

Nice 7 au 12 mai 1973

QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES.

B. GRANDVAUX*, B. LALLEMENT**

* B. GRANDVAUX, Attaché aux Services Techniques de l'Armement
Laboratoire DSM du BRUSC, 83140-SIX-FOURS-la-PLAGE

**B. LALLEMENT, THOMSON-CSF, Division des Activités Sous-
Marines, 06802 CAGNES-sur-MER.

RESUME

Du point de vue des communications acoustiques, le milieu marin peut être caractérisé par sa fonction de diffusion, c'est-à-dire par les dispersions spectrales et temporelles qu'il fait subir à l'information transmise. De la fonction de diffusion dépendent la technique de codage à adopter et la capacité de transmission du canal.

Selon le mode de propagation mis en jeu et les caractéristiques des antennes par lesquelles s'effectue le couplage, le milieu marin offre différents types de fonctions de diffusion. Quelques uns d'entre eux qui correspondent à des problèmes pratiques sont présentés ici à la lumière de calculs théoriques et d'observations expérimentales.

SUMMARY

In underwater acoustic communication problems, the medium main features are given by its scattering function, i.e. the frequency and time dispersions that the information undergoes during transmission. The scattering function determines the coding techniques to be applied and the channel transmission capacity.

The propagation mode used and the antenna characteristics have a direct influence on the type of scattering function encountered. Some of them are described here for practical cases, according to theoretical computations and experimental results.



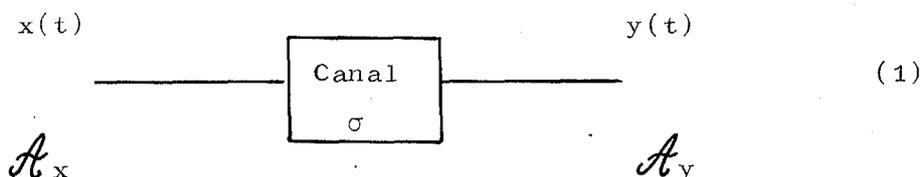
QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

1.-RAPPELS THEORIQUES SUR LA FONCTION DE DIFFUSION ET SON
UTILITE POUR LES PROBLEMES DE COMMUNICATIONS

Du point de vue des communications acoustiques sous-marines, il est commode de caractériser l'océan par sa fonction de diffusion [1] qui traduit les dispersions temporelles (retard) et spectrales (Döppler) dont est affecté le signal transmis.

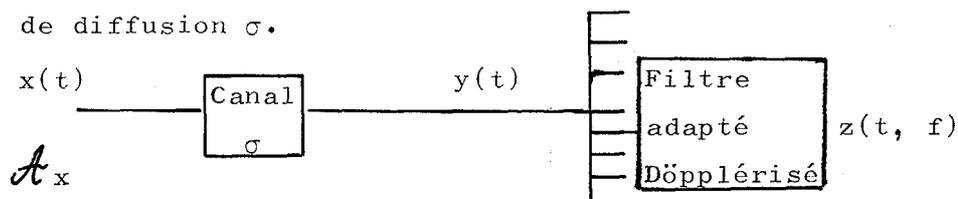
On se souvient que l'existence même de la fonction de diffusion est soumise à des hypothèses fondamentales de stationnarité et de corrélation ponctuelle dont G. JOURDAIN [2] et B. FAURE [3] étudient la validité.

Celle-ci étant supposée acquise, il existe entre l'entrée et la sortie du canal deux types de relations assez intuitives à l'aide desquelles on peut facilement interpréter le mécanisme de l'altération subie par le signal :



$$E\{A_y\} = A_x \cdot F F \sigma$$

L'espérance d'ambiguïté (A_y) du signal de sortie $y(t)$ du canal est égale au produit de l'ambiguïté (A_x) du signal d'entrée $x(t)$ par la double transformée de Fourier de la fonction de diffusion σ .



$$E\{z^2(t, f)\} = \sigma(t, f) ** A_x(t, f)^2 \quad (2)$$



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

La moyenne des carrés des modules des sorties $z(t, f)$ d'une grille de filtres adaptés dopplérisés est égale au double produit de convolution de la fonction de diffusion σ par le carré du module de l'ambiguïté (\mathcal{A}_x) du signal d'entrée $x(t)$.

La fonction de diffusion étant connue (par exemple déterminée expérimentalement à l'aide des procédés qu'inspirent les relations (1) et (2)), le signal $x(t)$ adapté au canal est celui qui "épouse les formes" de la fonction de diffusion ou plus exactement celui qui vérifie la relation :

$$|\varphi(v, \theta)| \cdot |\Psi(v, \theta)| = 1 \quad (3)$$

$$\text{avec } \varphi(v, \theta) = \text{F F } \mathcal{A}_x(t, f)$$

$$\Psi(v, \theta) = \text{F F } \sigma(t, f)$$

Il apparaît donc que la forme de la fonction de diffusion conditionne le signal à transmettre et par conséquent la quantité d'informations véhiculées.

Il existe en acoustique sous-marine différents modes de propagation bien distincts selon les conditions océanographiques et les données géométriques du problème posé, et à chaque mode de propagation appartient un type de fonction de diffusion. L'objet de ce qui suit est d'en préciser les principaux caractères pour les divers problèmes de communication que l'on peut avoir à se poser dans la pratique.

QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES2.-CAS PRATIQUES DE TRANSMISSIONS SOUS-MARINES

Il est intéressant d'examiner les différents cas typiques où des liaisons acoustiques sous-marines sont employées ou seraient utiles, parce que tout autre mode de communication est soit trop indiscret, soit impraticable. Cet aperçu rapide permettra de définir les types de propagation qui régissent ces différents cas de transmissions, et donc d'étudier leurs caractéristiques générales.

Le cas le plus répandu est sans aucun doute celui des liaisons entre un bâtiment de surface et un sous-marin en plongée au-delà de l'immersion périscopique. Les liaisons entre deux sous-marins en plongée, entre plongeurs et bâtiment de soutien, entre plongeurs et un submersible (sous-marin humide, maison sous la mer, etc.), entre bathyscaphe et surface, les liaisons d'ordre entre la surface et des systèmes installés sur le fond (têtes de puits de forage, vannes, largueurs acoustiques, enregistreurs automatiques, etc.), les systèmes de positionnement avec balises répondeuses, les systèmes d'ancrage dynamique, sont autant d'exemples de la diversité des liaisons utilisées actuellement. Sans oublier des cas moins communs, tels que les liaisons d'un sous-marin avec des systèmes de surveillance côtière, à courte ou grande distance, les liaisons de téléméasures, les techniques de sauvetage SOFAR ou les transmissions avec un tapis de récepteurs situés près du fond pour la trajectographie de mobiles sous-marins ou de surface.

Chacun de ces cas peut être caractérisé par la nature des informations à transmettre, par les immersions habituelles des deux correspondants, par la nécessité de correspondre à des distances plus ou moins grandes, ou pratiquement à la verticale, et souvent par l'immersion du fond de la mer (distinction entre grands fonds et petits fonds). Le tableau ci-après donne les caractéristiques sommaires des cas cités ; il faut noter tout



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

ce qu'a de schématique cette classification, qui tend essentiellement à déterminer les conditions générales de propagation rencontrées et non à dresser un panorama complet de toutes les transmissions sous-marines possibles.

La nature des informations, donnée ici à titre indicatif, permet surtout de distinguer les messages parlés des autres types d'informations à transmettre. En effet, il est à la fois plus commode et plus facile de transmettre la parole de façon "directe" en temps réel ; mais les limitations du milieu marin peuvent imposer une importante réduction du débit des informations et donc un codage en "temps différé". En ce cas, et pour les autres types d'informations, leur nature a de l'importance pour le choix de l'alphabet de codage, mais n'influencera le choix du codage lui-même que par le taux d'erreur requis.

Les immersions indiquées sont des ordres de grandeur courants ; les distances correspondent plutôt à ce qui serait souhaitable, les résultats réels étant souvent bien inférieurs. La distinction grands fonds - petits fonds qui est faite, correspond bien à la pratique, où l'on rencontre soit un plateau continental (0 - 300 m), soit des grands fonds (1000 - 10000 m), séparés par une transition rapide.

QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

CAS	INFORMATIONS	IMMERSIONS (m)		DISTANCES	FONDS GF : grands fonds PF : petits fonds
		A	B		
Bât. Surface/ sous-marin	Messages parlés ou codés	5	30-500	0 - 20 kms	PF GF
Sous-marin/ sous-marin	Messages parlés ou codés	30-500 (30-150)	30-500 (30-150)	0 - 50 kms	GF (PF)
Plongeurs/ Bât. soutien	Messages parlés (ou codés)	5	5-200	verticale	PF (GF)
Plongeurs/ submersible	Messages parlés (ou codés)	5-200	5-200	quelques kms	PF (GF)
Bathyscaphe/ soutien	Messages parlés (ou codés)	5	5-10000	verticale	GF
Surface/système auto- matique sur le fond	Ordres	5	50-300 5-5000	verticale verticale	PF GF
Ancre dynamique	Télémesures	5	50-300	verticale	PF



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

CAS	INFORMATIONS	IMMERSIONS (m)		DISTANCES	FONDS GF : grands fonds PF : petits fonds
		A	B		
Positionnement - trajectographie	Télémétries	5-500	50-300 1000-5000	quelques kms ou verticale	PF GF
		100-1500	100-1500		
Sauvetage SOFAR	Télémétries	100-1500	300-5000	0 - 50 kms centaines kms	PF GF
Sous-marin/ réseau côtier	Messages	50-500	50-5000	quelques kms ou verticale	GF - PF
Télémétries	Messages	5	50-5000		

QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

3.-DIFFERENTS MODES DE TRANSMISSION

A chacun des types de propagation que nous pouvons dégager de ce tableau correspondront des caractéristiques différentes de la fonction de diffusion du milieu sous-marin. Pour plus de commodités et parce que l'essentiel des calculs et mesures ont été effectués de cette façon, nous séparerons les aspects spatial, temporel et fréquentiel de cette fonction de diffusion.

3.1. Types de propagation

Le tableau ci-dessus permet de dégager les conditions de propagation correspondant aux différents cas envisagés. Les conditions géométriques considérées - immersions des correspondants et du fond de la mer, distances limites - permettent en particulier de déterminer les caractéristiques d'ensemble des trajets sonores multiples existants entre les correspondants. Ils représentent en effet l'obstacle principal aux communications sous-marines, dont ils limitent sévèrement la capacité.

Les autres effets de propagation, tels que les zones d'ombres ou les fluctuations de l'index de réfraction de l'eau, jouent aussi un rôle, mais d'importance moindre, dans l'établissement d'un système de transmissions.

La propagation par grands fonds (1000 à 10000 mètres) dépendra évidemment de la bathythermie, mais aussi des immersions des correspondants; on peut distinguer quatre cas :

- propagation "classique", entre un correspondant situé à la surface et un autre entre 30 et 500 mètres d'immersion, entre 0 et 50 kilomètres, caractérisée par la présence fréquente d'une zone d'ombre, d'un chenal sonore de surface et de zones de convergence à distance fixe,



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

. propagation du type "sonar remorqué" (V.D.S.), entre deux correspondants situés dans la thermocline, entre 0 et 50 kilomètres, présentant des caractéristiques voisines de la propagation classique,

. propagation guidée dans le chenal sonore profond, à très grande distance, entre correspondants situés près de l'axe de ce chenal,

. propagation quasi-verticale, entre un correspondant situé près de la surface et un correspondant situé entre surface et fond, peu sensible aux effets de la bathythermie tant que la distance horizontale n'excède pas la profondeur de la mer.

La propagation par petits fonds (50 à 300 mètres) présente les mêmes effets mentionnés plus haut à courte distance (quelques kilomètres), mais très vite, les réflexions sur les frontières prennent de l'importance et la propagation devient guidée, avec réflexions multiples sur les parois du guide et transmission de modes privilégiés. L'immersion des correspondants a alors peu d'influence sur l'aspect général des phénomènes de propagation.

3.2. Dispersions temporelle et spatiale de la fonction de diffusion

Ces dispersions peuvent être étudiées grâce à la réponse impulsionnelle du milieu marin et la répartition angulaire en site de l'énergie sonore au départ de la source et à l'arrivée au récepteur.

Nous étudierons tout d'abord la part de ces dispersions que l'on peut qualifier de déterministe grâce à des calculs de champs sonores dans quelques cas typiques et certains résultats de mesures.

3.2.1. Propagation classique par grands fonds

Dans ce cas, on se trouvera en présence d'un seul trajet sonore direct, suivi ou précédé d'un trajet réfléchi sur la surface, d'intensité et de temps de parcours très voisins, dépendant des immersions source - récepteur. Un groupe de rayons réfléchis sur le fond, constitué par les quatre rayons classiques ayant touché la surface 0, 1 et 2 fois (Fond - Surface Fond - Fond Surface - Surface Fond Surface) suit à un intervalle de temps allant de quelques secondes à zéro ; il devient nul lorsque l'on atteint la zone de résurgence où le groupe de rayons réfléchis une fois sur le fond disparaît (rayons tangents au fond). La durée de ce groupe lui-même dépend des immersions de la source et du récepteur, comme on peut le concevoir : elle varie donc dans notre cas de quelques millisecondes à quelques centaines de millisecondes au maximum. Ces deux groupes "direct - surface" et "réfléchis fond une fois" sont suivis d'un groupe de quatre rayons réfléchis deux fois sur le fond, à un intervalle comparable au précédent ; il s'annule lors de l'arrivée dans la seconde zone de résurgence. L'intensité des rayons réfléchis une ou deux fois sur le fond est nettement plus faible que celle du direct, dont elle ne se rapproche que peu avant la disparition de ces rayons. Le rayon direct, et éventuellement le réfléchi sur la surface, peuvent être absents à partir d'une certaine distance, s'il y a une zone d'ombre.

Ces différentes propriétés sont illustrées par les Fig. 1 à 3, où sont donnés les résultats d'un calcul de champ sonore, sous la forme de pertes de transmission, d'angles au départ de la source et de temps d'arrivée réduits en fonction de la distance horizontale. Il s'agit du cas sonar classique : source à 5 mètres d'immersion, récepteur à 300 mètres d'immersion, profil de célérité typique de l'Atlantique en été, fond sableux à 5000m (bon réflecteur), surface de la mer un peu agitée (0,5 mètre de creux), fréquence 5 kHz, distance maximum 75 kilomètres.



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

On observe une nette zone d'ombre à partir de 5 kilomètres environ (cf. les pertes des rayons directs D et réfléchis sur la surface S sur la Fig. 1), la présence d'une zone de convergence pour ces rayons, à 65 et 70 kilomètres pour D et S respectivement. Les pertes des rayons réfléchis sur le fond une fois (F1) et deux fois (F2) sont fortes près de la verticale, mais augmentent faiblement avec la distance.

Les angles d'émission du rayon direct sont compris entre environ -2° et -10° (cf. Fig. 2), sauf à très courte distance, où l'on se trouve dans le cas de la propagation dite "verticale". Ceux du réfléchi S sont pratiquement de signe opposé, ceux des réfléchis F1 et F2 sont supérieurs à 10° en valeur absolue. Cette séparation angulaire des rayons utiles néfastes est favorable aux transmissions, car elle permet d'éliminer assez facilement l'essentiel des trajets multiples.

Quant aux temps réduits, ils sont égaux à la différence entre le temps de parcours vrai et un temps de parcours moyen (distance horizontale divisée par une vitesse du son moyenne) ; on vérifie sur la Fig. 3 les remarques faites plus haut. La réponse impulsionnelle du milieu est constituée d'arrivées séparées et discrètes, dont l'étalement dans le temps est très important.

Si l'on change l'immersion du récepteur, ces diagrammes ne changent guère : seul l'écart de temps entre D et S d'une part, entre les quatre constituants de F1 et de F2 d'autre part, diminue avec son immersion ; la distance où apparaît la zone d'ombre diminue aussi.

Si la bathythermie change, la zone d'ombre changera et disparaîtra éventuellement s'il n'y a plus de thermocline (bathythermie isotherme).



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

S'il existe une couche isotherme ou un gradient de température positif près de la surface, ce qui est le cas du profil choisi jusqu'à 50 mètres d'immersion, il y aura un chenal sonore de surface. Ses caractéristiques sont illustrées par les Fig. 4 à 6 : présence d'un très grand nombre de rayons, d'intensité décroissant rapidement (en-dessous des réfléchis F1 à partir de 20 à 25 kilomètres), d'angle compris entre $\pm 2^\circ$, et de temps de parcours très voisins (dispersion inférieure à quelques dizaines de millisecondes). La propagation dans ce chenal de surface est liée à la qualité de la réflexion sur la surface de la mer et à la diffusion existant aux basses fréquences à la limite inférieure de ce chenal.

La fréquence de coupure se situe aux environs du kilohertz en général [4]. Si l'on intègre l'énergie reçue, la propagation d'abord sphérique à courte distance, devient rapidement cylindrique avec un terme d'absorption normal et un terme d'absorption tenant compte des pertes par diffusion hors du chenal.

Quoique les transmissions soient assez précaires dans ce chenal de surface (réflexions multiples sur la surface, passage d'ondes internes), ce cas est important car ce chenal est très souvent présent en mer [4].

3.2.2. Propagation du type "Sonar remorqué"

C'est le cas où les deux correspondants sont assez profondément immergés, mais encore loin de l'axe du chenal sonore profond. La réponse impulsionnelle du milieu diffère relativement peu du cas de propagation classique, ainsi que le montrent les Fig. 7 et 8 où l'on retrouve les caractéristiques déjà mentionnées. L'importance de la zone d'ombre dépend essentiellement de l'immersion des correspondants dans la thermocline.



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

3.2.3. Propagation dans le chenal sonore profond

L'axe du chenal sonore profond se situe habituellement entre 1000 et 1300 mètres d'immersion dans les océans Atlantique, Pacifique et Indien, et entre 100 et 200 mètres en Méditerranée. Dans les mers polaires, ou en cas de bathythermie presque isotherme, il se rapproche de la surface, avec laquelle il est souvent confondu. Dans l'Atlantique Nord-Est, il existe pratiquement deux chenaux sonores profonds, dont les axes sont à 400 - 600 mètres et vers 2000 mètres; ceci est dû à de la présence d'un maximum de célérité vers 1000 mètres créé par l'afflux des eaux chaudes de la Méditerranée en Atlantique.

Les trajets sonores reliant deux correspondants situés près de l'axe de ce chenal sont très nombreux et sa réponse impulsionnelle devient pratiquement continue. Elle est donc nettement différente des cas précédents où existait un nombre limité de trajets assez bien séparés temporellement et spatialement. On observe un passage graduel d'une réponse discrète à courte distance [5,7] à une réponse continue à grande distance [6], dont l'amplitude croît pour s'interrompre brutalement avec l'arrivée du trajet le plus lent. Il s'agit en général du trajet qui a suivi l'axe du chenal, donc à vitesse minimum, encore que ce ne soit pas toujours le cas.

Les Fig. 9 à 11 donnent un exemple de ce type de dispersion à 750 Hz. La Fig. 9 correspond à la Méditerranée et donne la variation des pertes de transmission des trajets sonores en fonction de leur temps d'arrivée, par rapport aux pertes et au temps de parcours moyens d'un rayon rectiligne sur l'axe du chenal. Les Fig. 10 et 11 (Méditerranée et Atlantique) présentent ces mêmes pertes intégrées et l'angle d'émission en fonction du temps; par pertes intégrées, on entend une sommation quadratique des rayons sonores dans des intervalles de 0,2 seconde (l'addition quadratique est justifiée à grande distance, où les

QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

inhomogénéités du milieu ont fait varier les phases relatives des signaux de façon aléatoire [8]).

On note donc la continuité de la réponse impulsionnelle et son allongement très important - plusieurs secondes - pratiquement proportionnel à la distance :

$$\Delta t \approx t \cdot \theta_0^2/6 \quad r \cdot \theta_0^2/(6 \times c_0) \quad [9]$$

Δt , allongement, r distance horizontale, c_0 vitesse moyenne, θ_0 angle d'émission limite des rayons compris dans le chenal. Les angles utiles sont déterminés par les limites du chenal et sont de l'ordre de ± 8 à 12° . Les rayons réfléchis sur le fond F sont très vite atténués et ne contribuent que très peu à la réponse observée (cf. Fig. 9).

La fréquence de coupure du canal est très faible, de l'ordre de 2,5 à 3,5 Hz. L'énergie totale intégrée suit encore une loi de propagation cylindrique, après une phase sphérique jusqu'à une distance de transition entre ces deux modes de divergence. La valeur mesurée de cette distance varie beaucoup d'un auteur à l'autre, de 1,5 à 150 kilomètres [4] et la valeur de l'absorption du son choisie, surtout aux basses fréquences [10, 11] a une très grande importance à cause des distances mises en jeu.

3.2.4. Propagation quasi verticale

Sa réponse impulsionnelle est constituée de groupes espacés de plusieurs secondes, constituées d'arrivées discrètes, dont la nature et l'écart temporel dépend des immersions respectives des correspondants. S'ils sont proches de la surface (0 - 500 mètres), on retrouvera les caractéristiques de la propagation classique à très courte distance. Si un des deux correspondants est profondément immergé, la répartition des arrivées $D, S, F1, F2, \dots$ changera dans les différents groupes.



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

Les angles utiles situés dans des cônes tournés vers le bas ou vers le haut, de demi-ouverture 45° environ.

3.2.5. Propagation par petits fonds

A courte distance, ou près de la verticale, on observe des phénomènes identiques à ceux de la propagation classique par grands fonds ; mais les échelles de temps devront être réduites d'un ou deux ordres de grandeur et l'on parle de durées de groupes de quelques millisecondes et d'espacement entre groupes de quelques dizaines de millisecondes.

On aboutit rapidement à une propagation guidée, dont la réponse impulsionnelle est pratiquement continue. Elle a un début très rapide suivi d'une lente décroissance dont la durée varie de quelques centaines de millisecondes à 1 ou 2 secondes, selon la réflectivité du fond et de la surface. Un exemple en est donné par les Fig. 12 à 14, correspondant à des fonds sableux de 100 mètres. Les Fig. 12 et 13 donnent le résultat de calculs à 750 Hz sur un fond bon réflecteur et la Fig. 14, celui de mesures en fonction de la fréquence [12]. L'ouverture angulaire utile est plus importante $\pm 15^\circ$, encore qu'elle dépende beaucoup de la réflectivité du fond (présence d'un angle critique plus ou moins élevé).

3.3. Dispersion spectrale.

La dispersion spectrale dont est affecté le signal transmis peut provenir des mouvements de milieu lui-même (en particulier les mouvements de la surface de la mer) ou des mouvements des plate-formes qui portent les transducteurs d'émission et de réception.



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

Ces données sont plus difficilement accessibles aux calculs que les dispersions temporelles et les observations expérimentales sont encore bien incomplètes. Nous nous bornerons donc à citer des ordres de grandeur publiés dans la littérature ou tirés de récentes expérimentations sur le polygone acoustique fixe des Açores spécifiquement destiné à ces études.

3.3.1. Pour des transmissions entre stations fixes on peut distinguer deux situations types :

- ou bien la propagation met en jeu la réflexion sur la surface de la mer, auquel cas la dispersion fréquentielle peut être importante (de l'ordre du Hertz) et se présente généralement sous la forme d'un spectre de raies [27, 28] provenant de la modulation par la houle (Fig. 15),
- ou bien la propagation n'emprunte aucun trajet de surface et la dispersion spectrale est très faible (de l'ordre du dixième de Hertz, Fig. 16).

3.3.2. Des mesures de transmission effectuées entre une station fixe du polygone des Açores et un sous-marin en immersion profonde et route rectiligne [29] ont donné des dispersions spectrales moyennes de l'ordre de quelques dixièmes de Hertz atteignant très exceptionnellement un ou deux Hertz lors de brusques embardées de navigation (Fig. 17).

3.3.3. Nous ne possédons pas à ce jour de mesures de dispersion spectrale pour une transmission avec un bâtiment de surface. On peut cependant s'attendre à ce qu'elle soit d'un ordre de grandeur au moins égal à celle d'une liaison entre stations fixes par réflexion sur la surface de la mer.



3.4. Nature et fluctuations des trajets multiples.

En plus des effets mentionnés précédemment, il faut tenir compte des fluctuations des propriétés générales du milieu marin et de leur influence sur les caractéristiques des chenaux sonores.

Un modèle statistique complet du milieu marin manque encore et il est donc assez difficile de chiffrer les variations aléatoires des signaux du canal de transmission qui nous intéresse. On peut néanmoins en donner les ordres de grandeur.

Les signaux directs ne sont affectés que par les fluctuations de l'index de réfraction du milieu. Elles sont dues à la microstructure thermique de l'eau où se produit un mouvement continu de masses d'eau de température et parfois de salinité différentes. Ces mouvements prennent la forme de turbulences importantes près de la surface à cause des vagues ou en profondeur à cause de passage d'ondes internes (détroits, etc...). On a cherché à en estimer la taille en déterminant la distance de corrélation des variations de température de l'eau: les ordres de grandeur trouvés varient beaucoup, de 20 mètres en profondeur à 2 mètres et 0,6 mètre près de la surface [13 et 14]. Ces inhomogénéités déforment les surfaces d'ondes et focalisent ou dispersent un peu l'énergie sonore en haute fréquence. Les mouvements des masses d'eau étant assez rapides, la déformation des surfaces varie continuellement et créent une "scintillation" du signal reçu. Il semble que les intensités d'une série d'impulsions aient une loi de distribution normale et une déviation standard d'environ 30 - 40% du signal moyen pour un ensemble émetteur-récepteur animé de mouvements faibles [15, 16]. Si cet ensemble est fixe, ces variations sont plus faibles [17]. Si l'on s'en réfère aux expériences faites avec des signaux à large bande [18, 19, 20], il ne semble pas qu'il y ait de distorsion mesurable de l'impulsion aux fréquences voisines de 10 kHz, excepté dans des cas particuliers

QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

non rencontrés dans ce type de transmission ("réflexion" d'un rayon sur une discontinuité du profil de célérité ou une caustique [21,22]). En résumé l'intensité d'un rayon direct fluctue, mais la dispersion de son allongement temporel est faible (quelques cent microsecondes) et l'élargissement de sa bande passante négligeable.

Les signaux réfléchis sur la surface subissent les mêmes effets de propagation, avec en plus une réflexion sur une surface fluctuante et mouvante. On sait décrire statistiquement la surface de la mer d'une façon assez satisfaisante (distribution des angles et des dimensions de facettes constituant la surface de l'eau). Les fluctuations d'intensité sont plus fortes et ont, selon la référence 15, une distribution de Rayleigh avec un écart moyen de 45%. Un signal à large bande est assez distordu après réflexion [16,17,18], et la cohérence spatiale ou temporelle n'est pas très bonne. La surface entraîne donc une dispersion de temps assez limitée, quelquefois supérieure à quelques millisecondes. Le Döppler du signal dû au déplacement des vagues à la surface fluctue aussi un peu (une fraction de Hertz [23]).

Enfin, le fond est un réflecteur compliqué : il est généralement constitué par une série de couches de sédiments à peu près parallèles, tout au moins dans les plaines abyssales qui recouvrent une grande partie du fond des océans. Chaque couche réfléchit de l'énergie et le signal réfléchi est beaucoup plus long que le signal incident : quelques dizaines de millisecondes à incidence verticale, plusieurs millisecondes en incidence rasante sont des ordres de grandeur courants. Ce type de réflexion est assez bien représenté par un modèle théorique et la concordance théorie-expérimentation est raisonnable [24,25]. En plus de cette partie prévisible si l'on connaît le fond, les irrégularités de surface et les inhomogénéités des sédiments diffusent l'énergie, et un signal réfléchi



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

peut être assez fortement décorrélé par rapport au signal direct si le fond est irrégulier [26]. L'effet du fond est par contre très stable dans le temps et assez stable dans l'espace, car la nature des sédiments change relativement lentement [14].

4. - CAPACITE DU CANAL ET INFLUENCE DES ANTENNES ET DU MODE DE TRANSMISSION.

4.1. Capacité du canal.

La diversité des fonctions de diffusion laisse augurer, pour la pratique, de sérieuses difficultés dans "l'adaptation" du signal telle que le suggère la relation théorique (3).

Dans un premier stade nous supposons donc que la fonction de diffusion est unitaire de support τ sur l'axe retard et Φ sur l'axe Döppler, ou tout au moins qu'elle possède une structure de blocs de largeur τ_i et Φ_i tels que :

$$\sum \tau_i = \tau \qquad \sum \Phi_i = \Phi$$

Ces deux hypothèses ne sont pas équivalentes du point de vue de la synthèse du signal à transmettre mais elles le sont du point de vue de la capacité du canal que nous allons chercher à évaluer.

4.1.1. Canal à bruit additif blanc et gaussien.

On montre en théorie de l'information [30] que la capacité d'un canal de transmission à bruit additif blanc et gaussien est :

$$(4) \quad C_{\text{bits}} = B \text{ (H)} \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

- avec B : bande passante
 (4) : durée de la transmission
 S : puissance du signal dans la bande B
 N : puissance du bruit dans la bande B.

Cette relation implique un canal qui ne perturbe pas le signal, mais qui lui ajoute simplement un bruit blanc et gaussien de puissance N dans la bande B.

Si le "bit utile" est constitué en pratique d'un signal de durée T et de largeur de bande W, la capacité utile du canal est :

$$(5) \quad C = \frac{B \cdot (4)}{WT} \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

ce qui montre l'intérêt qu'il y a, du point de vue de la quantité d'information transmise, à utiliser un signal rustique de produit $WT = 1$.

4.1.2. Canal perturbé.

Pour un canal dont la fonction de diffusion a pour supports τ, ϕ , la capacité utile devient [31]

$$(6) \quad C = \frac{B \cdot (4)}{(W+\phi)(T+\tau)} \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Avec un signal de produit $WT = 1$, cette capacité est maximale pour :

$$(7) \quad T = \sqrt{\frac{\tau}{\phi}} \quad W = \sqrt{\frac{\phi}{\tau}}$$

et elle a pour valeur :

$$(8) \quad C_{\max} = \frac{1}{(1+\sqrt{\tau\phi})^2} B \cdot (4) \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

- Tant que $\pi\phi \ll 1$, la capacité reste celle du canal à bruit additif.
- Pour $\pi\phi = 1$, la capacité est réduite dans le rapport 4.
- Pour $\pi\phi \gg 1$, capacité est réduite dans le rapport $\pi\phi$.

4.1.3. Détermination de la bande passante du canal.

Pour déterminer cette bande dans les différents cas de propagation rencontrés, il faut tout d'abord calculer le rapport signal sur bruit obtenu en fonction de la fréquence, à certaines distances types. Le rapport signal sur bruit désiré dans la bande du canal est fonction du taux d'erreur choisi ; une valeur de 15 dB assure un taux d'erreur faible de l'ordre de 10^{-5} [32]. On détermine alors la bande de fréquences pour laquelle cette valeur est atteinte.

Afin d'obtenir des ordres de grandeur de cette bande on a choisi un niveau d'émission de 110 dB (125 dB pour les communications à très grande distance dans le chenal sonore) et un bruit de plateforme correspondant au niveau de la mer 3. La perte de transmission a été évaluée dans les différents cas considérés, grâce à des modèles simplifiés qui donnent des valeurs moyennes de ces pertes [33]. Ces modèles tiennent compte d'un passage progressif d'une loi sphérique à une loi cylindrique dans les cas de propagation guidée, de conditions bathythermiques sommaires (épaisseurs de la couche isotherme et du chenal profond), de l'état de la mer et de la nature du fond.

4.1.4. Estimation des caractéristiques du chenal.

La formule (8) et les valeurs calculées de la bande passante permettent, avec les conclusions des chapitres précédents, d'établir un tableau (voir page suivante) donnant des ordres de grandeur des différentes caractéristiques du canal

QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES.

Type de réponse	Discrète					Continue					
	Normale et VDS		Chenal de surface		Verticale		Chenal profond		Petits fonds		
Propagation	10 km	50 km	10 km	20 km	G.F.	P.F.	200 km	1000 km	10 km	30 km	50 km
	0,5 à 10	2	0,1-10	0,1-2	5	0,3	1	5-10	0,5	1	2
Allongement moyen τ (sec.)											
Doppler moyen ϕ (Hz)	1	1	2	2	0,1	0,1	0,5	0,5	1	1	1
Bande moyenne B (Hz)	30000	3000 à 8000	21K	5K	40 K	100 K	1,5 à 3,5K	650	19500	3700	350
Capacité maximum C (bits/sec.)	50 à 9K	2,5 à 7K	50 à 3,6K	12 à 2,8K	70K	360K	2,6 à 6K	500 à 300	33,5K	4600	300



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

de transmission sous-marin.

On y a distingué les cas où la réponse impulsionnelle du milieu était "discrète" de ceux où elle est pratiquement continue, et ceux où les réflexions sur la surface introduisaient une dispersion en fréquence probablement élevée. On a laissé de côté l'influence des variations de Döppler entre arrivées sonores parvenant sous des angles nettement différents au récepteur. Elles ne sont pas négligeables dans les cas des rayons réfléchis sur le fond à courte distance, mais, comme on le notera au chapitre suivant, ce type de rayons peut souvent être éliminé. On a sélectionné les cas de propagation et les distances les plus typiques.

4.1.5. Influence des antennes et du mode de transmission.

Les antennes d'émission et de réception ont une influence importante sur les performances moyennes calculées ci-dessus. Leur directivité en site sera choisie en fonction du secteur utile d'émission ou de réception ; on a vu qu'il est souvent voisin de 10 à 20° d'ouverture. Lorsqu'il est possible de bien séparer angulairement ce secteur de ceux des arrivées sonores parasites, une directivité appropriée permettra d'éliminer certains trajets sonores. C'est le cas de la propagation "normale", où ce système peut être efficacement utilisé pour éliminer les trajets réfléchis sur le fond et sur la surface [34]. La capacité du canal est alors nettement améliorée à la fois par la réduction de la durée de sa réponse temporelle et par l'élimination de trajets sonores proches dans le temps, qui interfèrent entre eux.

Des considérations techniques obligent à limiter le rapport bande passante/fréquence centrale d'émission à une valeur maximum de l'ordre de 0,3. Cette limitation est sévère et ne permet d'exploiter toute la bande passante du milieu qu'en



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

multipliant le nombre d'installations travaillant à des fréquences différentes.

Le mode de transmission a aussi une influence directe sur la meilleure utilisation du milieu marin et sur les taux d'erreur que l'on peut atteindre en pratique. Si l'on choisit un système de traitement cohérent, avec une estimation directe de la fonction de diffusion du milieu, on peut améliorer nettement les performances du système [5].

QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINESREFERENCES

- 1 - B. GRANDVAUX,
Le canal de transmission sous-marin considéré comme un filaire linéaire non homogène. Rappels théoriques - Procédures expérimentales - Discussion.
3ème Colloque GRETSI - NICE, 1-5 Juin 1971.
- 2 - G. JOURDAIN,
Sur l'hypothèse de corrélation ponctuelle permettant d'introduire la fonction de diffusion d'un système de transmission aléatoire et non homogène. Rapport CEPHAG 31/71.
- 3 - B. FAURE,
Montage d'une chaîne de mesures destinée à étudier la transmission d'un milieu marin, sous l'hypothèse d'une excitation monochromatique. Rapport CEPHAG 7/72.
- 4 - R.J. URICK,
Principles of Underwater Sound for Engineers.
(Mc Graw-Hill Book Co).
- 5 - R.E. WILLIAMS and H.F. BATTESTIN,
Coherent Recombination of Acoustic Multipath Signals Propagated in the Deep Ocean.
J.A.S.A. 50, 6, p. 1433 (Déc. 71).
- 6 - R.J. URICK,
Low-Frequency Sound Attenuation in the Deep Ocean.
J.A.S.A. 35, 9, p. 1413 (Sept. 63).
- 7 - R.S. PORTER,
Dispersion of axial SOFAR propagation in the Western Mediterranean.
J.A.S.A., 53, 1, p. 181 (1973).

QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

-
- [8] - J.A. NEUBERT,
Multipath Summability in Ray-Theory Intensity Calculations in the Real Ocean. J.A.S.A. 51, 1, p.310 (Janv.72)
- [9] - BREKHOVSKIH,
Waves in Layered Media.
(Academic Press, N.Y. 1960).
- [10] - B. GRANDVAUX,
L'amortissement en milieu marin.
Mémorial de l'Artillerie Française-Sciences et techniques de l'Armement - 4e fascicule, 1969.
- [11] - C. BRADNER BROWN and S.J. RAFF,
Theoretical Treatment of Low-Frequency Sound Attenuation in the Deep Ocean. J.A.S.A. 35, 12, p.2007 (Dec. 63).
- [12] - ANCEY,
Etude interne au Laboratoire DSM du BRUSC.
- [13] - L. LIEBERMANN,
The Effect of Temperature Inhomogeneities in the Ocean on the Propagation of Sound. J.A.S.A, 23, 5, P.563 (1951)
- [14] - R. LAVAL,
Coherence Problems in Underwater Acoustic Propagation.
Marina Italiana Advanced Study Institute on Stochastic Problems in Underwater Sound Propagation LERICI (Sept.1967)
- [15] - M.J. SHEEHY,
Transmission of 24 - kc Underwater Sound from a Deep Source. J.A.S.A., 22, p. 24, (1950).
- [16] - PATTERSON,
Intensity Fluctuations of Direct and Surface reflected Signals (1962).

QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

-
- [17] - F.H. SAGAR,
Fluctuations in Intensity of Short Pulses of 14,5 - kc
Sound Received from a source in the Sea.
J.A.S.A, 27, 6, p. 1092 (1955).
- [18] - S.G. GERSHMAN and Yu I. TUZHILKIN,
Measurement of Transverse Correlation Coefficient of a
Continuous Signal on the Sea.
AKUSTICHESKŪ ZHURNAL 6, 3, p. 292 (1960).
- [19] - LUND, SINGLETARY and KELLY,
Coherence of Acoustic Signals in the Ocean.
USNOL report n° 61.168 (1962).
- [20] - D.J. PARKES and M. PAZZINI,
Experimental Study of Coherence in Underwater Acoustics.
NATO - Marina Italiana Advanced Study Institute on
Stochastic Problems in Underwater Sound Propagation -
LERICI (Sept. 1967).
- [21] - I. TOLSTOI,
Total Internal Reflection of Pulses in a Stratified
Media. J.A.S.A, 37, p. 1153 (1966).
- [22] - R.M. BARASH,
Evidence of Phase Shift at Caustics,
J.A.S.A, 43, 2, p. 378 (1968).
- [23] - W.B. ALLEN and al,
Pseudo-random Signal Correlation Methods for Underwater
Acoustic Research (II - Instrumentation).
J.A.S.A, 39, 1, p. 62 (1966).
- [24] - B. LALLEMENT and P. STANGERUP,
Reflectivity of Deep Sedimentary Bottoms.
Techn. Memo n° 89, SACLANT CENTRE, LA SPEZIA (1965).

QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

-
- [25] - O.F. HASTRUP,
Digital Analysis of Acoustic Reflectivity in the
Thyrranian Abyssal Plain,
J.A.S.A, 47, 1 a, p. 181 (1970).
- [26] - B.F. CRON and R.L. SHAFFER,
Cross - correlation Loss Caused by Bottom Reflection.
USNUSL report 748 (1966).
- [27] - E. PICHON, B. GRANDVAUX,
Quelques résultats de mesures de Propagation effectuées
sur le Polygone des Açores.
Etude intérieure au Laboratoire de Détection Sous-Mari-
ne (Mars 1972).
- [28] - K.A. SØSTRAND,
Measurement of coherence and stability of underwater
acoustic transmissions.
NATO Advanced Study Institute - Enschede 1968.
- [29] - B. GRANDVAUX,
Dispersion spectrale d'une transmission entre une sta-
tion fixe et un sous-marin.
Etude intérieure au Laboratoire de Détection Sous-Marine.
- [30] - J. CLAVIER - M. NIQUIL, G. COFFINET, F. BEHR,
Théorie et Techniques de la transmission des données.
Cours ENSTA - MASSON Ed.
- [31] - B. GRANDVAUX, F. LEFAUDEUX,
Capacité du canal de transmission sous-marin. Etude
intérieure au Laboratoire de Détection Sous-Marine -
Mars 1973.
- [32] - Madame FAUGERAS,
Transmission d'information par voie acoustique.
3ème Colloque GRETSI (1971).

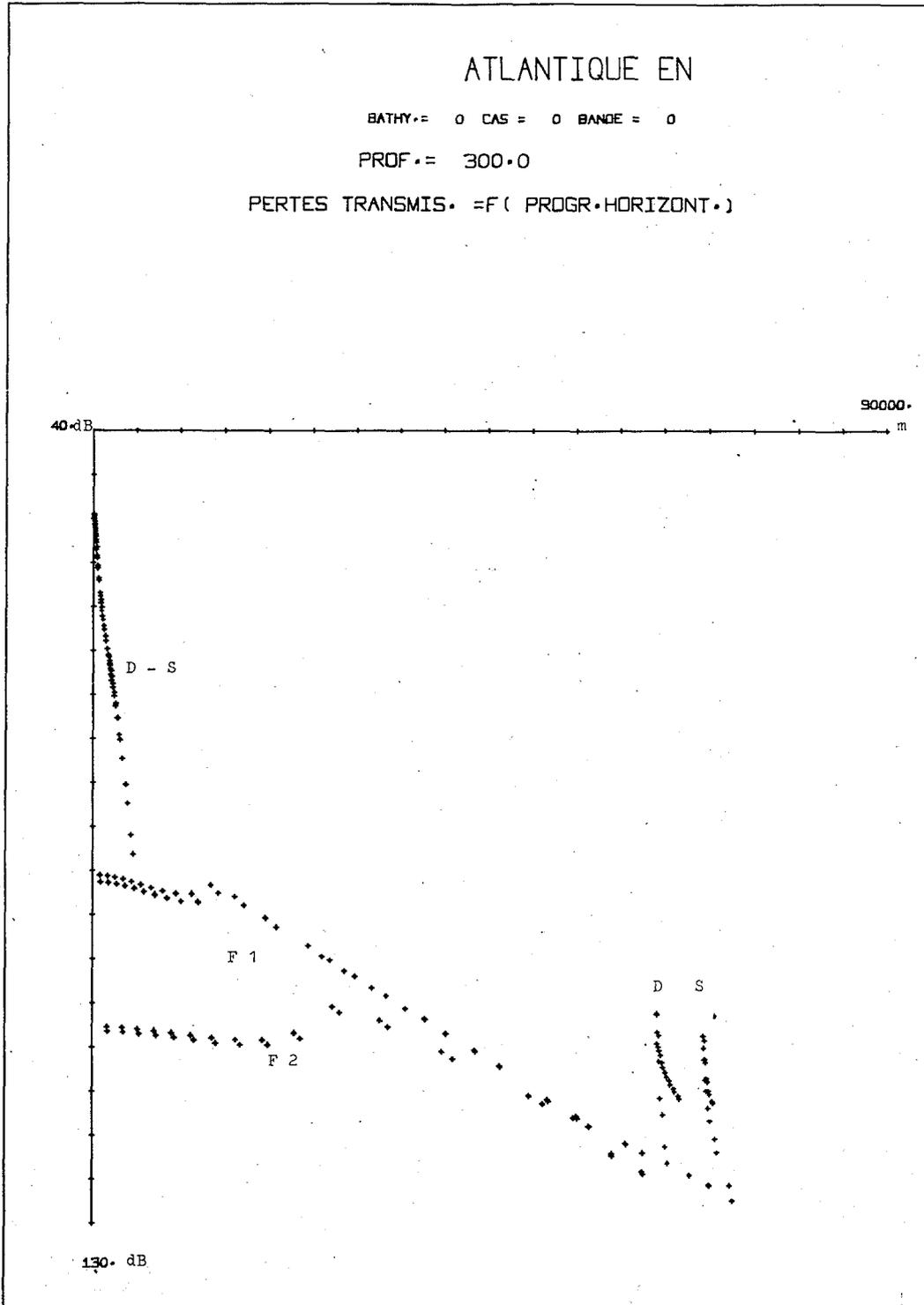


QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

- [33] - MARSH and SCHULKIN,
- Shallow Water Transmission, JASA, 34, p.863 (1962).
- Sound Transmission at Frequencies between 2 and 25
KC's, (1954).
- [34] - J.L. VERNET et G. BIENVENU,
Liaisons sous-marines à 300 bauds et présence de
trajets multiples.
3ème Colloque GRETSI (1971).

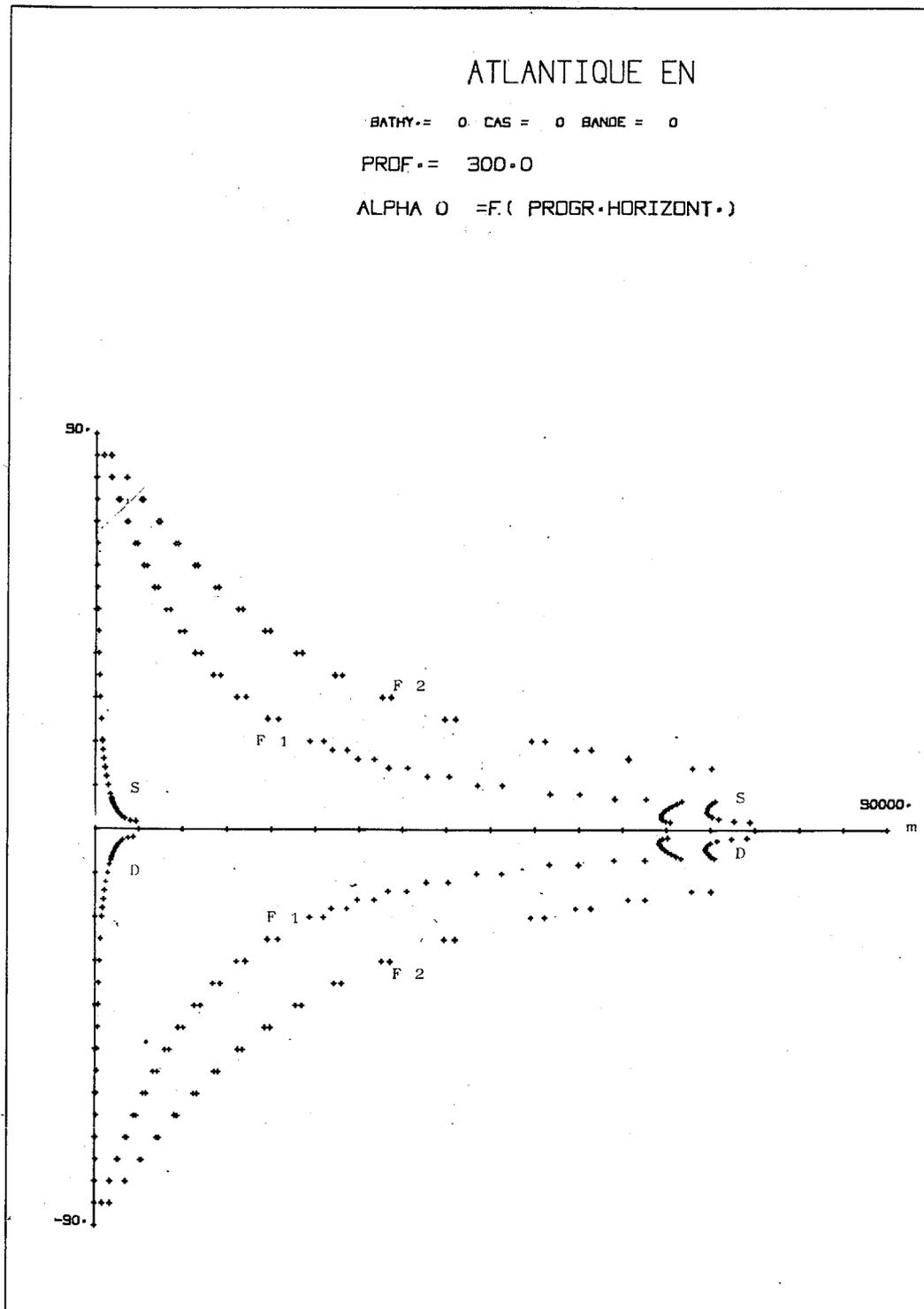
QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

Fig. 1 - Propagation classique par grands fonds



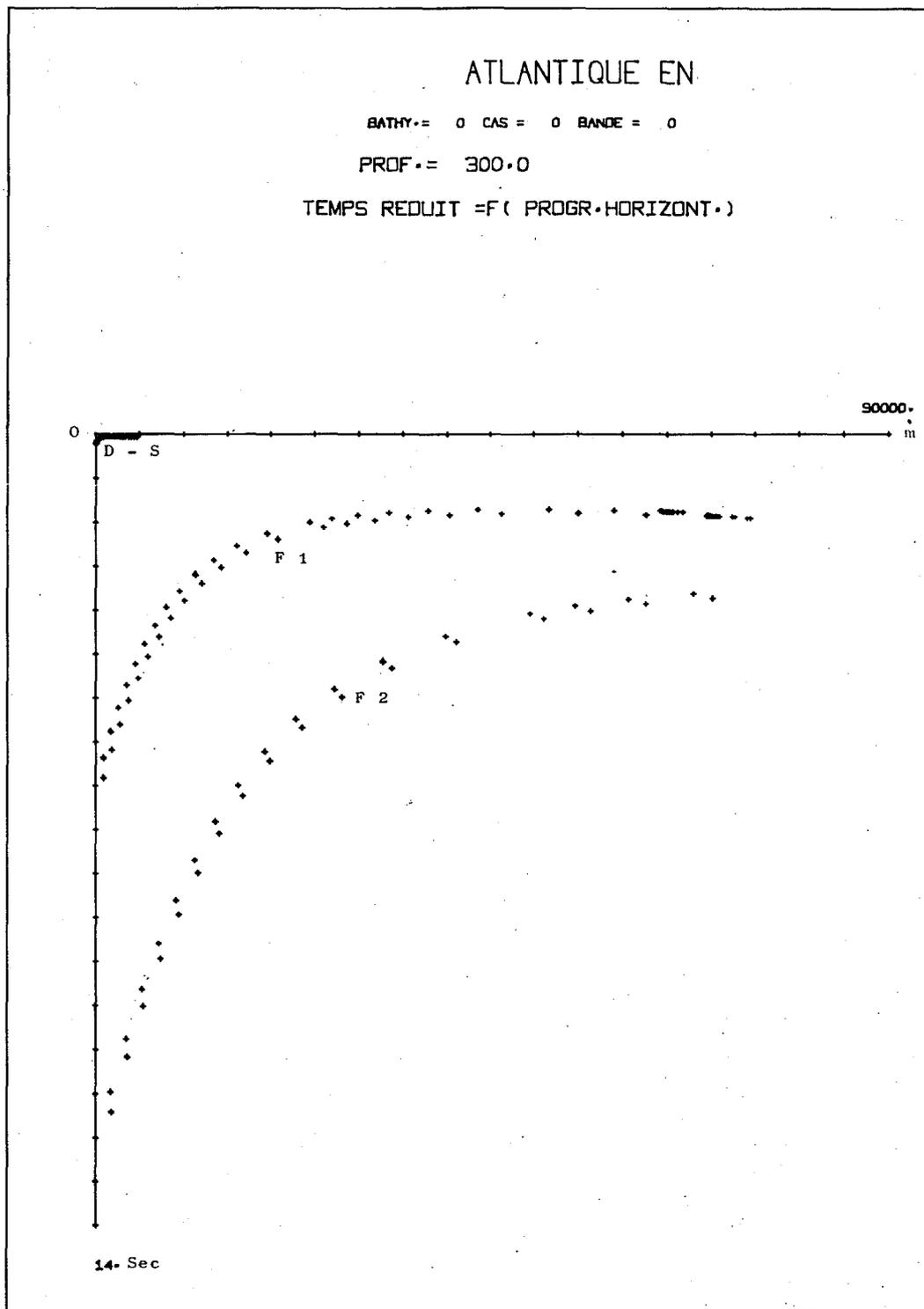
QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

Fig. 2 - Propagation classique par grands fonds



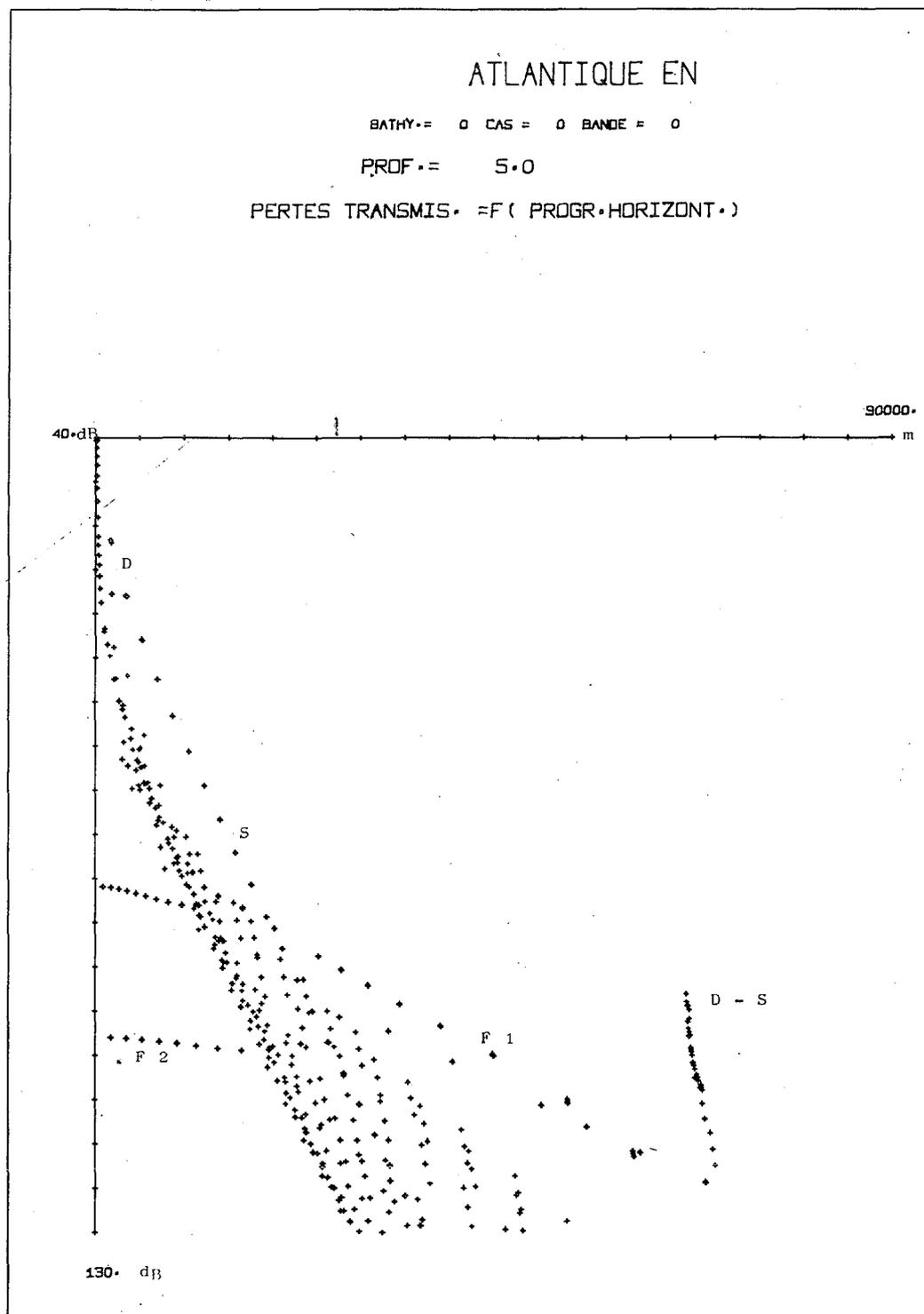
QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

Fig. 3 - Propagation classique par grands fonds



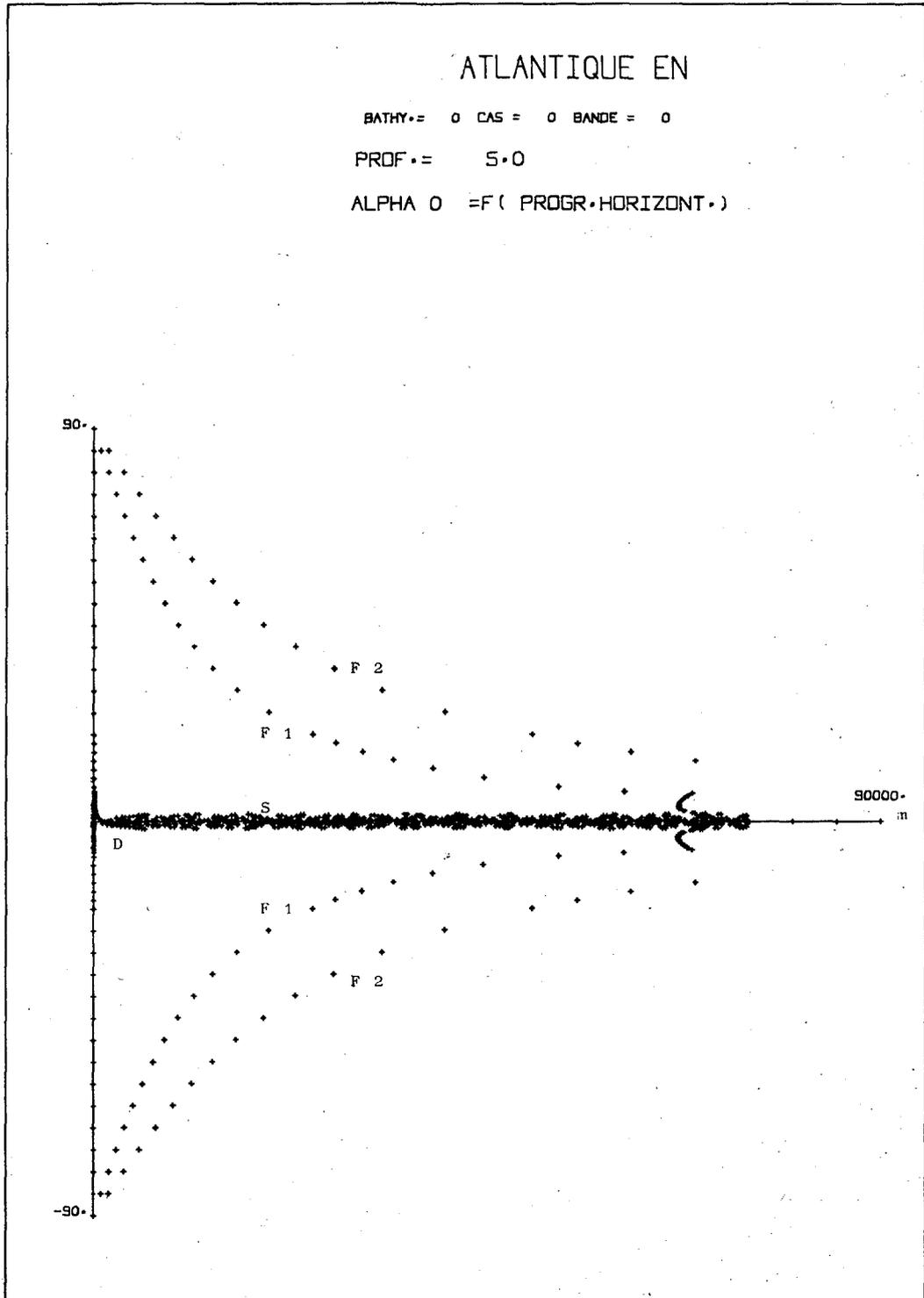
QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

Fig. 4 - Propagation dans le chenal de surface



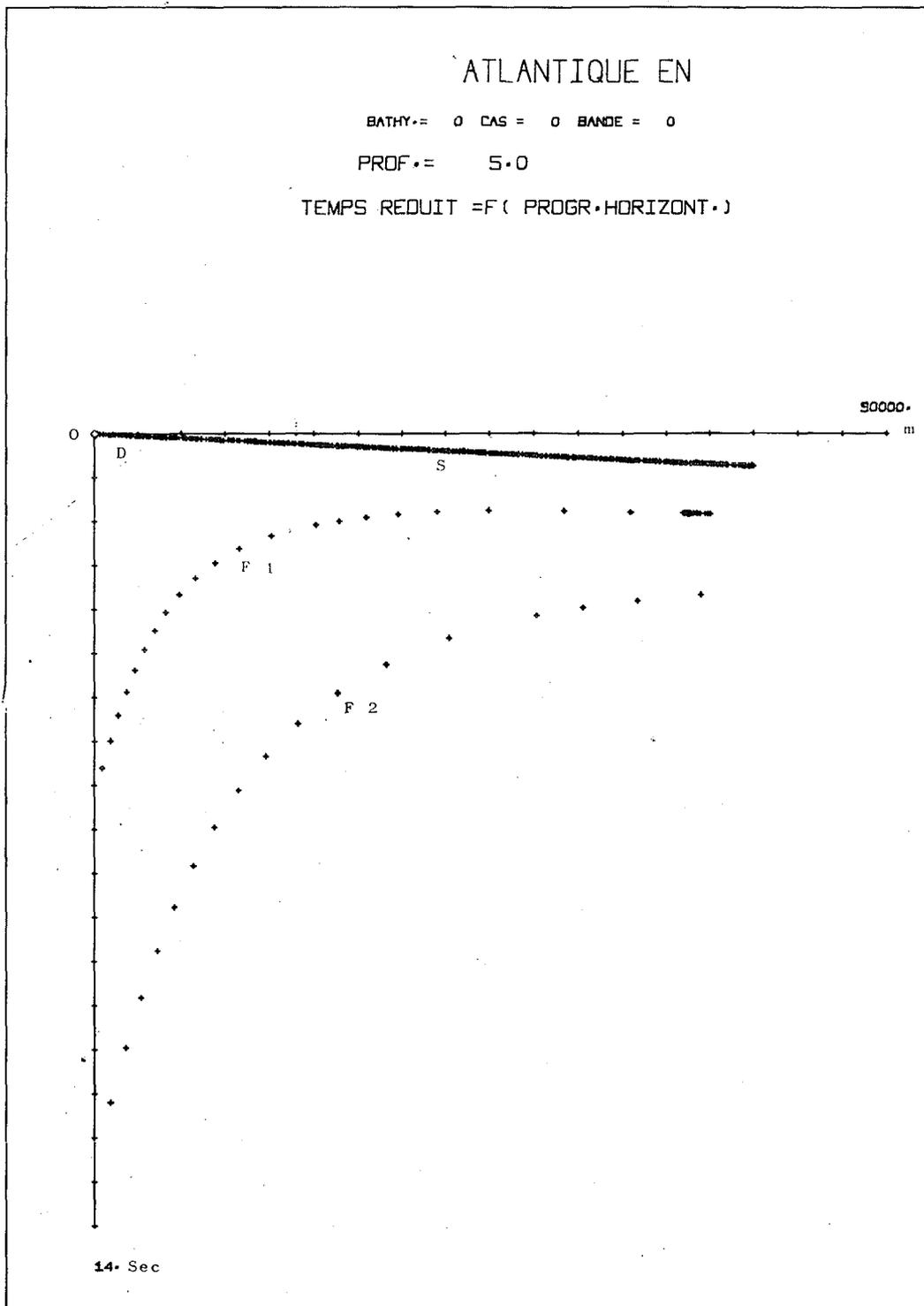
QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

Fig. 5 - Propagation dans le chenal de surface



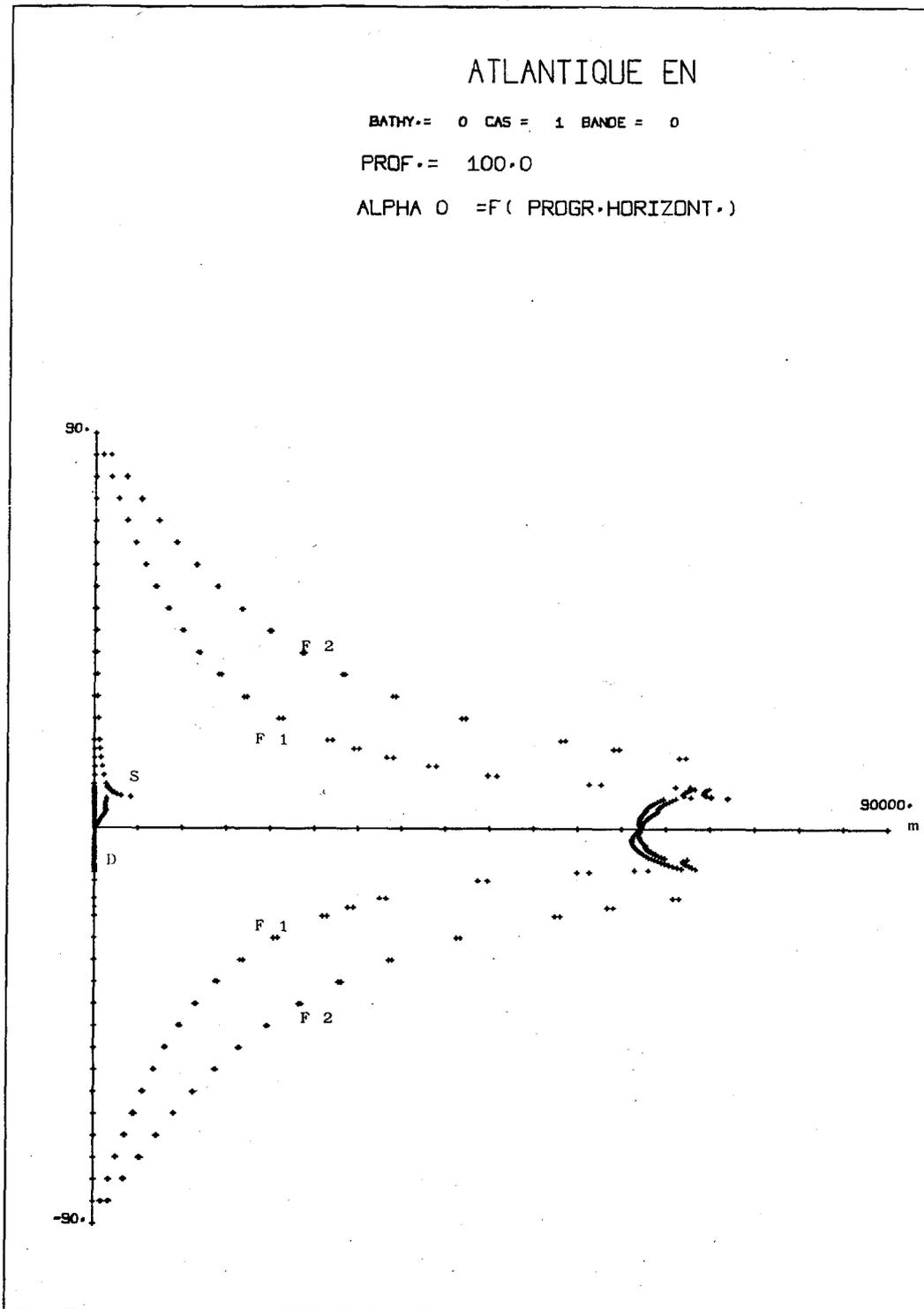
QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

Fig. 6 - Propagation dans le chenal de surface



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

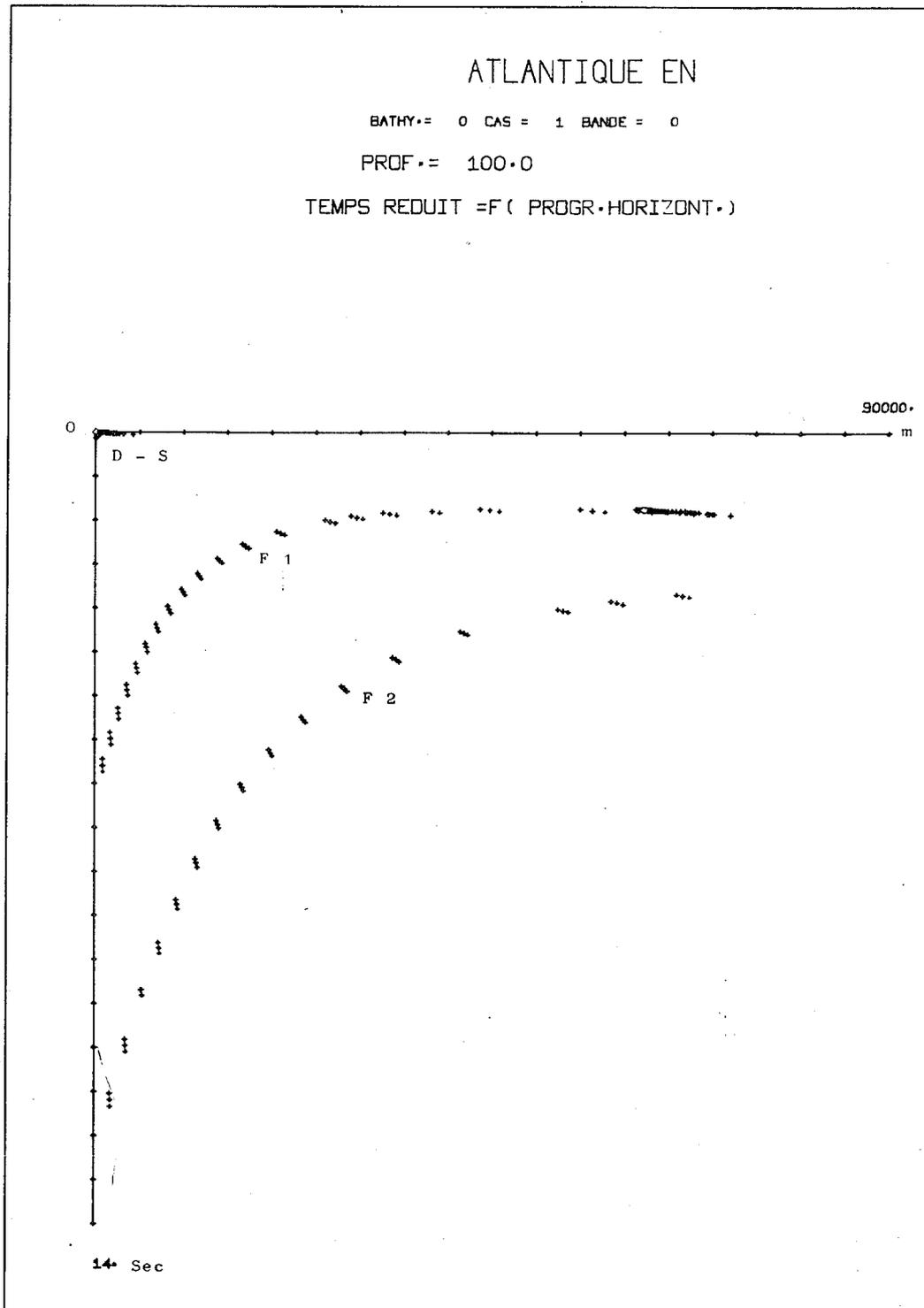
Fig. 7 - Propagation type "Sonar remorqué"





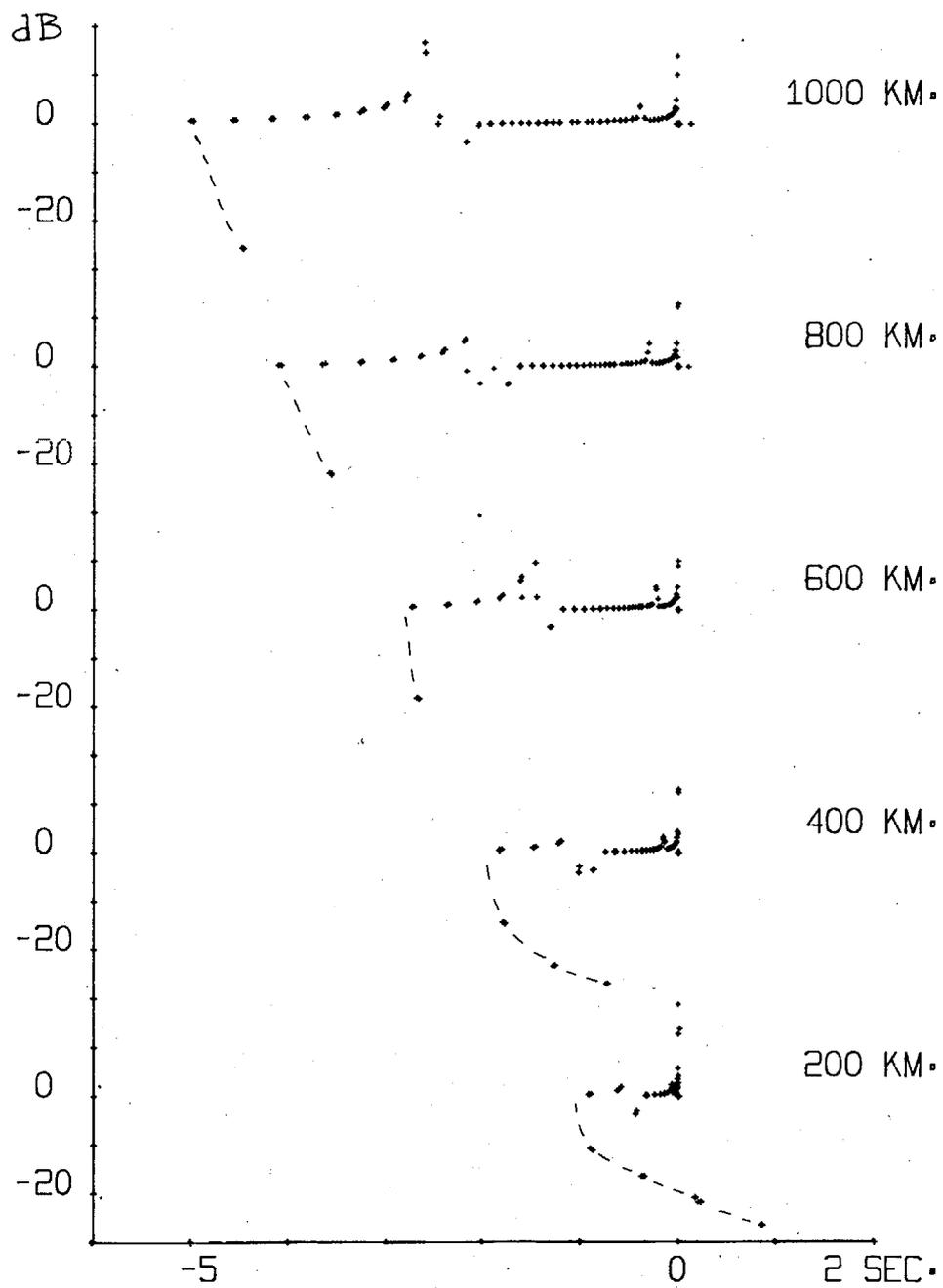
QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

Fig. 3 - Propagation type "Sonar remorqué"



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

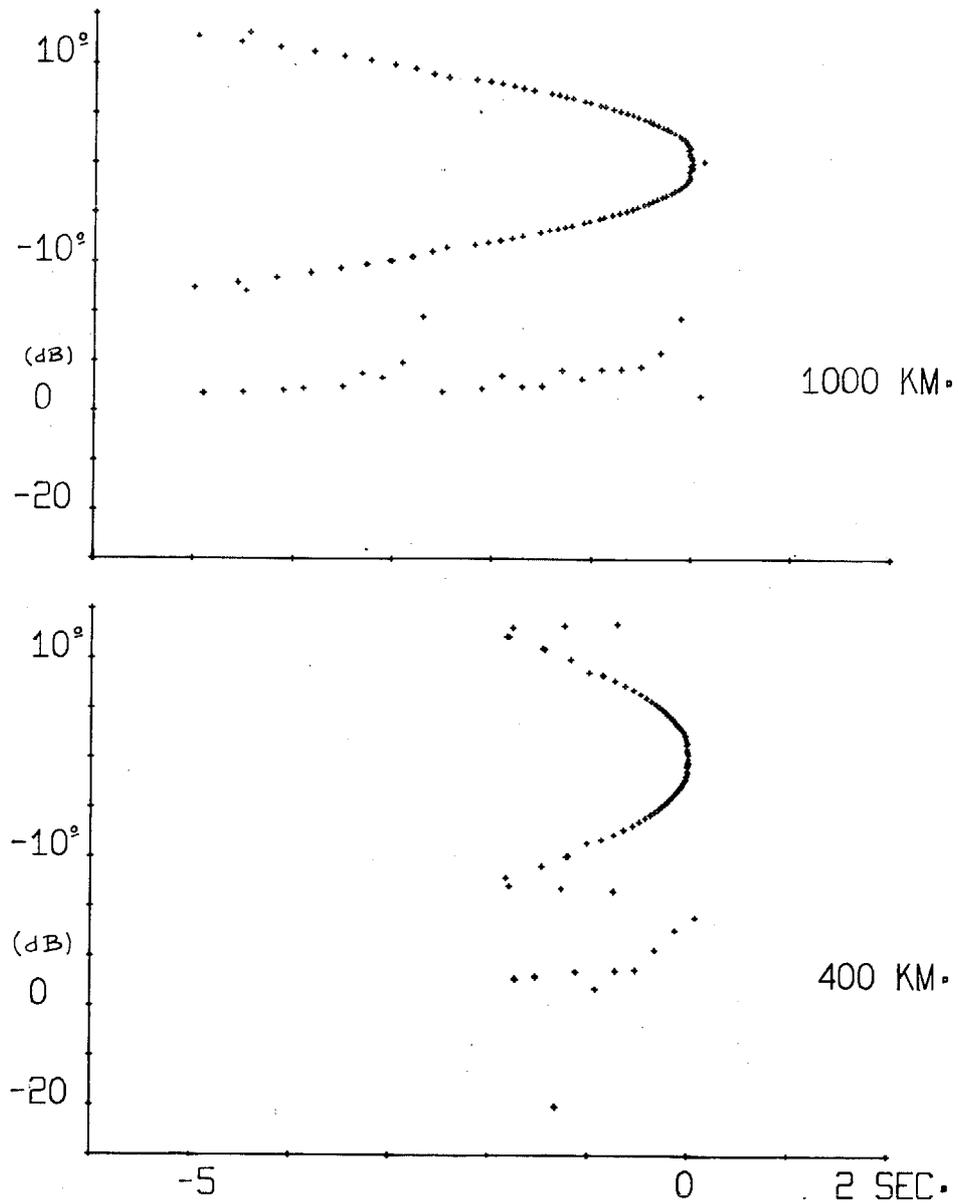
Fig. 9 - Dispersion temporelle dans le chenal profond





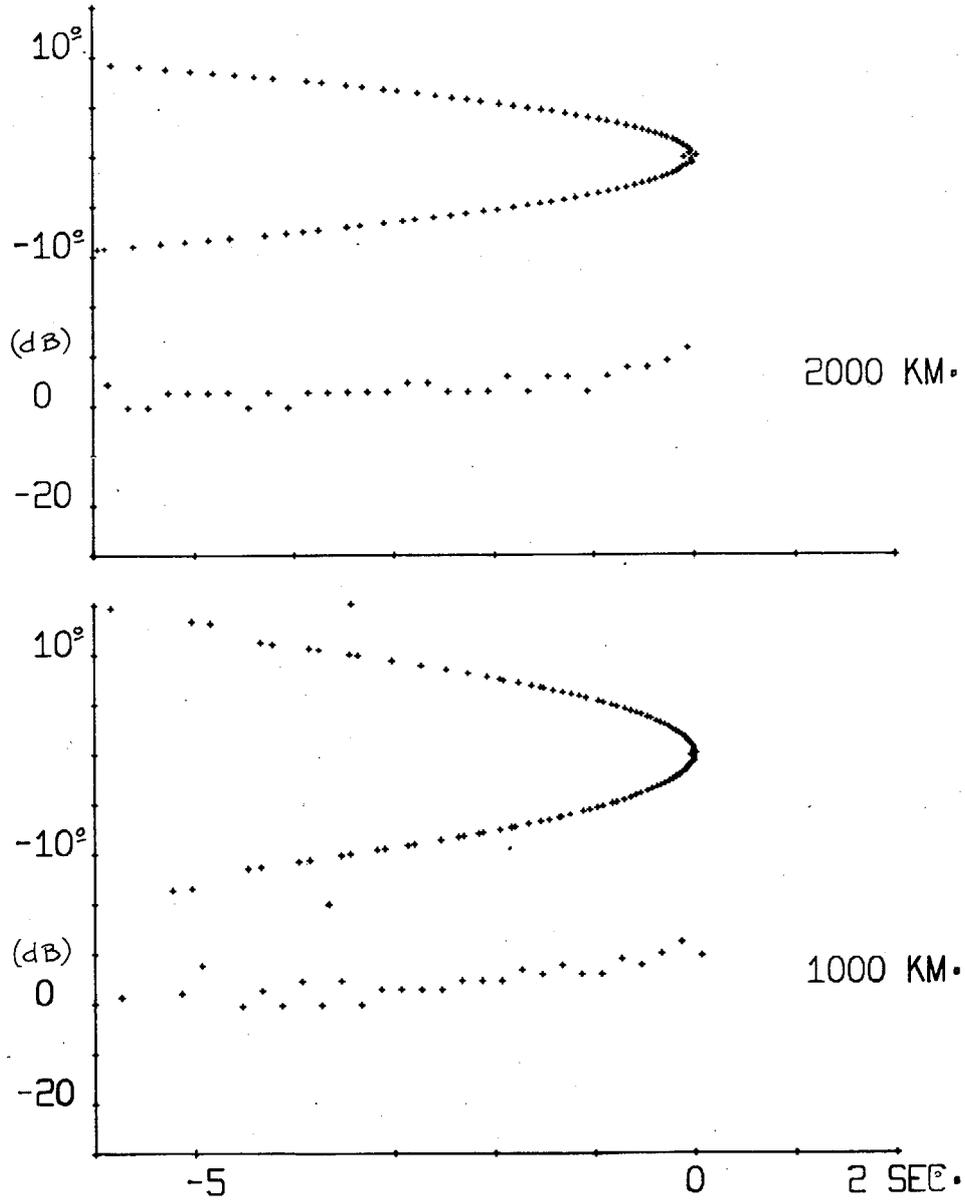
QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

Fig. 10 - Dispersions temporelle et spatiale dans le chenal profond



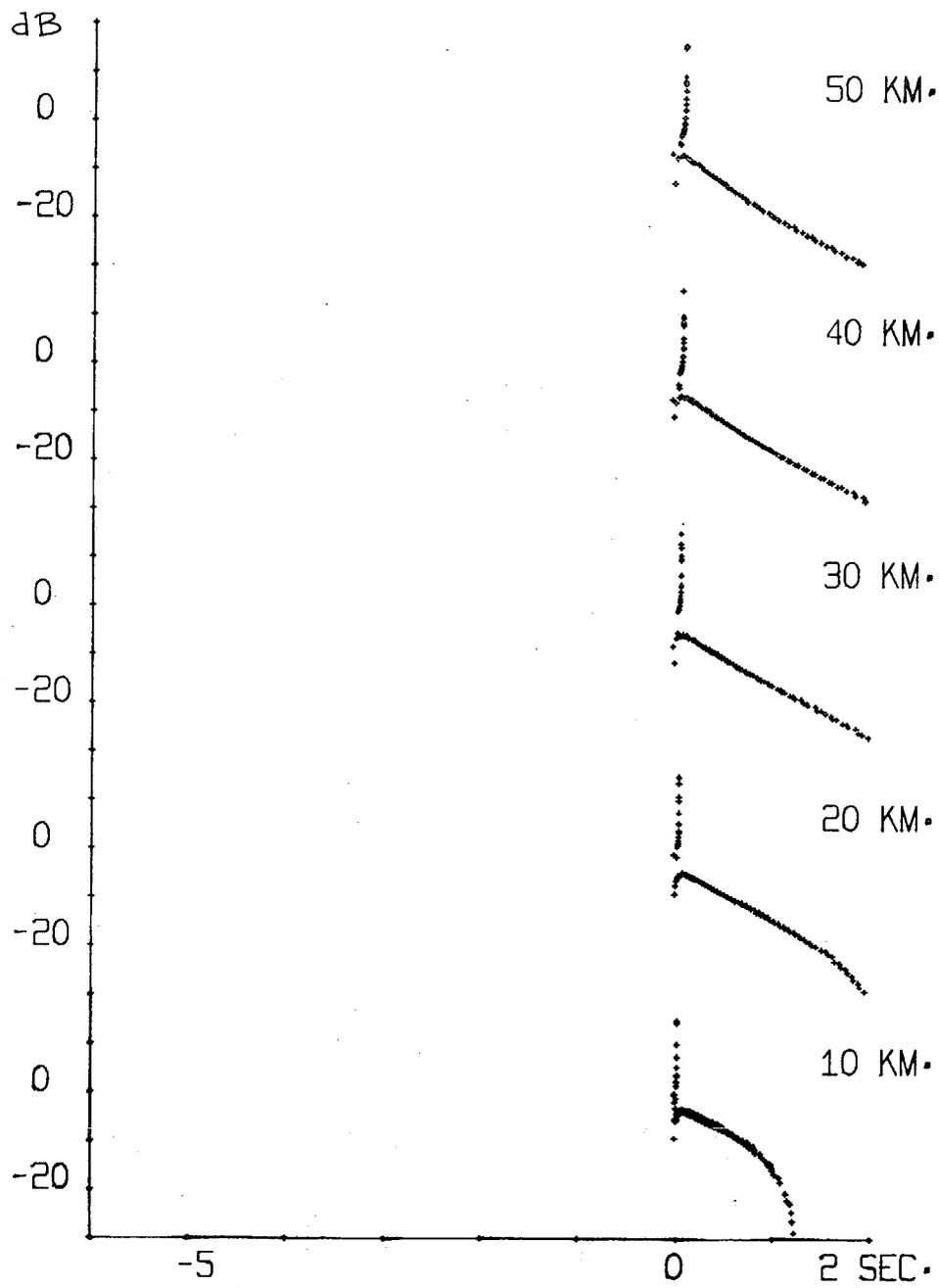
QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

Fig. 11 - Dispersion temporelle et spatiale dans le chenal profond



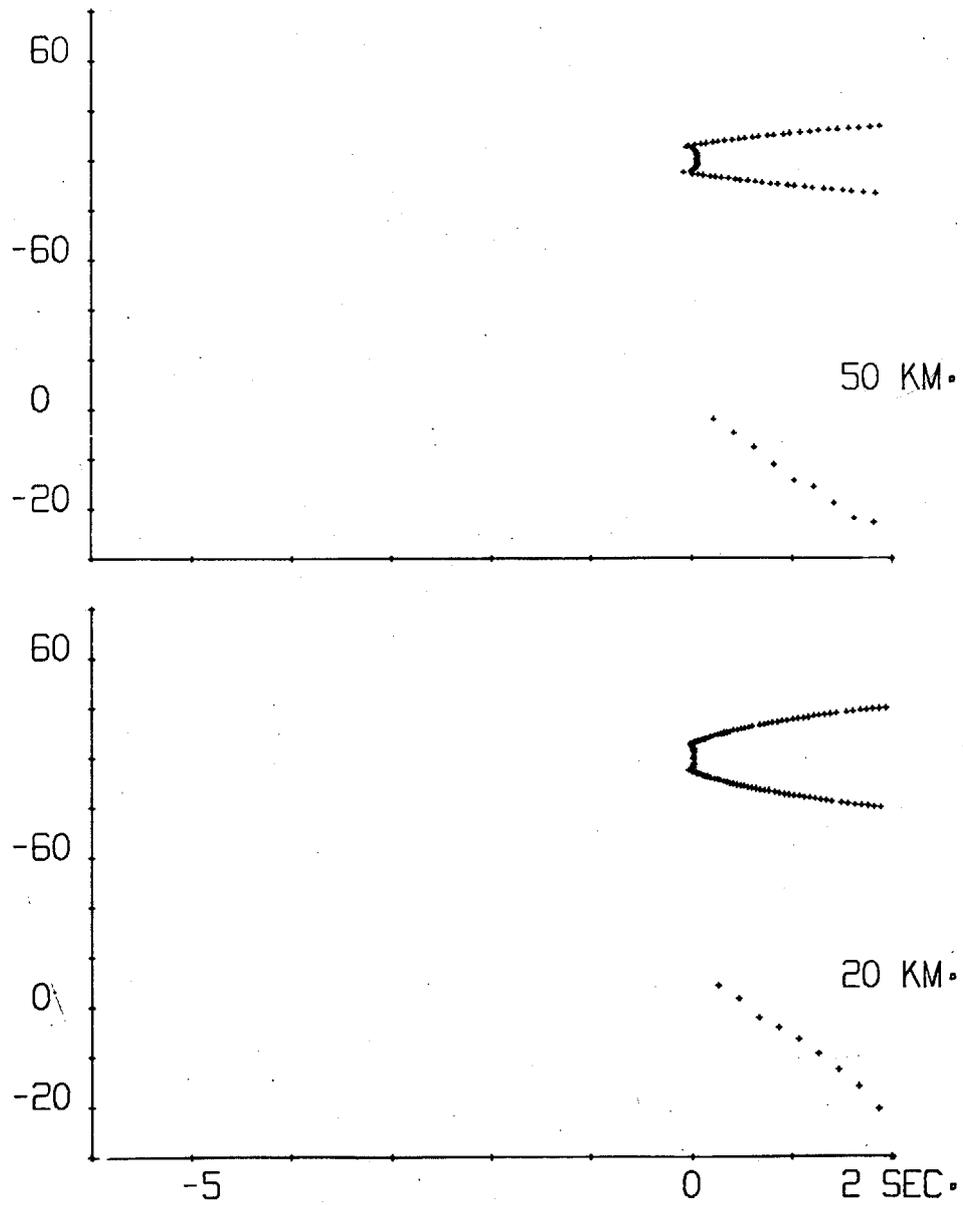
QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

Fig. 12 - Dispersion temporelle par petits fonds



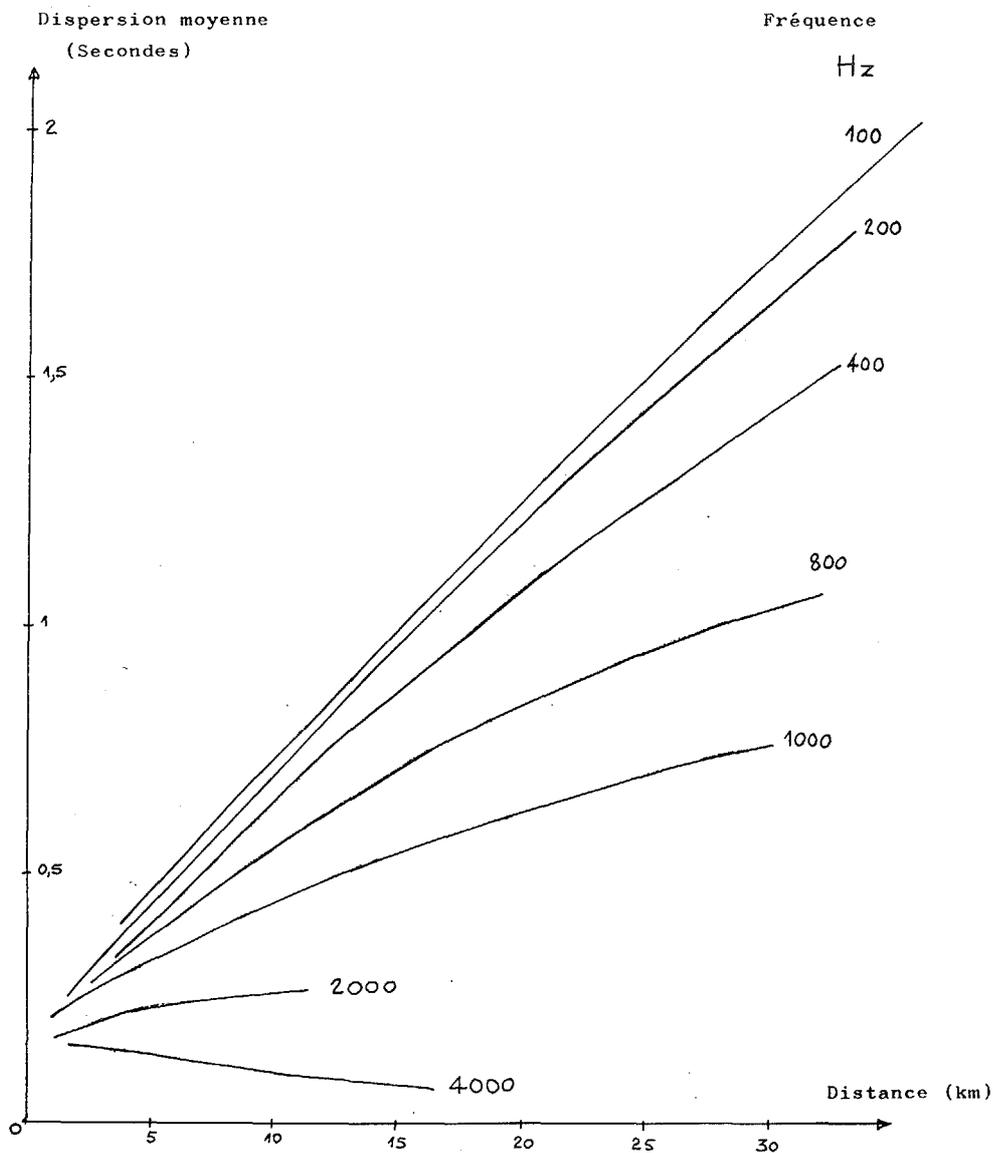
QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

Fig. 13 - Dispersion temporelle et spatiale par petits fonds



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

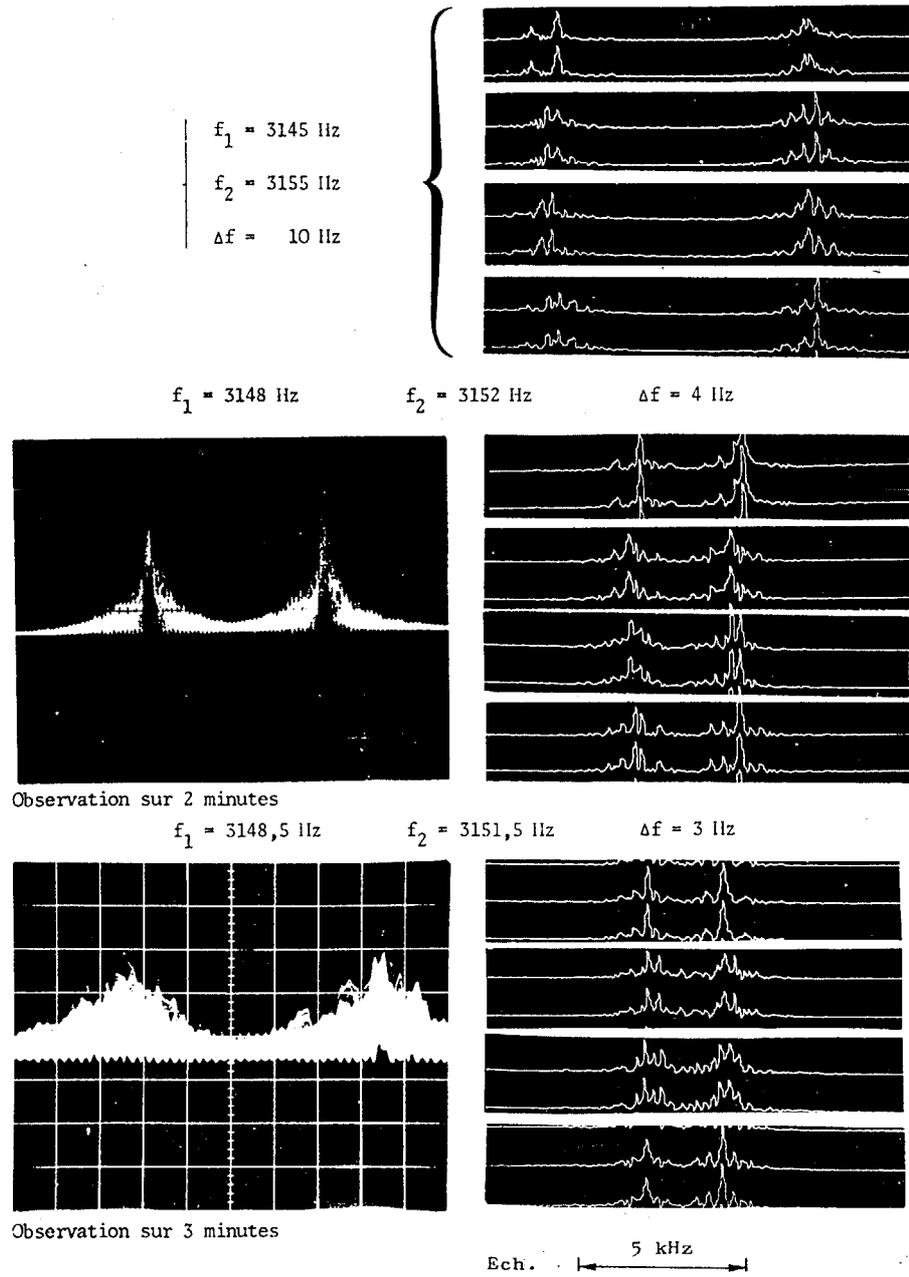
Fig. 14 - Dispersion temporelles mesurées par petits fonds



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

Fig. 15 - Dispersion en fréquence entre plateformes fixes

ETALEMENT DE DEUX RAIES SPECTRALES SIMULTANÉES
ECHO +5° - NOVEMBER +5°





QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

Fig. 16 - Dispersion en fréquence entre plateformes fixes

ETALEMENT DE DEUX RATES SPECTRALES SIMULTANÉES

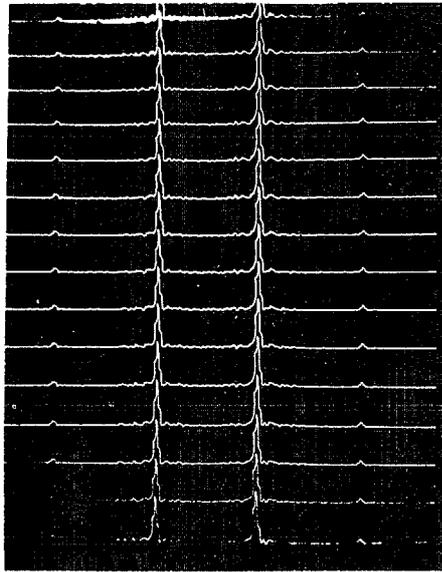
ECIO -5° - NOVEMBER -5°

$$f_1 = 3148 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 3152 \text{ Hz}$$

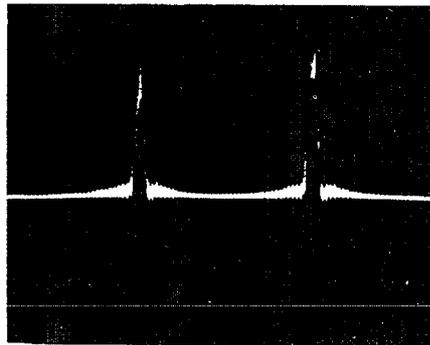
Analyses de 10 secondes du signal décalées de 50 ms

Finesse d'analyse 0,1 Hz



Observation
de
12 analyses

Echelle 2 Hz/div



Observation sur 1 mm

Echelle 1 Hz/div



QUELQUES ASPECTS DES COMMUNICATIONS ACOUSTIQUES SOUS-MARINES

Fig. 17 - Dispersion en fréquence entre une plateforme fixe et un sous-marin

