du contexte d'emploi envisagé.

Pourquoi les transmissions par voie acoustique sous-marine sont-elles donc si difficiles à réaliser ?

La structure géométrique du canal sous-marin rend difficile une transmission sans dispositif de réception approprié. En effet la proximité d'interfaces réfléchissantes (surface et fond en particulier, mais aussi toutes sortes d'obstacles liés à l'environnement immédiat, pour les applications en zones portuaires ou industrielles) génère une structure à trajets multiples (étalement temporel de la réponse impulsionnelle) ; les signaux transmis suivant les divers trajets créent localement un système d'interférences fréquentielles qui est source d'évanouissements (*fading*) dans le signal transmis. L'exemple donné en Fig. 1 illustre cet aspect : en haut (données enregistrées en rade de Brest), on distingue une structure resserrée où le *fading* est peu marqué et en bas (sur la Basse du Lys) où la structure est plus étalée et le *fading* plus prononcé.

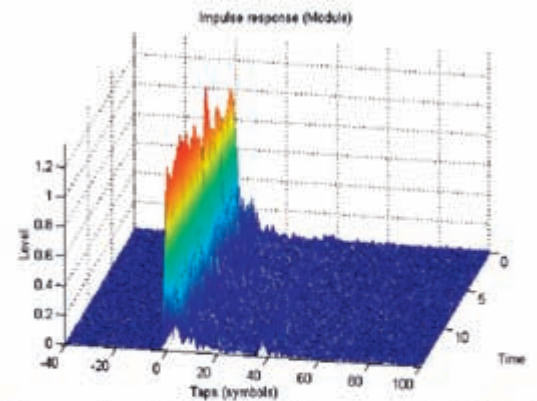
Cette structure interférentielle est de surcroît fluctuante comme en témoigne la Fig. 1. Les évanouissements affectent différentes fréquences au cours du temps. Ceci impose d'avoir recours à des stratégies *adaptatives* c'est-à-dire d'utiliser des récepteurs capables de suivre les évolutions du canal. L'étalement temporel des trajets multiples ne se limite pas à un effet d'interférences fréquentielles, mais devient sensible dans le domaine temporel, sous forme d'une traînée d'échos ; dans le cas de transmissions numériques, lorsque les retards sont supérieurs à la durée des symboles binaires élémentaires, on se trouve en présence d'interférences intersymboles, qui sont spécialement pénalisantes pour la qualité de transmission et difficiles à corriger.

Par ailleurs l'influence des mouvements de porteurs introduit une dispersion fréquentielle et un effet de contraction/dilatation temporelle beaucoup plus marqué que l'effet Doppler rencontré pour les transmissions hertziennes du fait des ordres de grandeur comparables entre les vitesses relatives des mobiles (jusqu'à quelques dizaines de m/s) et la célérité du son dans l'eau (~1500m/s), ce qui n'est évidemment pas le cas avec la vitesse de la lumière.

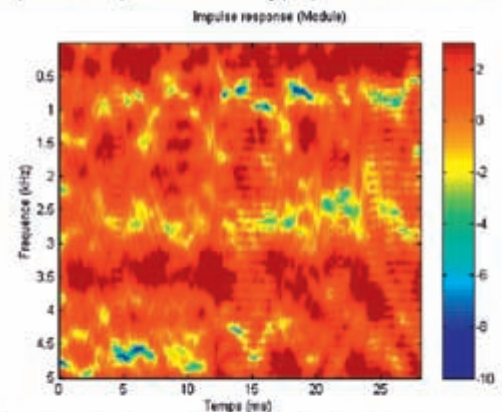
Enfin, le bruit, causé par l'environnement naturel (physique, biologique) ou artificiel (trafic, activité industrielle, bruit propre du véhicule porteur du système), conditionne la qualité de transmission. Il est évidemment nécessaire de situer les récepteurs dans des zones aussi silencieuses que possible. On retiendra donc les influences suivantes du canal de propagation :

- Étalement temporel de la réponse impulsionnelle du canal ASM.
- Variabilité du milieu de transmission à diverses échelles.
- Niveau de bruit acoustique, ambiant ou généré par les porteurs.
- Variabilité Doppler due au mouvement des porteurs.

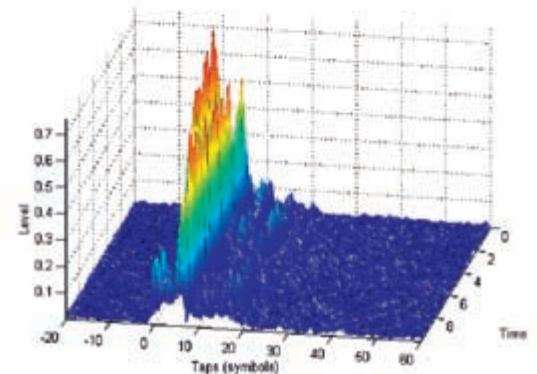
On conçoit aisément que le caractère très fluctuant des signaux transmis dans le canal acoustique sous-marin complique énormément la définition de méthodes de modulation à la



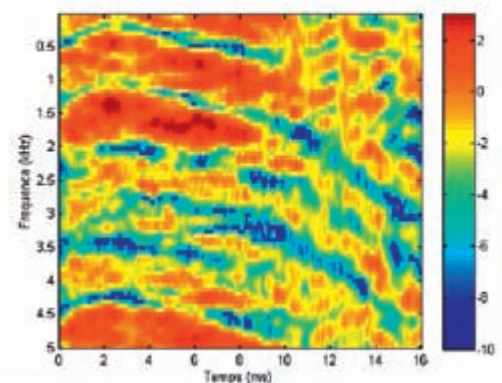
Réponse impulsionnelle typique en rade de Brest



Fonction de transfert en Rade de Brest



Réponse impulsionnelle sur la Basse du Lys



Fonction de transfert sur la Basse du Lys

Fig. 1 : Exemples de réponses impulsionnelles du canal acoustique sous-marin

fois efficaces et robustes. Les fluctuations énergétiques (observables à diverses échelles de temps) rendent peu performantes les modulations basées sur l'exploitation de l'amplitude ; les modulations de fréquence et de phase, aussi affectées par le *fading*, sont très dégradées par l'effet Doppler et par les retards temporels entre trajets.

Par ailleurs, les activités sous-marines utilisant des transmissions sans fil doivent prendre en compte les limitations de performances (débit, taux d'erreurs) associées aux systèmes sous-marins ; elles ne sauraient en attendre les mêmes qualités que celles obtenues dans l'air ou dans l'espace avec les transmissions d'ondes électromagnétiques.

Techniques utilisées pour les transmissions acoustiques sous-marines [2], [3]

Directivité d'antenne

Une solution préliminaire, simple et efficace dans de nombreuses configurations, consiste à exploiter les figures de directivité des antennes d'émission et réception pour éliminer ou diminuer l'influence des trajets multiples. Cette approche, qui est à recommander systématiquement quand la structure du canal s'y prête, est spécialement efficace lorsque la structure de trajets multiples correspond à de larges écarts angulaires, donc dans des conditions de transmission verticale ou oblique ; elle est de moins d'intérêt en transmission horizontale, où les trajets multiples arrivent en paquets très concentrés. Par ailleurs, la mise en œuvre d'antennes très directives, efficaces en terme de filtrage, pose en contrepartie le problème de leur pointage angulaire, qui doit s'adapter à d'éventuelles variations de position des émetteurs-récepteurs. Des stratégies de directivité adaptatives ont donc été étudiées à cet effet, conduisant malheureusement à complexifier sérieusement la structure des systèmes concernés.

Modulations

La structure pénalisante du canal de transmission sous-marine (trajets multiples, Doppler, faible bande passante) limite souvent dans la pratique la mise en œuvre de modulations performantes (en terme de débit d'information) au profit de solutions robustes (en terme de sécurité de transmission). Les plus anciens systèmes de transmission acoustique sous-marine (téléphone sous-marin analogique) étaient basés sur des modulations d'amplitude d'une onde porteuse – avec des résultats acoustiques d'une qualité très médiocre du fait de la faible bande passante disponible et du fort impact des perturbations physiques par le canal de transmission.

Des modulations fréquentielles sont utilisées depuis longtemps pour la télécommande ou la transmission d'informations numérisées : le principe de base est d'affecter des fréquences différentes, avec des spectres convenablement disjoints, aux divers symboles à transmettre. Dans la version la plus simple de ce type de modulation (dite *Frequency Shift Keying*), seules deux fréquences sont nécessaires pour transmettre les bits « 0 » ou « 1 » ; mais on peut compliquer à loisir, et transmettre simultanément plusieurs couples de fréquences, de manière à augmenter le débit et exploiter au mieux la bande passante disponible. La relative sécurité de ce mode de modulation se paie par une médiocre efficacité spectrale

limitant les hauts débits ; l'augmentation du nombre de fréquences utilisées et leur rapprochement spectral dégradent la tolérance au Doppler et au *fading*. Certaines techniques ont été dérivées de ce principe, reposant essentiellement sur les transmissions de rampes linéaires de fréquences (*Chirp*, permettant d'améliorer le rapport signal/bruit au niveau des symboles individuels transmis) ou de techniques à évocation de fréquence (*Frequency hopping*, destiné à combattre les trajets multiples). Dernièrement, de nouvelles approches encore plus audacieuses basées sur des techniques de transmission par chaos (l'évolution de la fréquence porteuse suit un processus chaotique donc extrêmement difficile à prévoir) explorent une nouvelle façon de transmettre l'information.

Les modulations de phase permettent des performances plus intéressantes en débit que les solutions fréquentielles précédentes : l'information numérique à coder vient changer la phase d'une onde porteuse à fréquence fixe (*Phase Shift Keying*). Dans la version la plus simple, seuls deux états de phase (espacés de π) sont nécessaires pour coder des symboles binaires ; mais on peut mettre en œuvre des modulations à plusieurs états de phase pour améliorer l'efficacité de la transmission, avec un meilleur débit numérique mais malheureusement une fragilité accrue aux effets indésirables de modulation par le canal. Sur la base de ce principe élémentaire, de nombreux raffinements ont été apportés ces dernières années à l'instar notamment des progrès observés dans les autres milieux de transmission (câble ADSL, WiFi ou WiMax). Une première approche consiste à observer que le canal de transmission acoustique présente une certaine bande de cohérence (partie en rouge sur les fonctions de transfert présentées auparavant) entrecoupée par des évanouissements (partie en bleu). Sur cette bande de cohérence, le canal se présente comme un filtre passe-tout et cette particularité peut être exploitée pour utiliser des modulations à haut rendement spectral. Ainsi, en partageant le canal disponible (canal de transmission et transducteur inclus) en sous-bandes sur lesquels le *fading* est moins prononcé, il est possible d'accroître le débit de transmission. En intégrant des raffinements supplémentaires (intervalle de garde sur chacune des sous-porteuses, codage canal et utilisation de la FFT en particulier), cette technique se rapproche ni plus ni moins de l'*OFDM* (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*), technique largement utilisée dans le monde hertzien notamment dans certaines versions de la norme WiFi. La particularité apportée par le milieu acoustique sous-marin réside dans l'identification *a priori* de ces sous-canaux et du choix de l'ordre de modulation le plus approprié.

Une autre approche consiste à conserver la bande disponible pour protéger le symbole à transmettre par l'insertion d'une signature appelée aussi code d'étalement. Cette technique, appelée étalement de spectre par séquence directe, permet de superposer ou de faire cohabiter sur la même bande fréquentielle plusieurs émissions. À la réception, le signal désiré est aisément retrouvé par la connaissance de cette signature, les autres signaux étant alors rejetés comme du bruit. Cette technique forte attrayante et connue sous le nom de *CDMA* (*Code Division Multiple Access*) est très gourmande en terme de ressource spectrale et limite donc le débit d'informations à la portion congrue. Néanmoins, des techniques nouvelles basées sur le *MIMO* (*Multiple Inputs Multiple Outputs*) pourront à l'avenir tirer profit de cette technique en ajoutant chacune des voies de transmission à une même application. Ainsi à la diversité temporelle, spatiale et fréquentielle pourra s'ajouter une quatrième dimension, la

diversité par codes. La réception repose alors sur une cellule de compensation dite « filtre en râteau » (*rake*) chargée de sommer les contributions des différents trajets pour tirer parti de la diversité d'information véhiculée par chacun des trajets. En contexte multi-utilisateurs, ces récepteurs sont raffinés pour pouvoir décoder successivement (*SIC/RAKE*) ou simultanément (*PIC/RAKE*) toutes ces transmissions.

Ces derniers apports sont de première importance pour satisfaire les nouvelles applications dont nombre d'entre elles sont basées sur des communications en réseau, que ce soit par simple relais ou structure maillée (*mesh architecture*).

Egalisation

La structure de trajets multiples est responsable de l'étalement temporel du signal de réception, source de l'interférence entre symboles et des problèmes d'évanouissements dans la fonction de transfert du canal acoustique sous-marin. Il a longtemps été d'usage de s'affranchir de cette contrainte par l'insertion d'un temps de garde (la durée du *chip* élémentaire d'information est imposée supérieure ou égale à la durée de l'étalement) mais les performances du système s'en trouvent alors fortement dégradées en termes de débit. Compte tenu de la faible efficacité spectrale disponible, cette technique est vite devenue rétrograde. Un aspect développé depuis plusieurs années a consisté à compenser les évanouissements apportés par le canal de transmission. Cette technique de compensation appelée égalisation, repose cependant sur l'identification de ces évanouissements -inconnus *a priori*-, sur le suivi de leur évolution et sur leur compensation. On distingue principalement deux familles d'identification de ces évanouissements. On parle d'approche entraînée lorsqu'ils

sont estimés par sondage régulier (émission et réception d'un message connu périodiquement), et d'approche autodidacte lorsque cette estimation se fait par l'analyse des propriétés statistiques du signal. Au niveau de la structure de réception, il est d'usage désormais d'utiliser une structure d'égalisation à retour de décision dans la boucle (*Decision Feedback Equalizer*) en approche multi-capteurs pour apporter une diversité spatiale et de meilleures conditions de réception. Cette technique a permis notamment la transmission d'images en configuration verticale (projet TIVA mené par l'IFREMER) puis en configuration horizontale (projet TRIDENT mené par le GESMA, DGA).

Depuis, de nombreux développements ont consisté à tirer parti de ces différentes techniques de base, à savoir mêler le processus d'égalisation avec les techniques d'étalement de spectre ou les techniques de codage de canal (égalisation au temps *chip*) ou encore intégrer à ce procédé un traitement itératif pour améliorer les performances de réception passe après passe.

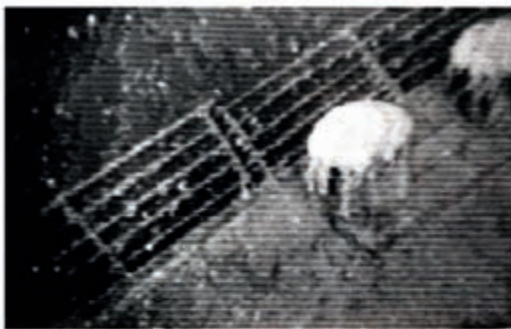
Codage correcteur

Il convient de signaler que les progrès substantiels, obtenus depuis l'avènement des processeurs de signaux et par voie de conséquence des capacités de calculs intégrables au sein des modems acoustiques, ont permis d'insérer des techniques de correction d'erreur par le biais du codage de canal. Cette étape, inutile si les conditions de réception ne sont pas satisfaisantes, apporte un gain appréciable en terme de qualité de transmission. Si les liaisons de transmission affichent des taux d'erreur binaires de 10^{-3} sans codage, il est usuel de pouvoir obtenir des taux améliorés jusqu'à 10^{-6} avec codage. À ce niveau de fiabilité, les applications nécessitant des transmissions d'images peuvent être assurées par des liens de transmission acoustique. Les choix stratégiques dans ce domaine ne sont pas complètement arrêtés même si des tendances se dégagent sur certains codes en bloc ou convolutifs.

Panorama des systèmes et des applications des transmissions acoustiques sous-marines

On se doit de mentionner en préambule que l'offre industrielle en systèmes de transmissions acoustiques sous-marines, est techniquement très en deçà des performances académiques des systèmes expérimentaux présentés auparavant. D'une part, en raison du nécessaire transfert de technologie entre une technique de transmission dite de laboratoire et son intégration dans un système embarqué. D'autre part, parce qu'un tel système de transmission, une fois développé, est bien souvent intégré dans un système plus complexe où doivent cohabiter d'autres équipements acoustiques (sonar, *pinger*, loch Doppler etc). Une gestion du spectre acoustique et une coordination entre tous ces éléments sont alors à rechercher.

Les premiers équipements reposaient sur des techniques de transmission analogique à l'image des équipements TUUM toujours en service à bord des sous-marins de la marine française (voir figure page 43). Depuis les équipements se sont tournés naturellement vers l'intégration de modulations numériques. L'offre industrielle est représentative du spectre d'applications en vigueur actuellement à savoir des liaisons de télécommande ou de transmission bas-débit sécurisée. Ainsi, la majorité des



Transmission verticale acoustique à distance (4 000 m) lors de l'exploration du Titanic par le Nautilus (projet TIVA, 1987, photo IFREMER) [4]



Transmission horizontale acoustique à distance (1 000 m) lors d'une investigation de mine par un plongeur (projet TRIDENT, 2002, photo GESMA) [5]

Fig. 2 : Transmission d'images par voie acoustique sous-marine

modems acoustiques présents sur le marché reposent sur des modulations de fréquences et des traitements non cohérents (*Chirp*, évansion de fréquence ou peigne de fréquence) dont les débits restent cantonnés à quelques dizaines/centaines de bits par seconde. L'arrivée des drones et les opérations de surveillance vidéo ont incité depuis les industriels à s'intéresser aux techniques de transmission plus efficaces et au traitement cohérent. Des modems intégrant des modulations de phase avec codage de canal sont désormais disponibles et permettent d'afficher des débits de plusieurs dizaines de kbits/s. Bien évidemment, ceci a eu pour conséquence de réduire les portées usuelles de transmission (de l'ordre de quelques kilomètres) en raison des fréquences porteuses utilisées plus élevées (quelques dizaines de kHz).

Les exemples d'applications sont nombreux et leur champ ne cesse de croître au fur et à mesure des progrès observés dans les performances de transmission. Une approche sectorielle consisterait à citer :

- Les équipements à très courte portée pour les communications entre plongeurs ;
- Les liaisons de télécommande et télémétrie des drones sous-marins, thématique en plein essor actuellement ;
- Les systèmes de communication entre un navire de surface et un sous-marin en plongée ;
- Les transmissions avec les stations autonomes de mesures déployées sur le fond de la mer ;



Téléphone acoustique sous-marin TUUM (Sté Thalès Safare)



Modems acoustiques MATS (Sté Sercel)

Fig. 3 : Exemples de matériels de transmission acoustique sous-marine

- Les interfaces eau-air par la mise au point de bouées relais permettant d'échanger avec les mobiles sous-marins des informations provenant ou à destination de l'extérieur (plate forme de surface, à terre).

In fine, pour les différentes applications pratiques et qualités de services attendues, telle modulation peut paraître plus appropriée que les autres ; par exemple :

- Transmission sécurisée et robuste : FSK de type *Chirp* ou *Frequency Hopping* (de 20 bits/s à quelques kbits/s)
- Transmission longue distance : étalement de spectre par séquence directe (20 bits/s)
- Transmission haut-débit : modulation de phase PSK (plusieurs dizaines de kbits/s)
- Contexte réseau ou multi-utilisateurs : CDMA/DSSS (20 bits/s)

L'état du marché des équipementiers en modems acoustiques reflète bien cette tendance, à savoir la proposition d'équipements multimodulations. Si le modem MATS [4] de la société Sercel (ex-ORCA Instrumentation) a été le premier à baser son fonctionnement sur ce concept, on citera également le modem *Proteus* de la société anglaise QuinetiQ récemment mis en œuvre ou le modem μ -modem de WHOI (*Woods Hole Oceanographic Institute*) équipant les drones et sous-marins de l'US Navy. De nouveaux acteurs sont récemment arrivés sur ce marché en proposant également des équipements comme *LinkQuest* ou *EvoLogics* témoignant de l'intérêt porté à ce marché.

Perspectives

Les avancées observées ces dix dernières années sont bien réelles. Les années 90 ont vu l'émergence de nouvelles techniques de communication acoustique sous-marine généralement issues du boom technologique observé dans les transmissions hertziennes sans-fil. Les travaux actuels portent de plus en plus sur l'intégration de nouvelles capacités de communication au sein de systèmes plus complexes où cohabitent déjà de nombreux équipements acoustiques. Cette capacité de communication aura des impacts aussi bien sur la gestion du spectre acoustique que sur le déroulement des opérations au regard des informations récupérées auparavant en différé au retour de mission et obtenues désormais en temps réel. Il est probable que les années futures permettront d'intégrer le vecteur de communication sous-marin, par le biais de l'acoustique, aux autres sphères et supports d'échanges d'informations et de ce fait, rompre quelque peu l'isolement du « Monde du Silence » comme l'avait nommé le Commandant Cousteau...

Références bibliographiques

- [1] X. Lurton, «An introduction to underwater acoustic- principles and applications», Praxis publishing
- [2] M. Stojanovic, J. Catipovic, J. Proakis, «Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels», IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol.19, n° 1, January 1994.
- [3] M. Stojanovic, «Recent advances in high-rate underwater acoustic communication», IEEE J. Oceanic Eng., vol.21-1996
- [4] G Ayela, M. Nicot and X Lurton, «New Innovative multimodulation acoustic communication system», in Proc. Oceans94 (Brest – France), pp 292-295
- [5] G. Lapiere, N. Beuzelin, J. Labat, J. Trubuil, A. Goalic, S. Saoudi, G. Ayela, P. Coince, S. Coatelan, «1995-2005 : Ten years of active research on underwater acoustic communications in Brest», Proc. OCEANS 2005, Brest