



CAMPAGNE DE MESURES ESSWOCE : ENREGISTREMENT ET
ANALYSE DE SIGNAUX FM DANS LE CHENAL SOFAR

X. LURTON, S. LE RESTE, G. LOAEC

IFREMER, Centre de BREST, BP 70, 29280 PLOUZANE

RÉSUMÉ

La campagne ESSWOCE avait pour objet l'enregistrement à grandes distances (1000 km et plus) de signaux TBF (260 Hz) modulés en fréquence après propagation dans le chenal SOFAR. La structure du récepteur est présentée, et le dispositif expérimental est décrit avec le système d'enregistrement profond développé pour ces mesures. Les signaux enregistrés sont analysés en termes de fluctuations d'amplitude et de temps d'arrivée.

ABSTRACT

The ESSWOCE campaign was aimed towards long-range recording (1000 km and more) of VLF frequency-modulated signals (260 Hz) after propagation in the SOFAR channel. The receiver structure is presented, and the experimental infrastructure is described, with the deep recording system developed for the measurements. The recorded signals are analysed in terms of amplitude and arrival times fluctuations.

1. INTRODUCTION : LE PROGRAMME WOCE

L'objectif du programme océanographique international WOCE est d'étudier la circulation globale océanique et son influence sur le climat planétaire. Pour atteindre cet objectif sont mis en oeuvre des moyens de mesures soit satellitaires (TOPEX-POSEIDON, ERS1) soit *in situ* (mesures physiques ou chimiques). Le suivi des courants profonds sera effectué par trajectographie de flotteurs subsurface dérivants. Ces flotteurs, astreints à une immersion fixée, enregistreront les instants d'arrivée de signaux acoustiques émis par un réseau de sources fixes RAFOS couvrant la zone étudiée; ils remonteront périodiquement en surface, et retransmettront alors par ARGOS l'ensemble des données acquises en immersion, ce qui permettra la reconstitution de leur trajectoire. L'IFREMER réalise actuellement en partenariat industriel avec la société TEKELEC un tel flotteur ("MARVOR"). L'étude de définition du récepteur acoustique et de prédiction des performances des futurs flotteurs opérationnels a conduit à définir une expérimentation à la mer ("ESSWOCE") orientée vers la transmission et le traitement de signaux acoustiques à très grandes distances.

2. LA CAMPAGNE ESSWOCE

La campagne ESSWOCE, qui s'est déroulée du 10 au 30 juin 1990 à bord du navire océanographique "CRYOS", avait plusieurs buts:

- mesurer le niveau d'émission d'une source RAFOS *in situ*,
- tester en vraie grandeur un récepteur prototype réalisé par l'IFREMER, et mettre en évidence ses performances et limites d'utilisation,
- collecter des séries de signaux permettant une recette d'équipements, par la suite, en laboratoire.

Les sources RAFOS qui seront utilisées dans le programme WOCE sont construites par la société WRC (WEBB Research Corporation). La technologie employée est celle du tube accordé, et le niveau nominal émis est d'environ 175 dB/μPa/1m. Les sources seront ancrées sur des lignes de mouillage sur le fond de la zone d'observation à des positions géographiques connues. Elles émettent toutes périodiquement le même signal acoustique.

Pour ESSWOCE, une source RAFOS a été ancrée sur une ligne de mouillage de subsurface, à une immersion de 1500 m, par 4800 m de fond (Fig.1). Cette source était programmée pour émettre 60 signaux espacés de 2 minutes toutes les 8 heures. Il a ensuite été procédé à 12 stations d'écoute à l'aide d'un système spécifique décrit plus loin ("SEA-EAR"), ainsi qu'à des relevés de profils bathycélérimétriques, à des distances variables de la source (Fig.1). Les distances étaient comprises entre 1 et 1194 km de la source. Les stations 1 à 11 ont été réalisées avec l'équipement de mesures immergé sous le bateau dont tous les moteurs étaient coupés; le niveau moyen de bruit pour ces 11 stations était alors de 73 dB/μPa/√Hz. Pour la station 12 (à 1126 km) l'équipement de mesures était en dérive, suspendu sous une bouée de surface, le navire s'étant éloigné pour minimiser le niveau de bruit, qui fut alors mesuré égal à 65 dB/μPa/√Hz.

Les profils bathycélérimétriques rencontrés au cours de la campagne étaient tous de type Atlantique N.E. à double chenal, avec un minimum de célérité vers 500 m et un second vers 1500 m; ce phénomène bien connu est dû à l'intrusion d'eau méditerranéenne dans l'Atlantique. Le chenal SOFAR utilisé pour l'expérience était le chenal profond à 1500 m, qui permet des portées de propagation supérieures. La route choisie pour les mesures était telle que la hauteur d'eau soit constamment comprise entre 3500 m et 5000 m, pour éviter les effets de masquage par le relief du fond.

3. SYSTEME D'ENREGISTREMENT, D'ACQUISITION ET DE REJEU (SEA-EAR)

La nécessité d'enregistrer des signaux dans l'axe du chenal SOFAR a amené à développer un système spécifique d'enregistrement. Ce système permet l'acquisition jusqu'à des immersions de 1500 à 2500 m de signaux BF (bande audio) par un magnétophone DAT inclus dans le récepteur immergé, et de remonter dans le même temps le signal par le câble électro-porteur pour contrôle et traitement en temps réel à bord du navire de support.

L'ensemble de l'équipement immergé (Fig.2), constitué du système d'enregistrement, du bathycélérimètre et d'un lest, a été monté sur un châssis fixé à une ligne de mouillage conçue pour minimiser les bruits parasites. Le dispositif d'écoute est intégré dans un container cylindrique en alliage d'aluminium (diamètre extérieur 300 mm



et longueur 700 mm). Les deux hydrophones sont fixés sur la tape inférieure. La tape supérieure possède un connecteur pour la programmation du système (RS 232) et un connecteur pour la sortie de transmission du signal sur le câble électroporteur de type bathysonde. L'équipement se compose de:

- deux hydrophones, de sensibilité -195 db/1V/ μ Pa, fixés sur la tape inférieure,
- deux préamplificateurs faible bruit à gain ajustable conditionnés en boîtier blindé (bruit < 30 nV/ \sqrt Hz),
- un enregistreur numérique DAT 2 voies, de capacité d'enregistrement 120 mn et de 80 dB de dynamique,
- une carte microprocesseur assurant la gestion de l'enregistrement et comportant un circuit horloge temps réel, des périphériques de type parallèle et série, de la mémoire programme et de la mémoire vive,
- une carte alimentation et transmission du signal sur le câble bathysonde. La transmission est effectuée au moyen d'une liaison en courant de type 4-20 mA. Les parties écoute-enregistrement et transmission sur câble sont séparées par un amplificateur d'isolement pour minimiser les problèmes de bruit,
- un bloc de piles alcalines comprenant 13 piles de 6 V/16 Ah permet d'effectuer environ 40 enregistrements de 2 heures.

Après mise sous tension de l'ensemble et fermeture du container, l'utilisateur dialogue avec le dispositif par l'intermédiaire d'un terminal possédant une liaison série RS232. L'horloge du système est sauvegardée par une pile indépendante, et peut être consultée ou mise à l'heure par le logiciel de programmation. Chaque séquence d'enregistrement est programmée par ses heures de début et de fin. Lorsque le tableau de séquençement est rempli, une commande valide son contenu et active la phase d'enregistrement.

Le bathycélérimètre utilisé, modèle SUBER SU530, réalise des mesures de pression (± 1 %), de température ($\pm 0,05$ °C) et de célérité du son (± 10 cm/s) jusqu'à une immersion maximale de 3 000 m. Sa capacité d'enregistrement est de 32 000 mesures et sa cadence d'acquisition est de 1s. Le bathycélérimètre permet à la fois d'effectuer le relevé du profil de célérité et d'enregistrer le comportement en immersion du système au cours des mesures.

L'équipement de surface reçoit le signal en provenance du câble bathysonde, et réalise l'adaptation pour son enregistrement. Il intègre également l'électronique du récepteur, utilisable pour un traitement en temps réel ou en temps différé lors d'un rejeu des bandes enregistrées.

4. RECEPTEUR DE SIGNAUX

Signal et récepteur utilisés

Le signal utilisé pour la localisation des flotteurs WOCE est une rampe linéaire de fréquence, de durée $T = 81,4$ s et d'excursion $B = 1,52$ Hz autour de 260 Hz. La fonction d'autocorrélation d'un tel signal démodulé autour de sa fréquence basse est en:

$$C(\tau) = \text{sinc}(2\pi \cdot B \cdot \tau)$$

soit une largeur d'environ $1/2B = 0,33$ s pour le lobe principal. Cette caractéristique permet de profiter de la structure temporelle étalée du chenal SOFAR (le récepteur intégrant l'énergie des trajets d'une séquence de trajets multiples arrivant dans cet intervalle de temps), tout en gardant une précision suffisante en mesure de temps [1].

Le récepteur utilisé dans les flotteurs est un corrélateur écrêteur, qui compare les signes des signaux reçus et émis. Ce type de récepteur, comparé à un vrai corrélateur, permet d'obtenir un meilleur indice de détection aux faibles valeurs du S/B. Son inconvénient est un comportement non-linéaire pour les forts rapports S/B en présence de trajets multiples; ce dernier cas est de peu d'intérêt pour l'application aux flotteurs WOCE, pour lesquels les S/B par trajet sont en général inférieurs à 0 dB. Les avantages de ce type de récepteur sont nombreux: simplification maximale des opérations de corrélation (le signal étant numérisé sur un seul bit), auto-normalisation des signaux détectés, niveau de bruit constant en sortie, rôle peu critique du CAG. Les principaux intérêts pratiques sont la simplicité de conception et la faible consommation, déterminantes dans ce type de matériel pour lequel les contraintes opérationnelles sont très astreignantes.

Description du récepteur (Fig.3)

Le signal en provenance du préamplificateur passe dans un filtre passe-bande (5 Hz autour de 260 Hz) réalisé avec des composants à faible dérive thermique, puis dans un étage de contrôle automatique de gain (dynamique de 45 dB) destiné à éviter d'éventuelles saturations en cas de fortes fluctuations du niveau de bruit en TBF. Il est ensuite ramené en bande de base par deux changements successifs de fréquence, et finalement écrété. L'écrêteur ne retient du signal démodulé que son signe, et le code donc sur deux valeurs. Une carte microprocesseur échantillonne à 10 Hz ce signal écrété et transmet le résultat sous forme d'octets série (liaison RS232) au corrélateur qui fonctionne sur un compatible PC. Celui-ci réalise la comparaison avec les trames de référence sinus et cosinus: chaque opération se ramène à la sommation des résultats d'opérations de "ou exclusif". La déformation de phase du signal apportée par le démodulateur est prise en compte au niveau du corrélateur: les chaînes de référence sont acquises à travers la même chaîne de démodulation. Le PC calcule et affiche en temps réel la fonction de corrélation du signal reçu (Fig.4). Un logiciel d'analyse permet finalement en différé le calcul des caractéristiques de fluctuations de niveaux et de temps d'arrivée au cours des séquences d'écoute.

5. ANALYSE DES SIGNAUX

Les signaux enregistrés ont été systématiquement analysés en sortie du corrélateur de phase. L'étude des signaux après traitement a été orientée vers les points suivants: structure des signaux, fluctuations des instants et des niveaux d'arrivée.

On donne en Fig.5 le détail des signaux temporels après traitement, pour l'ensemble de la séquence du 26/06/90; les signaux représentés durent 10 s, centrés sur l'instant nominal d'arrivée. Ceux-ci ont été référencés par rapport à l'instant d'arrivée d'un signal particulier choisi pour son niveau de corrélation élevé.

L'allure des signaux SOFAR tels que prévus par la théorie comporte une montée progressive



(plusieurs) vers un maximum très marqué correspondant à l'arrivée des trajets se propageant dans l'axe du chenal SOFAR (donc les plus lents), suivi par une brusque extinction. Les signaux enregistrés pendant ESSWOCE correspondent assez bien à ce schéma; toutefois la phase de montée n'est pas toujours très apparente, du fait du profil bathycélérimétrique rencontré, qui ne provoque un étalement que de l'ordre de 2 s à 1000 km. La détection d'un pic principal unique très marqué est observée dans la majorité des cas ; moins de 25 % des signaux recueillis font apparaître plusieurs pics de corrélation , et ces cas correspondent toujours à de faibles valeurs du S/B de sortie. Ces pics multiples sont dûs au comportement du récepteur en présence du signal SOFAR, de structure temporelle très perturbée [1], et ne peuvent pas être interprétés en terme de trajets multiples identifiables.

Les niveaux des signaux après corrélation sont très fluctuants, si l'on considère que l'émetteur et le récepteur étaient supposés être fixes pendant les mesures. Pour chaque séquence les niveaux ont été ramenés au niveau moyen de la séquence; l'histogramme de l'ensemble des niveaux relatifs pour l'ensemble de la campagne a finalement été tracé. La loi de distribution ainsi obtenue est assez proche d'une loi de RICE (Fig.6), dont la puissance de la partie déterministe serait de l'ordre de 0.64 de la puissance totale, et donc assez différente de la loi de RAYLEIGH souvent proposée pour ce type de propagation (grand nombre de trajets multiples d'amplitude comparable). On notera toutefois que la détermination des niveaux de corrélation les plus faibles est hasardeuse du fait du niveau de bruit, et que la distribution des niveaux obtenus peut donc être faussée pour les faibles amplitudes, en accentuant artificiellement le caractère Ricien.

Les instants d'arrivée sont également assez perturbés. Une partie des fluctuations est assez régulière et interprétable en termes de dérive du système en distance et immersion; , mais par ailleurs les écarts observés peuvent atteindre 1 à 2 s entre deux signaux successifs (distants de 2 mn); dans la mesure où ces écarts ne peuvent être interprétés ni en terme de dérive de la distance émetteur-récepteur ni en termes de DOPPLER, on doit admettre qu'ils sont dûs à des perturbations de la structure multitrajets très complexe du signal SOFAR (dus à des mouvements source-récepteur ou à des fluctuations de la structure océanique sur le trajets des signaux); on sait qu'une telle structure de signal peut avoir des effets catastrophiques sur un traitement par corrélation [2]. Cette analyse est corroborée par le fait que les fluctuations temporelles maximales instantanées sont associées à des signaux de mauvaise qualité par ailleurs (faible S/B, pics multiples). De telles perturbations sont *a priori* imprédictibles, et fixent donc la limite de précision de mesure d'un système de trajectographie utilisant ce type de signaux et de propagation.

L'analyse de la phase du signal reçu, calculée à partir des deux composantes de la corrélation à l'instant de détection du maximum, n'a pas fait apparaître de tendance identifiable ; la variation de phase obtenue entre des pics de corrélation séparés de 2 mn est de caractère apparemment aléatoire, ce qui est bien conforme à la structure multitrajet très instable du signal SOFAR.

Enfin le traitement de signaux simulés à partir d'un modèle de rayons propres classiques superposés à un bruit blanc gaussien généré dans la bande du signal a permis de retrouver les distributions de niveaux de corrélation mesurés *in situ*.

6. CONCLUSIONS

La campagne ESSWOCE a permis de valider *in situ* le comportement du récepteur acoustique destiné aux flotteurs WOCE: des portées de 1200 km ont été obtenues avec de bonnes performances. L'analyse des signaux enregistrés a permis de retrouver les caractéristiques spécifiques des signaux SOFAR prévues par la modélisation, de quantifier les ordres de grandeur des fluctuations de ces signaux, et finalement de conforter les analyses prédictives de performances menées pour ce type de transmissions.

Références

- [1] X.LURTON "Réception de signaux à très grandes distances en océanographie", 1er Congrès Français d'Acoustique, Colloque de Physique, Colloque C2, Suppl.N°2, t.51, (1990).
- [2] A.H.NUTALL "Linear FM correlator response for multiple targets; mismatched reference and signal amplitude modulations", NUSC Tech. Rep. 7543 (1985).

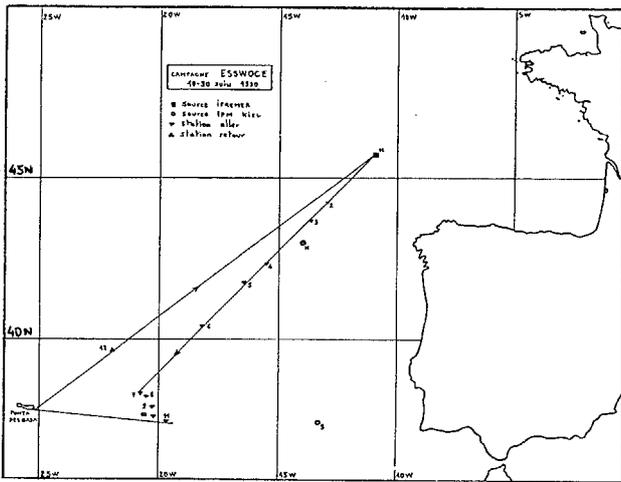


Fig.1. Configuration de la campagne ESSWOCE.

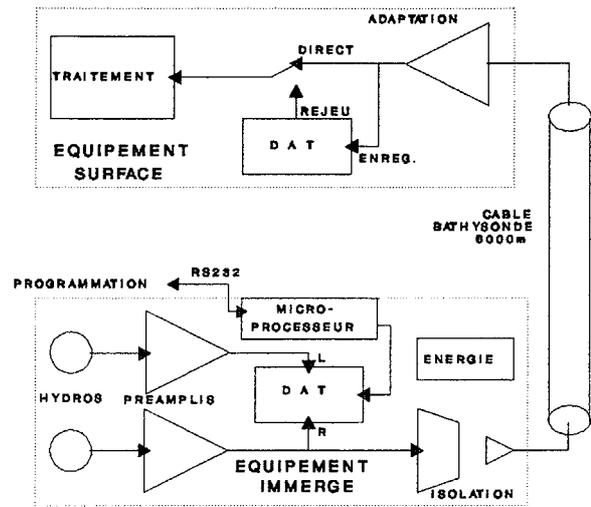


Fig.2. Synoptique du Système d'Enregistrement, d'Acquisition et de Rejeu (SEA-EAR).

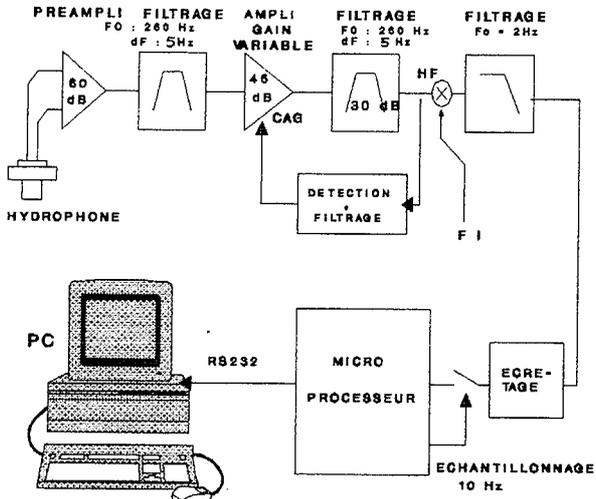


Fig.3. Synoptique du récepteur acoustique.

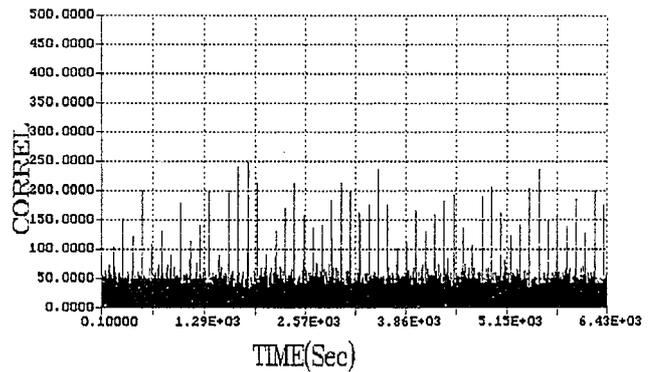


Fig.4. Sortie du corrélateur pour la séquence de la station 12 (1126 km).

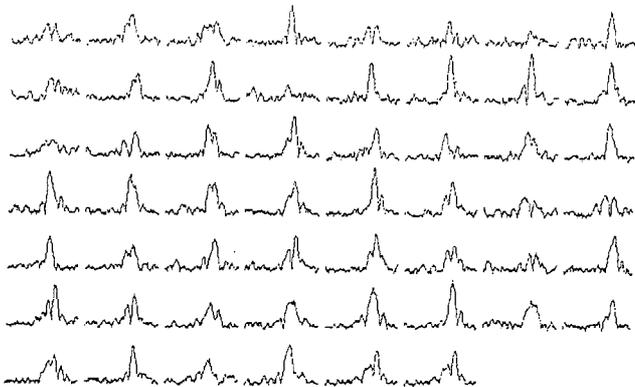


Fig.5. Détail des détections de signaux de la station 12.

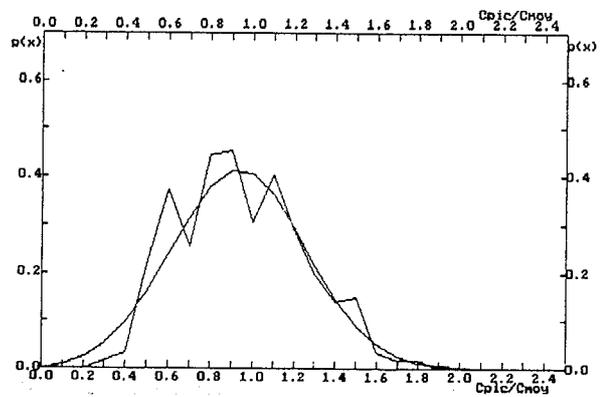


Fig.6. Distribution des amplitudes des signaux de l'ensemble de la campagne ESSWOCE, confrontés à une loi de RICE.



Treizième Colloque sur le Traitement du Signal et des Images

SOMMAIRE DES CONFERENCES INVITEES

CHAOS ET SIGNAL	1235
C. MIRA (Groupe d'Etude des Systèmes Non Linéaires et Applications - Institut National des Sciences Appliquées - Complexe Scientifique de Rangueil 31077 TOULOUSE CEDEX - FRANCE)	
DIGITAL MACHINES INTERATING CHAOTIC MAPS : ROUND OFF INDUCED PERIODICITY	1257
C. BECK (Institute for Theoretical Physics, Technical University of Aachen, W-5100 Aachen Germany)	
DIMENSIONS ET CARACTERISATION DE SIGNAUX CHAOTIQUES	1265
S. CILIBERTO ET P. FLANDRIN (Ecole Normale Supérieure de Lyon - Laboratoire de Physique (URA 1325 CNRS) - 46, allée d'Italie - 69364 Lyon Cedex 07 et GdR 0134 CNRS Traitement du Signal et Images.)	
DYNAMIC BEHAVIOR IN A DIGITAL FILTER WITH SATURATION-TYPE ADDER AVERFLOW CHARACTERISTIC	1271
M. J. OGAZALEK (Department of Electrical Engineering - University of Mining and Metallurgy - al. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland)	
COMPORTEMENT CHAOTIQUE DE CIRCUITS ELECTRIQUES	1275
M. HASLER (Département d'Electricité EPFL - 1015 Lausanne, Suisse)	
DU SIGNAL MUSICAL AU CHAOS	1289
V. GIBIAT (Laboratoire Ondes et Acoustique - E.S.P.C.I. - 10, rue Vauquelin - 75005 PARIS)	
DETECTION OF CHAOTIC BEHAVIOUR IN SPEECH SIGNALS USING FRASER'S MUTUAL INFORMATION ALGORITHM	1303
H. P. BERNHARD AND G. KUBIN (Institut für Nachrichtentechnik und Hochfrequenztechnik, Technische Universität Wien, Gusshausstrasse 25/389, A-1040 Vienna, Austria)	