

## TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 7 au 12 mai 1973

---

EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES\*

---

Georges BIENVENU et Jean-Louis VERNET

THOMSON-CSF - Division des Activités Sous-Marines  
06802 CAGNES-sur-MER

---

**RESUME**

On présente les performances à la mer d'un dispositif de communications sous-marines qui utilise, pour lutter contre les trajets multiples, un traitement temporel de l'information, et une antenne directive de réception asservie en site. Ce dispositif est adapté aux conditions :

- grande immersion de l'émetteur
- faible immersion du récepteur,
- grands fonds.

Il a aussi été testé dans des conditions petits fonds afin d'apprécier ses limites dans ce cas.

**SUMMARY**

In this paper is presented the performance obtained in the sea of an underwater communication processor which uses for multipath effects reduction a time processing and a directive receiving antenna which is automatically site directed. This processing device is adapted to the conditions :

- transmitter deeply immersed
- receiver near the surface
- deep water

It has been also tested in shallow water in order to appreciate its limits.

\* Etude financée par la Direction des Recherches et Moyens d'Essais - Paris (France).

EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

---

INTRODUCTION.

Dans cet exposé on présente un dispositif de communications sous-marines qui permet un taux de transmission de 600 bits d'information par seconde en présence de trajets multiples pour les conditions suivantes :

- les deux correspondants sont distants de 1 à 10 km et peuvent être en mouvement l'un par rapport à l'autre ;
- le récepteur est près de la surface (10 à 300 mètres) ;
- l'émetteur est fortement immergé (1000 à 1500 mètres) ;
- le fond est de l'ordre de 2500 m.

On utilise un traitement temporel de l'information, et un traitement spatial : on considère que l'information est portée par le trajet direct et que les autres trajets constituent des parasites. Le principe du traitement temporel (codage-décodage) a été exposé lors du Colloque GRETSI de 1971 [1]. On rappelle dans le premier paragraphe les caractéristiques principales de ce traitement, et les résultats obtenus en laboratoire en simulant les conditions de propagation et un traitement spatial simple.

Les résultats présentés ici ont été obtenus en mer avec un traitement spatial plus évolué qui permet une meilleure réjection des trajets parasites.

1. - CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES CONDITIONS DE PROPAGATION ET DU TRAITEMENT TEMPOREL.

1.1. Conditions de propagation.

Le calcul des caractéristiques théoriques des



EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

trajets multiples a montré que le trajet le moins perturbé est le trajet direct (D). Parmi les autres trajets, les plus gênants sont :

- le trajet réfléchi sur la surface (S) : il peut avoir la même amplitude que le trajet direct, et un faible écart angulaire avec ce dernier (de l'ordre de  $6^\circ$ ). Il arrive au-dessus de lui, avec un retard inférieur à 90 ms.
- le trajet réfléchi sur le fond (F) : son amplitude est inférieure de 2 dB au-moins à celle du trajet direct. Il arrive au-dessous de lui.
- le trajet réfléchi sur le fond puis sur la surface (FS) son amplitude est inférieure de 2 dB au moins à celle du trajet direct. Il arrive au-dessus de lui.
- le trajet réfléchi sur la surface, puis sur le fond (SF) : son amplitude est inférieure de 8 dB au moins à celle du trajet direct. Il arrive au-dessous de lui, avec un retard qui varie de 0,7 à 6,5 secondes.

1.2. Traitement temporel [2].

Le traitement temporel a été défini en considérant que l'information utile est portée par le trajet direct, et que les autres trajets forment un bruit qui est cependant proportionnel au signal utile.

Le système de codage adopté est le suivant. L'information supposée fournie sous forme de digits 0 ou 1, est codée en faisant correspondre à toute tranche de 4 digits un code pris dans un ensemble de 16 codes orthogonaux formés de 16 digits de durée égale et d'amplitude : +1 ou -1, la durée totale des codes étant égale à 6,4 ms. (Remarque : pour être orthogonaux, les

EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

---

codes doivent posséder au moins 16 digits). Ces codes sont émis après transposition autour de 15 kHz (on obtient alors une modulation P.S.K.). Leur spectre s'étend de 12,5 kHz à 17,5 kHz, valeurs pour lesquelles il est nul.

En réception, le signal reçu est corrélé avec chacune des 16 copies des codes dans 16 corrélateurs, dont on compare les 16 sorties à l'instant d'arrivée des codes : on décide que le code reçu est celui qui correspond au corrélateur qui donne alors la plus grande valeur. L'instant d'arrivée des codes est obtenu en utilisant les propriétés des fonctions d'ambiguïté en distance des codes. On forme une fonction qui est égale à chaque instant à la valeur maximum des 16 corrélateurs et dont la durée est celle d'un code. Elle est ensuite ajoutée au résultat de la somme des  $N$  fonctions antérieures de laquelle on retranche la valeur de la plus vieille fonction (intégration multicanaux : chaque canal est repéré par sa position en temps dans la durée d'un code). L'instant d'arrivée est donné par la position du maximum de la fonction qui résulte de cette intégration.

Les correspondants pouvant être en mouvement, la durée des codes peut varier en réception par effet Döppler. Une fréquence pure est émise en bordure de bande : 12,5 kHz, en même temps que les codes. Elle est séparée de ces derniers en réception par filtrage et traitée ensuite par une boucle phase-lock d'où l'on déduit une fréquence pilote qui donne la base de temps Döpplerisée nécessaire à tous les calculs.

Un schéma de principe du traitement temporel est porté sur la figure 1.



EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

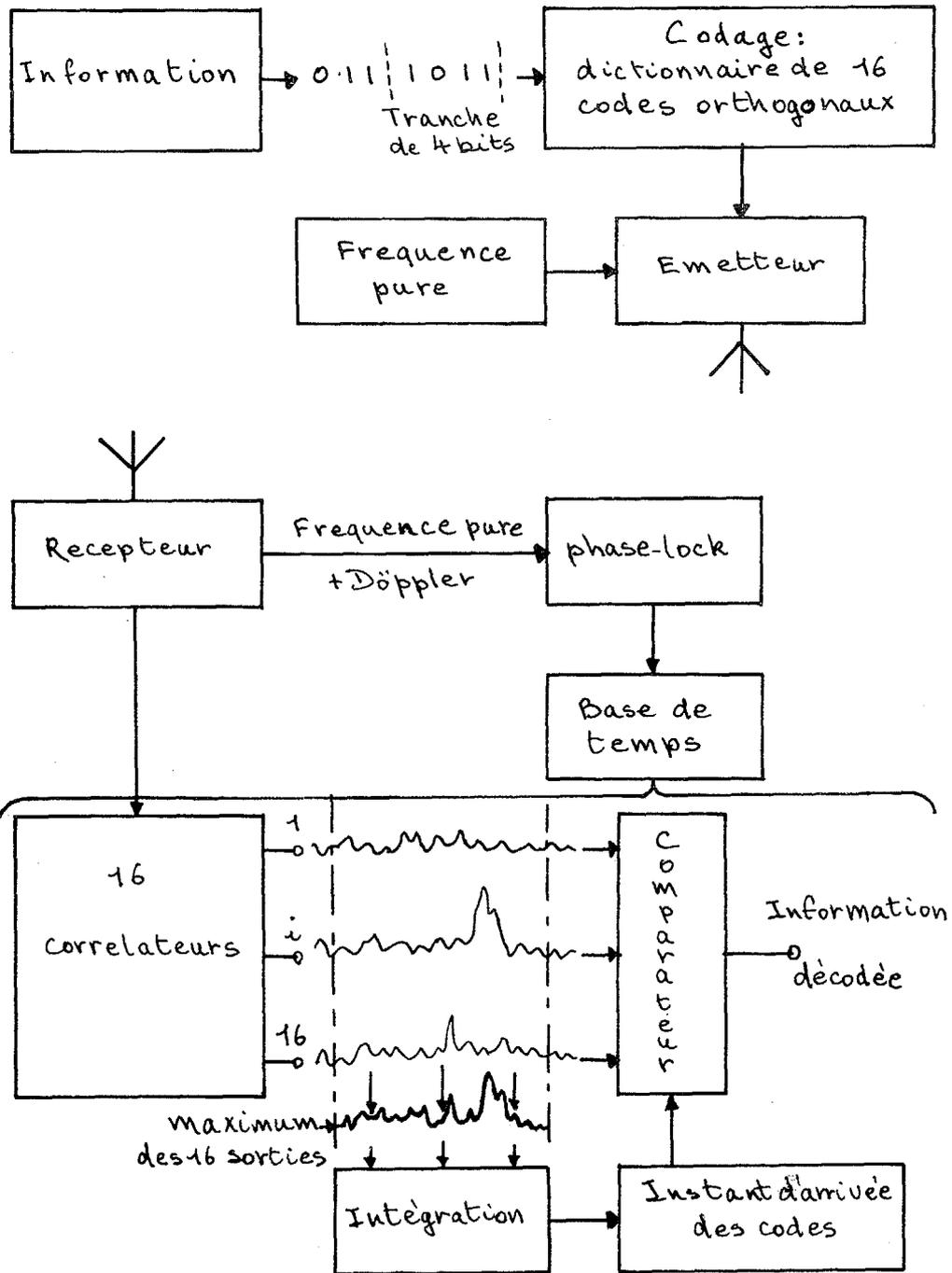


Figure 1 - Schéma de principe du traitement temporel.



EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

---

1.3. Traitement spatial.

Ce traitement temporel ne peut être efficace que si la somme des trajets parasites a une puissance inférieure de 3 dB à celle du trajet direct. Pour obtenir cette condition, on atténue facilement à l'émission par le diagramme d'antenne, les trajets qui se réfléchissent d'abord sur le fond : F et FS. Ceux qui se réfléchissent en dernier lieu sur la surface, sont atténués par le diagramme de l'antenne de réception. La difficulté réside dans l'atténuation du trajet surface à cause de son faible écart angulaire et d'amplitude avec le trajet direct à grande distance.

1.4. Emission séquentielle.

Le récepteur ne peut fonctionner correctement que si la synchronisation (instant d'arrivée, Döppler) est établie. Pour plus de sûreté, en cas de décrochage de cette dernière, l'émission est séquentielle : 7 secondes d'émission suivies de 7 secondes de silence au bout desquelles le dernier trajet gênant, soit SF a disparu. Le système peut alors se synchroniser sur le trajet direct seul, donc dans de bonnes conditions, au début de chaque séquence.

1.5. Taux d'information.

Le taux d'information ainsi atteint est égal à 300 bits d'information par seconde.

1.6. Résultats obtenus en laboratoire.

Des expérimentations en laboratoire ont été faites en simulant deux trajets : le trajet direct et



EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

un trajet retardé symbolisant l'ensemble des trajets parasites et dont l'amplitude est de 3 dB inférieure à celle du trajet direct, ce qui simule le filtrage spatial minimum. Les résultats sont portés sur la figure 2 qui présente le taux d'erreur (nombre de codes mal décodés/ nombre de codes reçus) en fonction du rapport signal à bruit (défini comme la racine carrée du rapport à la réception de la puissance des codes du trajet direct à celle du bruit) pour un rapport C/F (défini comme la racine carrée du rapport à la réception de la puissance des codes du trajet direct à celle de la fréquence pure 12,5 kHz du trajet direct) égal à 2,25 et à 1,6.

Le taux d'erreur vaut, avec un Döppler nul,  $10^{-3}$  pour un rapport signal à bruit de sortie de 12,5 dB et un rapport C/F égal à 2,25.

2. - FILTRAGE SPATIAL ASSERVI EN RECEPTION.

Le diagramme\* de réception doit a priori, si l'on ne possède aucune information sur la direction du trajet direct, permettre de recevoir ce dernier dans toutes les configurations prescrites, ce qui impose une ouverture allant de  $-3^\circ$  (en-dessous de l'horizon) jusqu'à  $-40^\circ$ . De ce fait, le trajet SF n'est pas très atténué, et à cause du trajet réfléchi sur la surface à grande distance, l'atténuation doit croître rapidement entre  $-3^\circ$  et  $3^\circ$ . Il faut de plus que l'antenne de réception soit très stable en site ( $1^\circ$ ).

Mais si l'on connaît la direction du trajet direct, il est alors possible d'effectuer un filtrage

\*Il s'agira toujours de diagrammes en site, sauf indication contraire.

EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A 600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

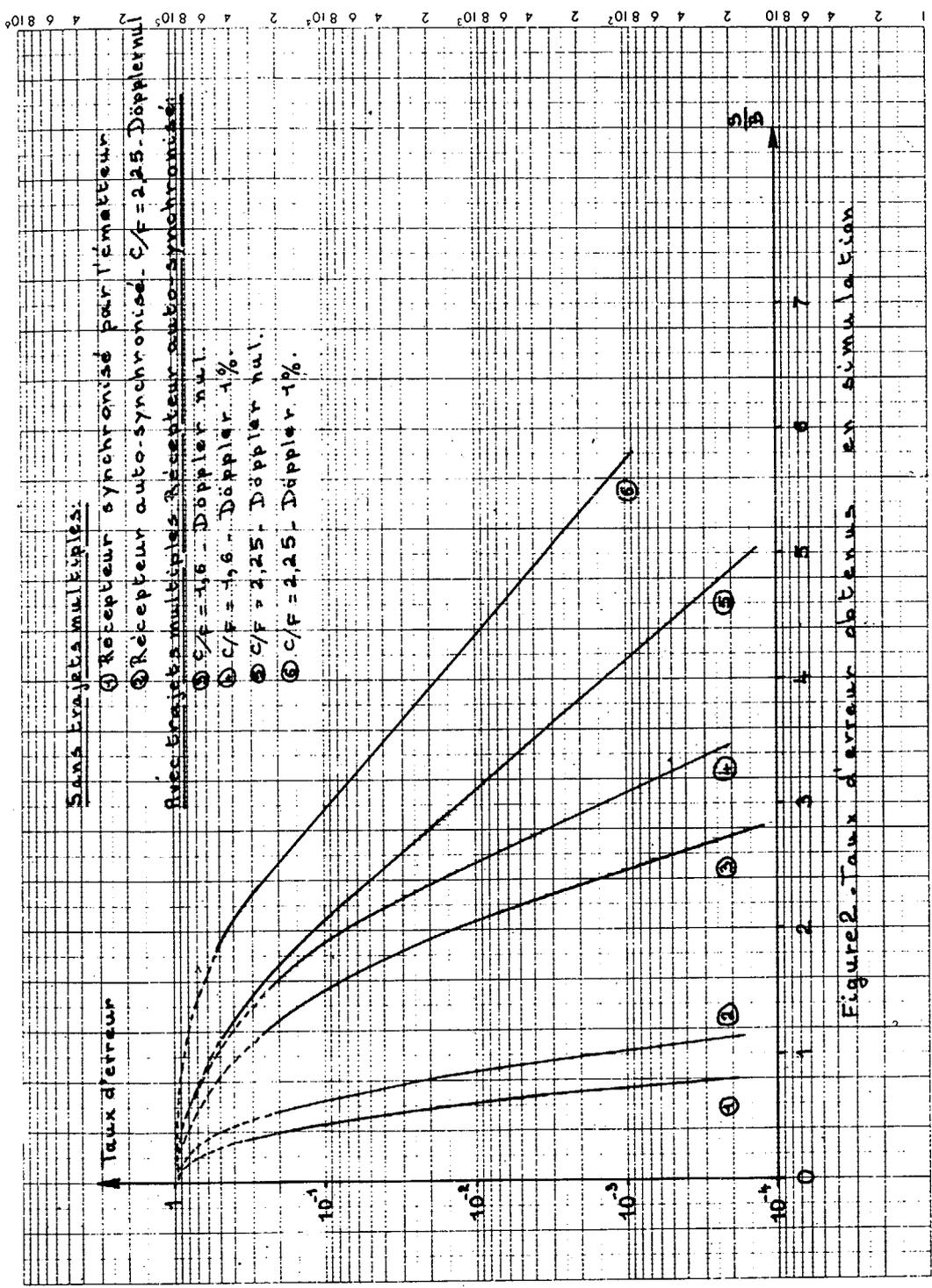


Figure 2 - Taux d'erreur obtenus en simulation



EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

spatial fin autour de cette direction et d'améliorer ainsi notablement le rapport signal utile sur signaux parasites.

Pour connaître la direction du trajet direct, on forme plusieurs voies en réception qui couvrent une plage angulaire suffisante, et on mesure l'énergie reçue dans chacune des voies : on obtient ainsi la carte des trajets reçus vus à travers l'antenne. A cause de la simplicité qu'elle procure, ces voies sont formées sur la fréquence pure qui est portée à 17,5 kHz de façon à avoir une directivité égale à la directivité moyenne pour les codes (obtenue à 15 kHz). La largeur de chaque voie doit être inférieure à l'écart angulaire minimum qui existe entre le trajet direct et les trajets parasites : il est obtenu avec le trajet réfléchi sur la surface, soit 6°.

Un système de logique simple décide ensuite à un certain rythme quelle est la voie qui contient le trajet direct : on choisit la première en partant du fond dont l'amplitude est supérieure à la moitié de la plus grande de toutes les voies. Cette procédure est basée sur des critères d'ordre : le trajet direct est toujours situé entre le trajet réfléchi sur la surface et celui réfléchi sur le fond ; les amplitudes des deux premiers trajets sont du même ordre ; celle du troisième doit être inférieure de 9 dB à celle du trajet direct pour que le système ne se trompe pas : cette condition peut être facilement obtenue par le filtrage spatial à l'émission. Une voie est alors formée par temps de retard pour recevoir les codes qui sont à large bande, en coïncidence avec la voie choisie précédemment.

EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

On peut remarquer que les trajets sont repérés par rapport à l'antenne et que donc celle-ci n'a pas besoin d'être stabilisée en site mécaniquement. Elle peut être solidaire du bâtiment de réception. Le schéma de principe de ce traitement est porté sur la figure 3.

Le nombre de voies formées est de 17. La voie centrale (l'antenne est plane) a une ouverture de  $6^\circ$ . On

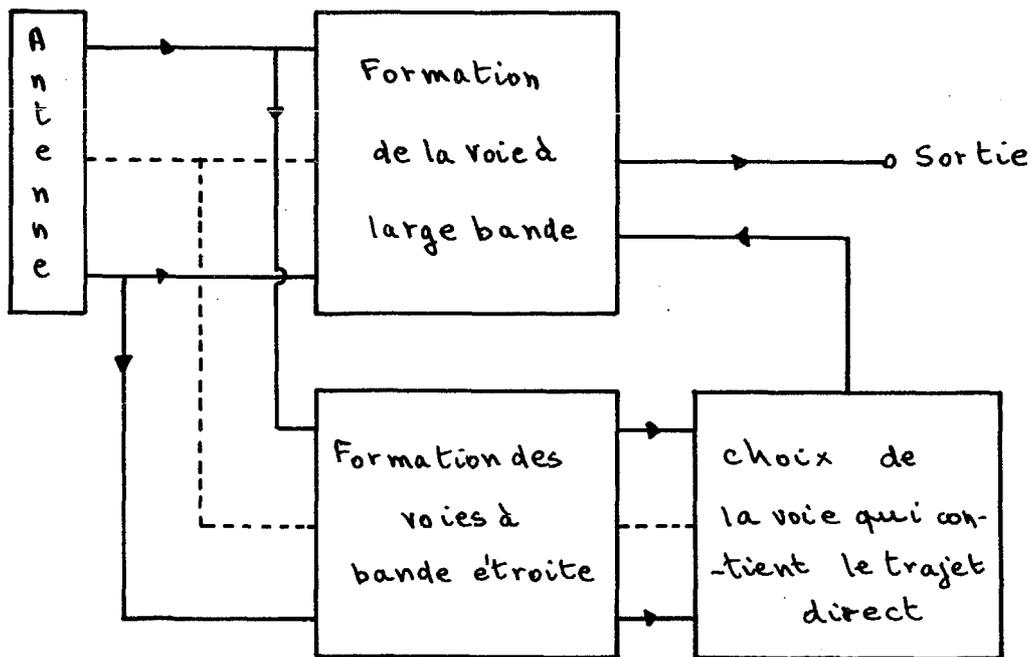
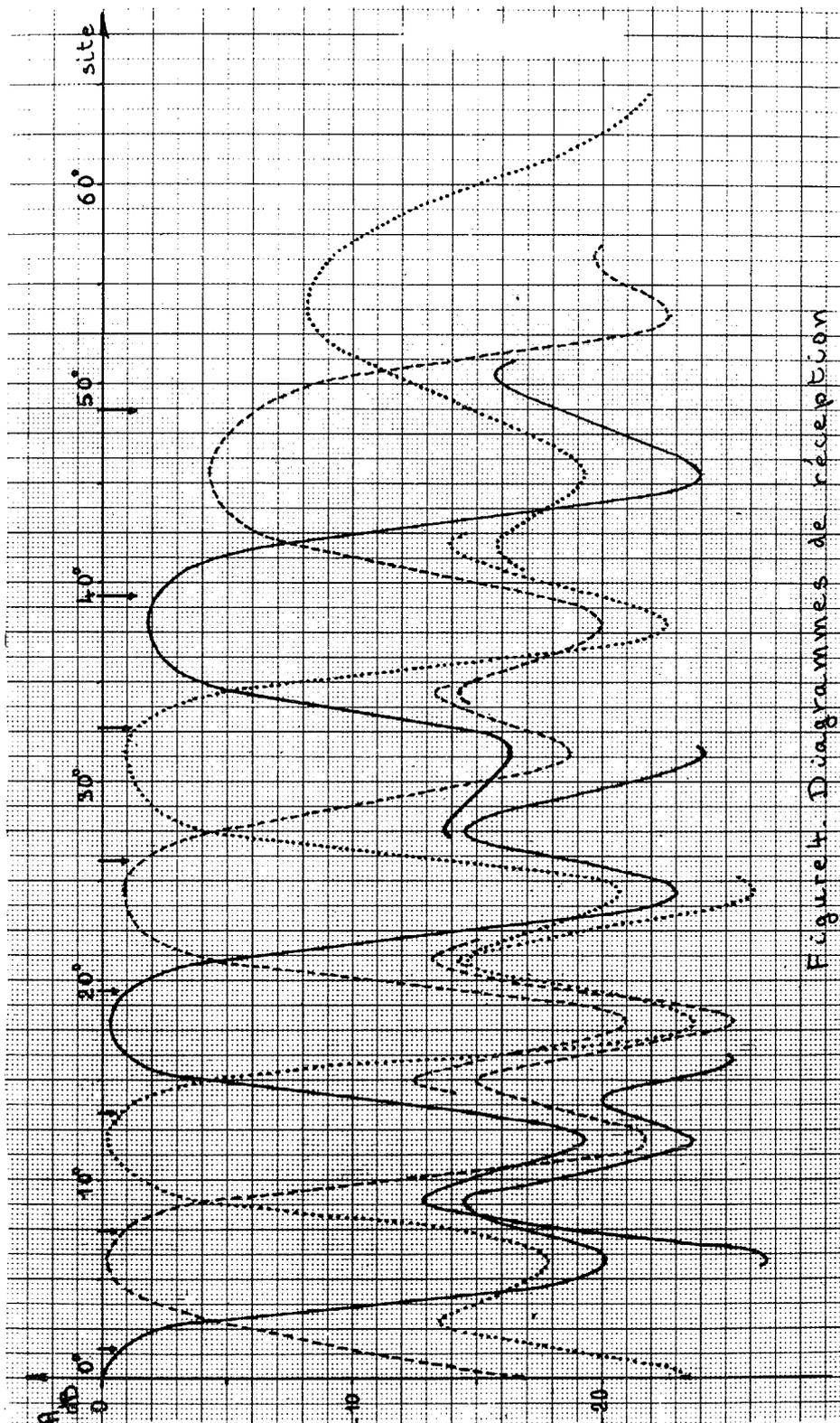


Figure 3

a présenté sur la figure 4 la moitié des lobes. La plage angulaire couverte est de  $\pm 57^\circ$ , ce qui inclus tous les cas possibles si l'on incline l'antenne de  $10^\circ$  vers le



EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.





EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

---

fond pour des oscillations de cette dernière de  $\pm 10^\circ$ .

Des tests effectués au Lac de Castillon ont montré que, à très fort signal à bruit, il n'y a pas d'erreur de décodage si les trajets direct et réfléchi sur la surface sont séparés de plus de  $7^\circ$ .

3. - EXPERIMENTATIONS EN MER.

Les expérimentations en mer ont eu lieu avec le concours de deux bâtiments de la Marine Nationale : le dragueur côtier "GIROFLEE" (récepteur) de la 3ème Escadre de Dragage, et le bâtiment d'expérimentation "ARMOISE" (émetteur) du Laboratoire D.S.M. du Brusç.

3.1. Conditions expérimentales.

L'antenne de réception a été montée sur l'étrave de la "GIROFLEE" en adaptant sur cette dernière une fausse étrave suivant le principe schématisé sur la figure 5. L'émetteur est porté par l'"ARMOISE". La puissance acoustique émise est de l'ordre de 15 Watts pour les codes, et 12 Watts pour la fréquence pure, ce qui donne un rapport C/F à l'émission de l'ordre de 1,4.

Pendant les expériences, l'"ARMOISE" était au point fixe et la "GIROFLEE" navigait droit sur elle avec une vitesse de 4 à 5 noeuds, à partir de 5 nautiques. L'information décodée était enregistrée sur magnétophone. Plusieurs passes ont été ainsi effectuées dans différentes conditions. La bathythermie était relevée au début ou à la fin de chaque passe de façon à pouvoir calculer les caractéristiques théoriques de transmission et notamment la distance à laquelle les trajets direct



EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

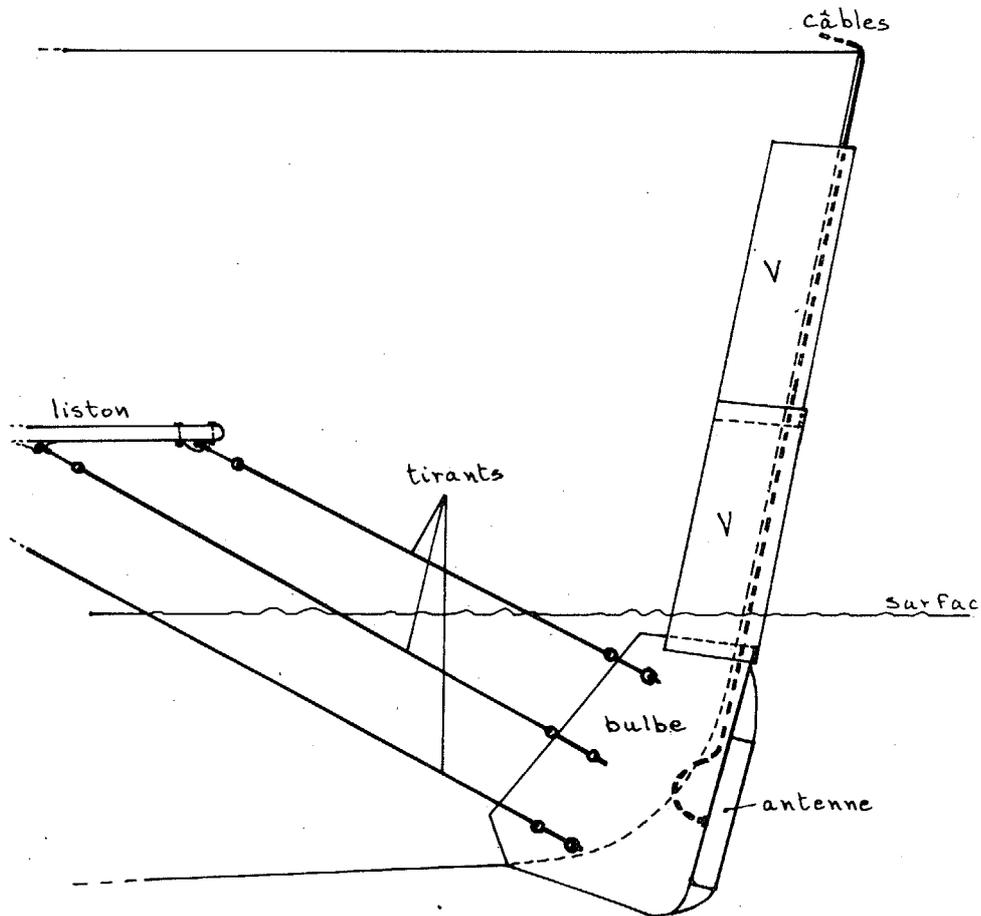


Figure 5 - Schéma de principe de la "fausse-étrave".

EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

---

et réfléchi sur la surface sont séparés de  $7^\circ$ , et donc en-dessous de laquelle la liaison doit être bonne si le rapport signal à bruit est suffisant.

On a vu que l'on a choisi une émission séquentielle de façon à pouvoir réacquérir la synchronisation sur le trajet direct seul en début de séquence. Mais dans le cas présent, l'antenne est près de la surface (2 mètres) et le retard du trajet réfléchi sur la surface est au maximum de 2,7 ms, soit moins de la moitié d'un code. Donc l'émission séquentielle qui est valable pour une plus grande immersion du récepteur n'a plus de raison d'être. On l'a cependant conservée dans la majeure partie des expériences de façon à faciliter les dépouillements : on évalue le rapport signal à bruit en réception en mesurant l'énergie reçue dans la voie à large bande pendant que l'on reçoit des codes, et quand on n'en reçoit pas.

On peut donc considérer que le taux de transmission est de 600 bits d'information par seconde.

### 3.2. Résultats.

On rappelle que le rapport C/F est égal à 1,4 à l'émission, mais à cause des différences d'absorption, il est de l'ordre de 3 de 4 à 5 nautiques.

On a mesuré le rapport signal à bruit moyen pour chaque séquence de 7 secondes (lorsque l'émission est séquentielle) : il fluctue durant la séquence dans un rapport 2 à 3. Chaque séquence de 7 secondes contient environ 4200 bits d'information.



EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

---

3.2.1. Conditions normales : passes 1 et 2.

On a effectué deux passes dans les conditions normales, c'est-à-dire grand fond : 2200 m en moyenne, et grande immersion de l'émetteur : 1000 m.

A. Passe 1 :

L'émission est séquentielle pendant toute la passe. La liaison commence à être bonne en-dessous de 4,8 nautiques. L'écart angulaire entre les trajets direct et réfléchi sur la surface est alors de l'ordre de  $13^\circ$  ; mais le rapport signal à bruit est insuffisant au-dessus de 4,8 nautiques. Des photographies de la carte des trajets sont portées sur la figure 7 : elle est présentée sur la trace supérieure ; chaque "plat" représente l'énergie moyenne d'une voie ; les voies sont dans l'ordre, le fond étant à gauche, la surface à droite, et la voie 0 est repérée (la trace inférieure est un signal de synchronisation).

De 4,8 à 4 nautiques :

Le taux d'erreur a été porté en fonction du rapport signal à bruit moyen sur la figure 6 sur laquelle on trouve aussi la courbe expérimentale obtenue en laboratoire pour  $C/F = 2,25$ . Les résultats sont équivalents bien que le rapport  $C/F$  soit plus élevé : cela est dû à la plus grande efficacité du filtrage spatial. Parmi les 47 séquences de cette partie de la passe, 18 ne comportent pas d'erreurs.

De 4 à 3 nautiques :

Cette partie possède 68 séquences dont 16 présentent des erreurs qui donnent un taux d'erreur moyen égal à  $7,5 \cdot 10^{-4}$ . Le rapport signal à bruit moyen varie de 4 à 12.

EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

---

De 3 à 2 nautiques :

Cette partie possède 75 séquences dont une seule comporte des erreurs qui donnent une moyenne pour le taux d'erreur égal à  $8 \cdot 10^{-6}$ . Le rapport signal à bruit moyen varie de 8 à 23.

De 2 à 1,2 nautiques :

Cette partie comporte 60 séquences dont une seulement présente des erreurs. Le taux d'erreur moyen est égal à  $10^{-4}$ . Le rapport signal à bruit moyen varie de 16 à 45.

B. Passe 2.

L'émission est séquentielle pendant toute la passe. La liaison commence à être bonne en-dessous de 4,6 nautiques. Des photographies de la carte des trajets sont portées sur la figure 8.

De 4,6 à 4 nautiques :

Le taux d'erreur est présenté sur la figure 6 avec la courbe expérimentale de laboratoire  $\frac{C}{F} = 2,25$  : les résultats sont légèrement meilleurs. Sur 46 séquences, 12 sont sans erreurs. Le taux d'erreur moyen est égal à  $8,5 \cdot 10^{-3}$ . Le rapport signal à bruit moyen varie de 1 à 4.

De 4 à 3 nautiques :

Sur 46 séquences, 6 possèdent des erreurs. Le taux d'erreur moyen est égal à  $6,7 \cdot 10^{-4}$ . Le rapport signal à bruit varie de 3 à 10.



EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

---

De 3 à 2 nautiques :

Sur 68 séquences, 13 comportent des erreurs. Le taux d'erreur moyen est égal à  $7,4 \cdot 10^{-4}$ . Le rapport signal à bruit moyen varie de 5 à 18.

De 2 à 1 nautiques :

Sur 66 séquences, 1 comporte des erreurs. Le taux d'erreur moyen est égal à  $9,5 \cdot 10^{-6}$ . Le rapport signal à bruit moyen varie de 11 à 40.

De 1 à 0,2 nautique :

Sur 61 séquences, 3 ont des erreurs. Le taux d'erreur moyen est égal à :  $8,5 \cdot 10^{-5}$ . Le rapport signal à bruit moyen varie de 23 à 50. Il est plus faible en fin de passe car le trajet direct est alors dans la voie 8 dont le gain est faible (figure 4).

Le système fonctionne donc de façon satisfaisante dans les conditions normales. Si l'on considère les résultats à grande distance, figure 6, on peut remarquer que les points de mesure sont portés pour le rapport signal à bruit moyen. Or, ce dernier varie dans un rapport 2 à 3, et donc sa valeur minimum, pour laquelle la plupart des erreurs se produisent, est bien inférieure. Les résultats sont donc nettement meilleurs avec un rapport  $\frac{C}{P}$  plus défavorable, que ceux de laboratoire, ce qui est dû à la plus grande efficacité du filtrage spatial.

3.2.2. Conditions faible fond.

Des expérimentations ont été faites par faible fond pour tester les possibilités de la liaison dans ce cas.

EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

---

A. Passe 3.

La passe a été effectuée par un fond de 600 m, l'émetteur étant immergé à 300 m. L'émission est séquentielle. La distance théorique en-dessous de laquelle les trajets direct et réfléchi sur la surface sont séparés angulairement de plus de  $7^\circ$ , est égale à 1,5 nautique. Des photographies de la carte des trajets sont portées sur la figure 9.

De 3 à 2 nautiques.:

Le taux d'erreur est élevé : 6 % en moyenne. Le rapport signal à bruit moyen varie de 6 à 32.

De 2 à 1,5 nautiques.:

Le taux d'erreur diminue brusquement. Sur 31 séquences 8 comportent des erreurs. Le taux d'erreur moyen est égal à :  $1,3 \cdot 10^{-3}$ . Le rapport signal à bruit moyen varie de 11 à 70.

De 1,5 à 1 nautique :

Sur 34 séquences, 4 possèdent des erreurs. Le taux d'erreur moyen est égal à :  $4,8 \cdot 10^{-4}$ . Le rapport signal à bruit varie de 50 à 170.

De 1 à 0,5 nautique :

Sur 30 séquences, 1 comporte des erreurs. Le taux d'erreur moyen est égal à  $1,5 \cdot 10^{-4}$ ; Le rapport signal à bruit moyen varie de 140 à 270.

De 0,5 à 0,2 nautique :

Sur 28 séquences, 1 comporte des erreurs. Le taux d'erreur moyen est égal à  $4,5 \cdot 10^{-5}$ . Le rapport signal à bruit moyen varie de 150 à 400.



EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

---

B. Passe 4.

Cette passe est effectuée aussi avec un fond de 600 m et une immersion de l'émetteur de 300 m, mais la vitesse du bâtiment récepteur est de 8 noeuds.

De 1 à 0,35 nautique :

L'émission est séquentielle. Cette partie de la passe comporte 24 séquences sans erreurs.

De 0,35 à 0,05 nautique :

L'émission est continue. Le taux moyen d'erreur sur 85000 bits d'information est égal à  $5 \cdot 10^{-6}$ .

C. Passe 5.

Cette passe a été effectuée par 275 m de fond, l'émetteur étant immergé à 120 mètres. La distance théorique en-dessous de laquelle les trajets direct et réfléchi sur la surface sont séparés angulairement de plus de  $7^\circ$  est égale à 0,9 nautique. Des photographies de la carte des trajets sont portées sur la figure 10.

De 2,6 à 1,1 nautiques :

L'émission est séquentielle. Le taux d'erreur est élevé : 20 % en moyenne.

De 1,1 à 0,95 nautique :

L'émission est séquentielle. Le taux d'erreur décroît brusquement. Il est égal en moyenne à  $10^{-4}$ .

De 0,95 à 0,15 nautique :

L'émission est continue. Le taux d'erreur moyen sur 80000 bits d'information est égal à  $6 \cdot 10^{-5}$ .



EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

---

D. Passé 6.

Le fond est de 275 m, et l'émetteur est immergé à 35 m. Dans ce cas, la séparation entre les trajets direct et réfléchi sur la surface est insuffisante, et le système est inefficace.

Ces expériences par faible fond confirment que la limite du système est imposée par le pouvoir séparateur angulaire du traitement spatial de réception.

On a aussi effectué une passe par grand fond 1700 m et faible immersion de l'émetteur : 300 m (passe 7). La distance théorique en-dessous de laquelle les trajets direct et réfléchi sur la surface sont séparés angulairement de plus de  $7^\circ$  est égale à 1,4 nautique. Des photographies de la carte des trajets sont portées sur la figure 11. L'émission est séquentielle.

De 2,5 à 2 nautiques :

Le taux d'erreur est élevé : 10 %.

De 2 à 1,5 nautiques :

Le taux d'erreur moyen décroît brusquement. Sur 33 séquences, 8 comportent des erreurs. Le taux d'erreur moyen est égal à  $7 \cdot 10^{-3}$ . Le rapport signal à bruit moyen varie de 10 à 40.

De 1,5 à 1 nautique :

Sur 25 séquences, 2 comportent des erreurs. Le taux d'erreur moyen est égal à  $3,5 \cdot 10^{-4}$ . Le rapport signal à bruit moyen varie de 33 à 70.



EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

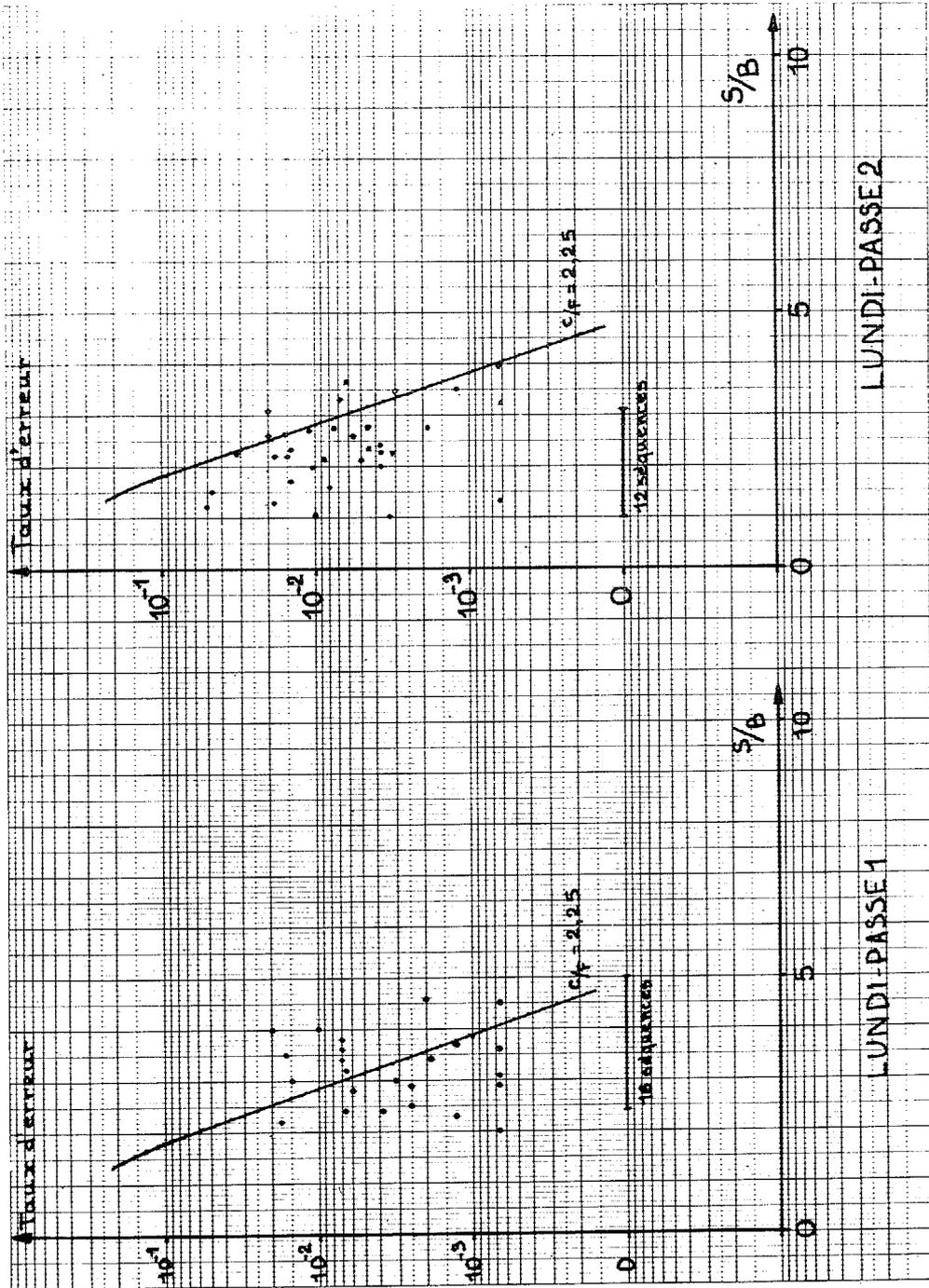
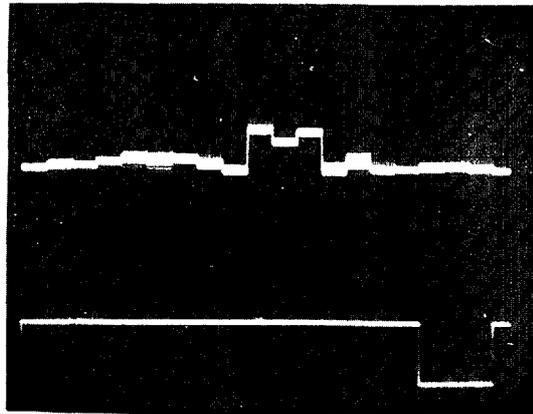


Figure 6. - Taux d'erreur

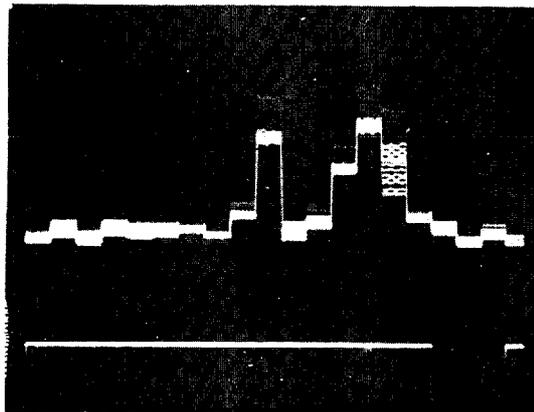
EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

CARTES DES TRAJETS



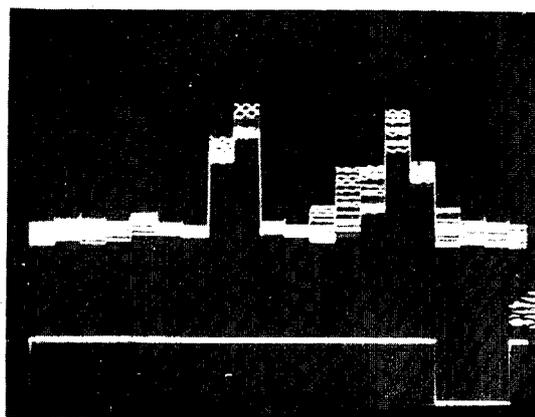
5 nautiques

↑ voie 0



2,5 nautiques

↑



1,5 nautiques

FOND : 2200m  
EMETTEUR: 1000 m

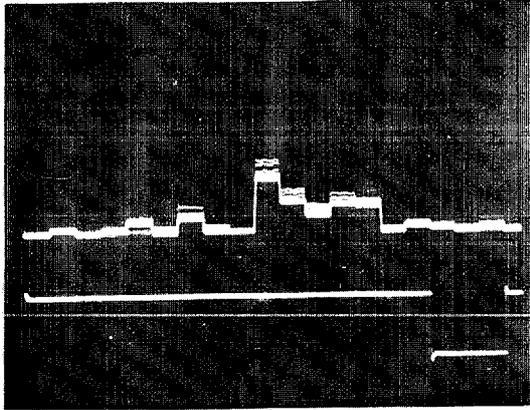
-PASSE 1

Figure 7



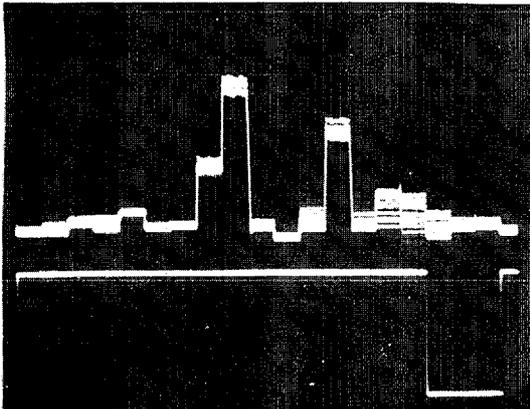
EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

CARTES DES TRAJETS



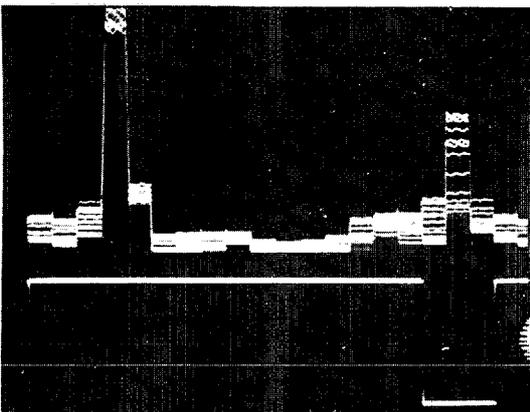
3,8 nautiques

↑ voie 0



1,7 nautiques

↑



0,45 nautique

FOND : 2200m  
EMETTEUR: 1000 m

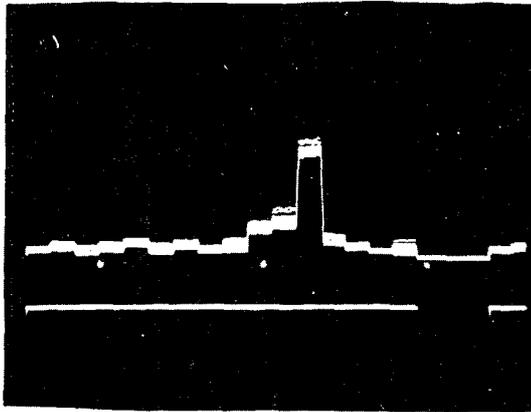
↑

-PASSE 2

Figure 8

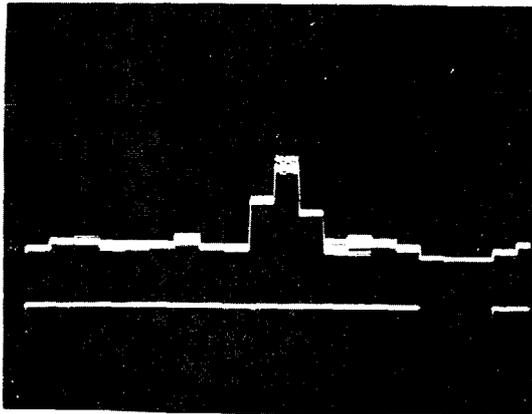
EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

CARTES DES TRAJETS



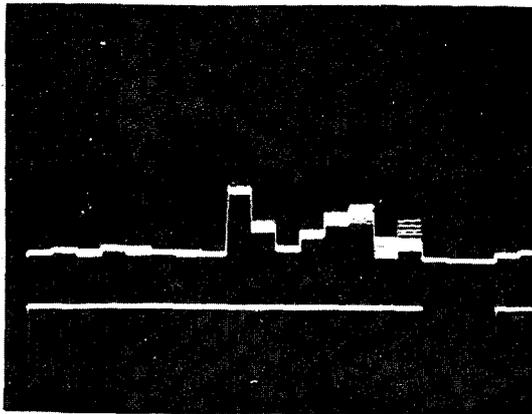
2,3 nautiques

↑  
Voie 0



1,3 nautiques

↑



0,6 nautique

FOND : 600m  
EMETTEUR: 300m

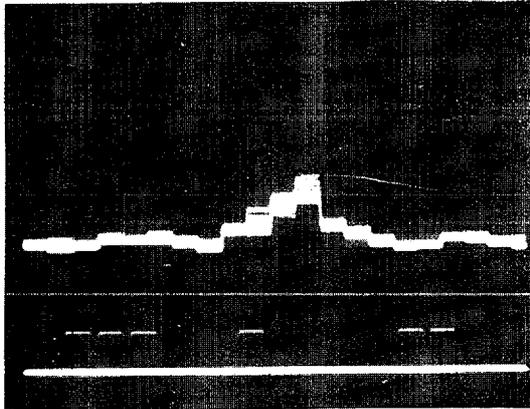
-PASSE 3

Figure 9



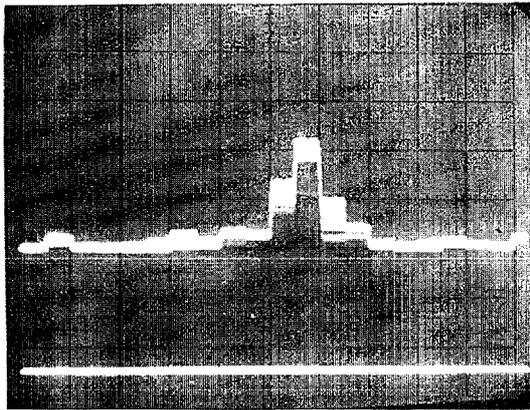
EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

CARTES DES TRAJETS



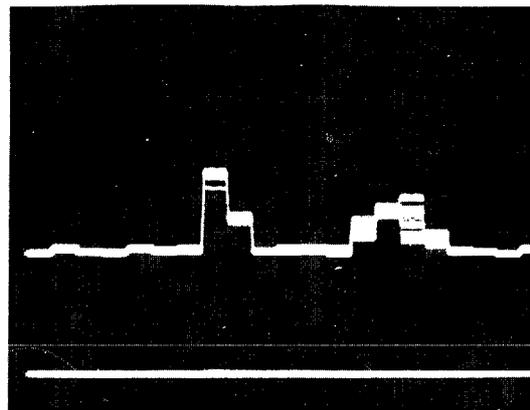
1,75 nautiques

↑ voie 0



1,25 nautiques

↑



0,17 nautique

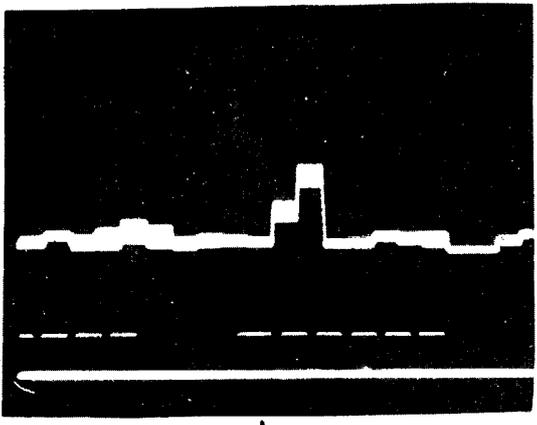
FOND : 275 m  
EMETTEUR: 120 m

- PASSE 5

Figure 10

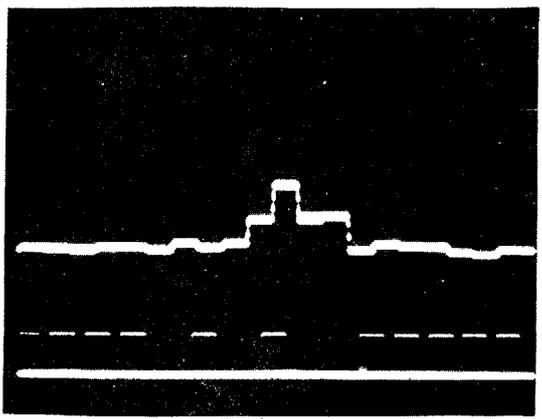
EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

CARTES DES TRAJETS



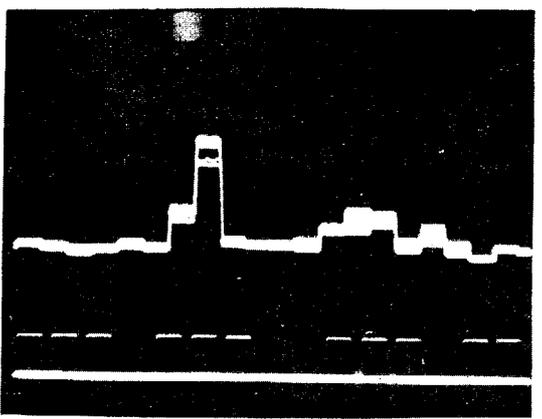
2,4 nautiques

↑ voie 0



1 nautique

↑



0,35 nautique

FOND : 1700m  
EMETTEUR : 300m

↑

-PASSE 7

Figure 11



EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

---

De 1 à 0,5 nautique :

Sur 30 séquences, 10 comportent des erreurs. Le taux d'erreur moyen est égal à  $9 \cdot 10^{-4}$ . Le rapport signal à bruit moyen varie de 55 à 150.

De 0,5 à 0,15 nautique :

Cette partie comporte 22 séquences sans erreurs. On note que la distance en-dessous de laquelle la liaison devient bonne, est analogue à celle de la passe 3 pour laquelle l'immersion de l'émetteur est identique, ce qui met bien en évidence l'effet de la séparation angulaire limite des trajets direct et réfléchi sur la surface.

CONCLUSION.

Dans les conditions normales, c'est-à-dire par grand fond (2200 m en moyenne) et pour une forte immersion de l'émetteur (1000 m), les taux d'erreur obtenus à grande distance (4 à 5 nautiques) sont meilleurs que ceux obtenus en laboratoire, et cela pour un rapport  $\frac{C}{F}$  plus élevé donc moins favorable (on rappelle que le rapport signal à bruit porté sur la figure 6 est une valeur moyenne, et qu'il atteint en fait des valeurs beaucoup plus faibles puisqu'il fluctue d'un facteur 2 à 3). Cette amélioration est due à la plus grande efficacité du filtrage spatial fin. Le taux d'erreur moyen est égal à  $6 \cdot 10^{-3}$ . En-dessous de 4 nautiques, il est inférieur à  $10^{-3}$  : il varie de  $8 \cdot 10^{-4}$  à  $10^{-5}$ . On peut remarquer qu'alors les erreurs ne sont pas réparties, mais arrivent le plus souvent par paquets, ce qui peut être dû à des pointes de bruit brèves qui peuvent provenir du cliquetis du système de maintien du bulbe notamment.

EXPERIMENTATION A LA MER D'UNE LIAISON SOUS-MARINE A  
600 BAUDS EN PRESENCE DE TRAJETS MULTIPLES.

---

La liaison a aussi été testée par faible fond. Pour une immersion de l'émetteur égale à 300 m et un fond de 600 m, le taux d'erreur décroît brusquement en-dessous de 2 nautiques : il est jusqu'à 1,5 nautique, égal à :  $1,4 \cdot 10^{-3}$  et inférieur à  $10^{-3}$  à plus faible distance. Pour un fond de 275 m et une immersion de l'émetteur égale à 120 m, le taux d'erreur devient brusquement faible en-dessous de 1,1 nautique : il est alors inférieur à  $10^{-4}$ . Si l'émetteur est immergé à 35 m, la liaison n'est bonne qu'à très courte distance. Elle se comporte donc bien comme il est prévisible : le taux d'erreur décroît brusquement en-dessous de la distance pour laquelle les trajets direct et réfléchi sur la surface sont séparés en site d'au moins  $7^\circ$ .

Le taux de transmission obtenu est égal à 600 bits d'information par seconde.

-----

REFERENCES

- [1] J.L. VERNET, G. BIENVENU  
"Liaisons sous-marines à 300 bauds en présence de trajets multiples". Colloque National sur le Traitement du signal et ses Applications - Nice (1er-5 juin 1971).
- [2] S.W. GOLOMB, L.D. BAUMERT, M.F. EASTERLING,  
J.J. STIFFLER, A.J. VITERBI  
"Digital communications" - Prentice Hall (1964).
-