



TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 1^{er} au 5 juin 1971

TRANSMISSION D'INFORMATION PAR VOIE ACOUSTIQUE

MADAME FAUGERAS - CIT-ALCATEL

RESUME

Quelques aspects de la transmission d'information sous-marine ont été abordés. On a essayé d'évaluer le taux d'erreur en fonction du rapport signal sur bruit pour une transmission binaire puis une transmission M^{aire} . L'effet des trajets multiples sur le taux d'erreur a été ensuite examiné.

SUMMARY

We analysed some aspects of underwater information transmission. We evaluated the error rate of a binary and M-ary transmission as a function of the signal/noise ratio. We looked at the multipath effect on this error rate.



TRANSMISSION D'INFORMATION PAR VOIE ACOUSTIQUE

La transmission d'information dans le milieu marin est un sujet qui, après être resté longtemps dans l'ombre, suscite actuellement l'intérêt de nombreuses équipes, alors que sur câble elle a donné lieu à une quantité d'études depuis fort longtemps. On peut aborder le problème de plusieurs manières et il est certainement intéressant de comparer les résultats. Nous avons essayé de nous rattacher aux études connues.

1.- CARACTERISTIQUES DU CANAL DE TRANSMISSION

Le milieu marin est étudié depuis de nombreuses années, mais il est relativement récent de l'aborder du point de vue d'un canal de transmission (1). Rappelons brièvement les propriétés générales en les comparant avec celles du canal utilisé par le téléphone.

La largeur de bande téléphonique unitaire a été un peu arbitrairement limitée à la bande 300 Hz - 3.400 Hz.

Il est évident qu'il est possible de juxtaposer un grand nombre de canaux de ce genre sur un même fil.

Chaque canal est peu perturbé par le bruit car l'affaiblissement est faible, les réflexions sur les extrémités ont peu d'importance et la diaphonie par rapport aux autres canaux peut être très réduite. Par contre, la distorsion de temps de propagation est très importante dès que la fréquence approche des bords du canal.

La largeur de bande totale du canal de transmission sous-marin est limitée à une valeur qui est fonction de la distance maximale recherchée et de la puissance émise. Elle est toujours de l'ordre de grandeur de quelques kHz et au maximum de 10 à 20 kHz.

Dans cette bande de fréquence les distorsions de temps de propagation sont très faibles et liées aux hétérogénéités du milieu. Elles sont dans tous les cas négligeables.



TRANSMISSION D'INFORMATION PAR VOIE ACOUSTIQUE

Les signaux sont affectés d'un effet Doppler qui peut atteindre quelques pourcents et varier rapidement dans le temps.

Par contre, l'affaiblissement des signaux utiles est très important et le bruit risque de gêner assez rapidement les transmissions. La réverbération est elle aussi élevée tout en restant en règle générale très inférieure au signal utile.

Ce sont essentiellement les trajets multiples qui peuvent perturber le signal direct. Ils ont pour origine les réflexions sur les limites du milieu et les réfractions sur les couches à gradient de célérité élevé.

Les trajets réfléchis sur le fond ont un affaiblissement en général supérieur de 10 ou 20 dB à celui du signal direct, mais ceux réfléchis sur la surface ne sont pratiquement pas affaiblis. Ils peuvent présenter une légère dispersion de fréquence superposée à un faible doppler différentiel par rapport au trajet direct.

En conclusion les caractéristiques du milieu seraient très satisfaisantes si les trajets multiples n'existaient pas.

2.- CAPACITE THEORIQUE DU CANAL

L'évaluation de la capacité totale du canal est difficile. Tout d'abord la largeur de bande n'est pas parfaitement définie ainsi que nous l'avons vu : nous nous contenterons alors d'évaluer la capacité pour une largeur de bande donnée B .

Au sens de Shannon la capacité du canal est :

$$C = B \log \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

S/N rapport signal sur bruit.



TRANSMISSION D'INFORMATION PAR VOIE ACOUSTIQUE

Elle serait donc fonction de la puissance utilisée à l'émission de la distance, et c'est sous cet aspect qu'elle a été étudiée par Rowlands (2) qui a fait une tentative de recherche d'optimisation.

Au sens de Niquist elle est seulement :

$$C = 2 B.$$

Pratiquement dans les canaux de transmission usuels, sur fil par exemple, il est difficile de dépasser et même d'atteindre la capacité de Niquist.

3.- TAUX D'ERREUR DANS LE CAS D'UNE TRANSMISSION BINAIRE

Le bruit se manifeste par l'apparition d'erreurs : nous faisons rentrer dans le terme bruit tous les parasites susceptibles de perturber la liaison, c'est-à-dire le bruit de mer et le bruit propre, la réverbération qui peut être assimilée à un bruit gaussien stationnaire dans la bande du signal puisque l'émission est permanente et également les trajets réfléchis sur les frontières arrivant affaiblis, très longtemps après le signal qui leur correspond mais en même temps qu'un autre signal en cours de réception.

Dans le cas où le signal à la réception est stable en amplitude ou faiblement variable, le taux d'erreur peut être évalué en utilisant les résultats de Kotelnikov (3). Supposons que l'on utilise une modulation F.S.K., c'est-à-dire telle que le bit 0 est envoyé sous la forme :

$$A_0 \cos(\omega_1 t + \theta_1)$$

pendant un temps élémentaire T

et le bit 1 est envoyé sous la forme : $A_0 \cos(\omega_2 t + \theta_2)$



TRANSMISSION D'INFORMATION PAR VOIE ACOUSTIQUE

pendant le même temps élémentaire.

On définit un rapport R égal à :

$$R = \frac{A_0^2 T}{2 N_0^2}$$

où N_0 est le niveau spectral par Hertz du bruit dans la bande et

$\frac{A_0^2 T}{2}$ représente l'énergie d'un bit élémentaire.

Pour un récepteur idéal le taux d'erreur dépend de ce rapport et également de l'écart entre les deux fréquences. Il existe un écart de fréquence optimal qui pour un rapport R donné donne le taux d'erreur minimal. Il correspond à un spectre minimal pour l'ensemble des deux signaux et est égal à ΔF_0 tel que :

$$\Delta F_0 = \frac{4.5}{2\pi} \frac{1}{T} \approx \frac{0.7}{T}$$

Si l'écart de fréquence est inférieur à ΔF_0 , le taux d'erreur augmente très rapidement. S'il est plus élevé le taux d'erreur varie peu, mais la largeur de bande nécessaire pour transmettre les signaux augmente.

Nous avons représenté sur la figure 1 le taux d'erreur pour un récepteur idéal dans le cas où

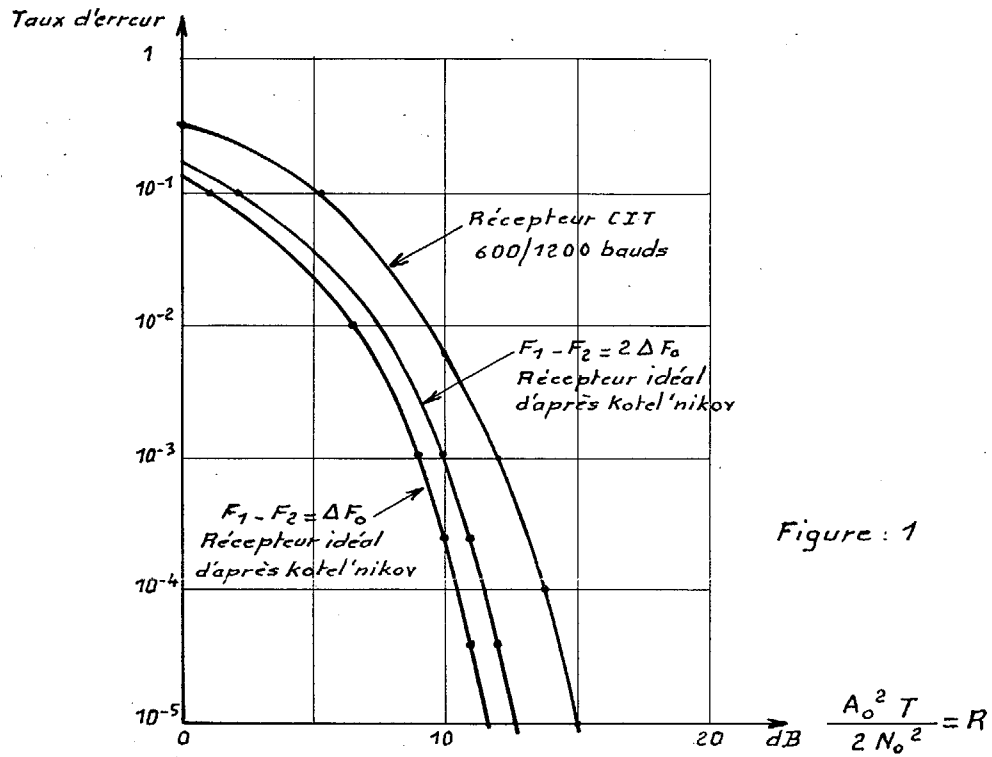
$$F_1 - F_2 = \Delta F_0 \text{ qui correspond à une capacité égale à } 0.7 \text{ B}$$

$$\text{et } F_1 - F_2 = 2\Delta F_0 \text{ } C \approx 0.5 \text{ B}$$

soit beaucoup moins que la capacité de Niquist.



TRANSMISSION D'INFORMATION PAR VOIE ACOUSTIQUE



Les deux signaux 1 et 0 sont supposés équiprobables.

Dans les récepteurs réels les performances ne sont pas aussi bonnes, mais elles ne s'en éloignent guère. Nous avons reporté sur la figure 1 le taux d'erreur d'un MODEM 600 1200 bauds CIT où $\Delta F = 0,66 \frac{1}{T}$. Par rapport à celui d'un récepteur idéal au sens de

Kotel'nikov, la dégradation se manifeste comme une perte de l'ordre de 3 dB sur le rapport signal sur bruit. De toute façon un rapport de 15 dB entre l'énergie du bit élémentaire et le niveau spectral de bruit, suffit à assurer un taux d'erreur très faible.



4.- TAUX D'ERREUR DANS LE CAS D'UNE TRANSMISSION M^{aire}

Il peut être intéressant pour des raisons diverses de transmettre une modulation M^{aire} au lieu d'une modulation binaire, c'est-à-dire d'utiliser un ensemble de M fonctions élémentaires.

Ceci permet soit d'augmenter la capacité d'un canal, soit à capacité donnée d'augmenter la durée du signal élémentaire. Le nombre de bits transmis par un signal élémentaire est égal à $\log_2 M$.

Si on utilise un ensemble de quatre signaux par exemple, chaque signal transmet deux bits et on peut théoriquement, soit doubler la capacité du canal et se rapprocher ainsi de la capacité au sens de Shannon, soit doubler la durée élémentaire du bit à capacité constante.

L'analyse du taux d'erreur se ramène au problème de la confusion d'un signal avec un autre et l'on se trouve dans le cas général ramené à une matrice de confusion.

Dans le cas particulier, qui nous intéresse, où les signaux ont tous la même énergie, sont orthogonaux entre eux et équiprobables, le problème se simplifie.

La probabilité de confusion est :

$$1 - (1-p)^{M-1}$$

p étant la probabilité de confusion élémentaire, soit lorsque p est petit $(M-1)p$.

Examinons ce qui se passe dans le cas où l'on utilise M signaux à capacité de canal égale, c'est-à-dire en multipliant par $\log_2 M$ la durée élémentaire du bit, tout en maintenant l'amplitude des signaux constante.



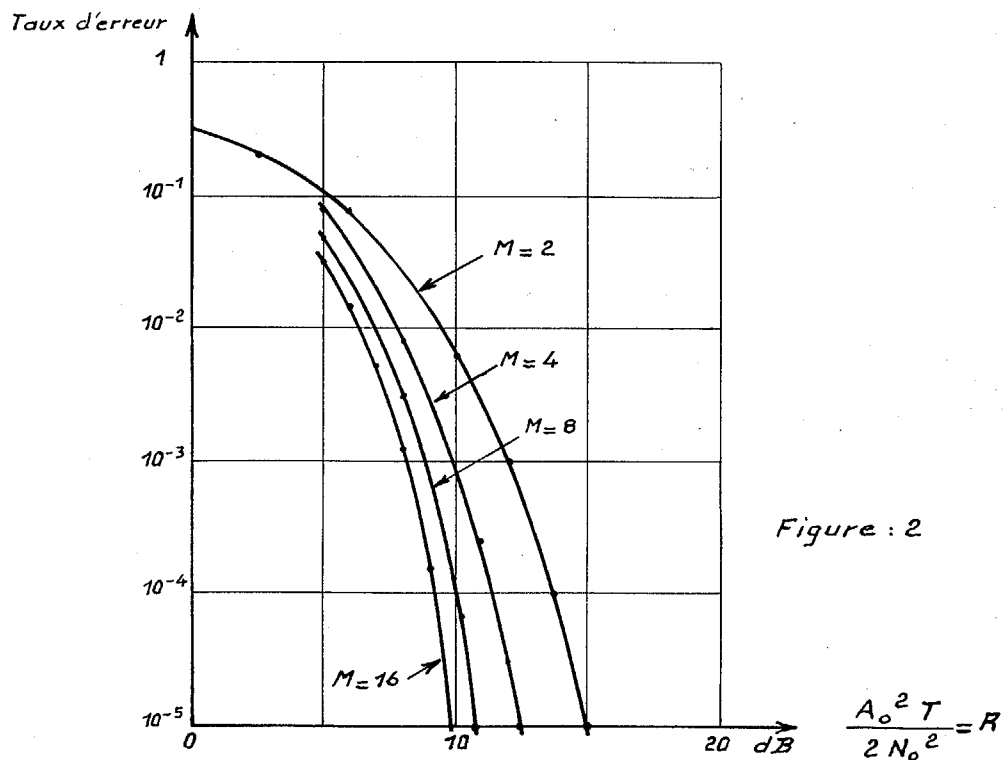
TRANSMISSION D'INFORMATION PAR VOIE ACOUSTIQUE

Soit $\frac{1}{T}$ la capacité du canal.

La durée du signal élémentaire est $\tau = T \log_2 M$ donc le rapport de l'énergie du signal élémentaire au niveau spectral du bruit augmente.

La probabilité d'erreur est $(M-1)$ fois le taux d'erreur obtenu avec un signal de durée τ .

La figure 2 représente le taux d'erreur dans ces conditions pour $M = 2, 4, 8$ et 16 en partant de la probabilité d'erreur d'un récepteur réel.



Nous voyons que, à capacité de canal donné, le taux d'erreur diminue au fur et à mesure que M augmente pour un rapport R donné. Remarquons cependant que ceci n'est valable que dans la mesure où le niveau spectral du bruit est indépendant de M .



TRANSMISSION D'INFORMATION PAR VOIE ACOUSTIQUE

La modulation M^{aire} semble donc particulièrement intéressante à plusieurs points de vue, une limitation existe cependant car la complexité du matériel croît avec M .

5.- EXAMEN DU FONCTIONNEMENT EN PRESENCE DE DEUX TRAJETS D'AMPLITUDES
EGALES

Ce cas de fonctionnement assez fréquent en mer correspond à la réception simultanée d'un trajet direct et d'un seul trajet réfléchi sur la surface dont l'amplitude peut être égale à celle du trajet direct.

L'écart de temps de propagation entre les deux trajets a une valeur moyenne θ et une fluctuation $\Delta\theta$. Les valeurs de ces deux paramètres sont fonction de la géométrie de la transmission : immersion de l'émetteur et du récepteur, distance. La fluctuation a un spectre qui dépend de l'état de la surface, mais également du doppler relatif des deux trajets.

Les deux signaux se composent.

La réverbération et les trajets réfléchis sur le fond se mêlent au bruit de fond pour définir le rapport signal sur bruit.

Il est évident que si θ n'est pas suffisamment petit devant la durée du signal élémentaire τ la liaison est impossible, nous supposons donc que $\theta \ll \tau$

5.1.- Réception cohérente

Si les signaux ont une définition en temps meilleure que θ et que l'on effectue à la réception un traitement cohérent, la superposition des deux trajets étant un phénomène linéaire, il y a possibilité de les séparer et de retrouver le message initial avec



TRANSMISSION D'INFORMATION PAR VOIE ACOUSTIQUE

le taux d'erreur lié au rapport signal sur bruit.

Cette solution est intéressante mais conduit à du matériel relativement compliqué. Elle est parfois indispensable.

5.2.- Réception incohérente

Dans ce cas il n'est pas possible de séparer les deux trajets et leur superposition se manifeste par une modulation d'amplitude qui peut aller jusqu'à l'annulation du signal si la variation totale de l'écart de temps dépasse une période de la fréquence centrale utilisée. Ceci provoque une dégradation du rapport signal sur bruit qui se traduit par une augmentation notable du taux d'erreur.

Essayons de chiffrer cette augmentation.

Nous supposons que les fréquences des fluctuations sont très faibles devant la cadence de transmission, ce qui est le cas général car elles dépassent rarement le Hertz.

Nous assimilons la fonction de répartition des amplitudes crêtes à celle d'une sinusoïde redressée ; dans ces conditions la densité de probabilité des amplitudes est de la forme

$$\frac{2}{\pi} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{A_{\max}}\right)^2}}$$

Si $P(x)$ est le taux d'erreur pour un rapport R égal à

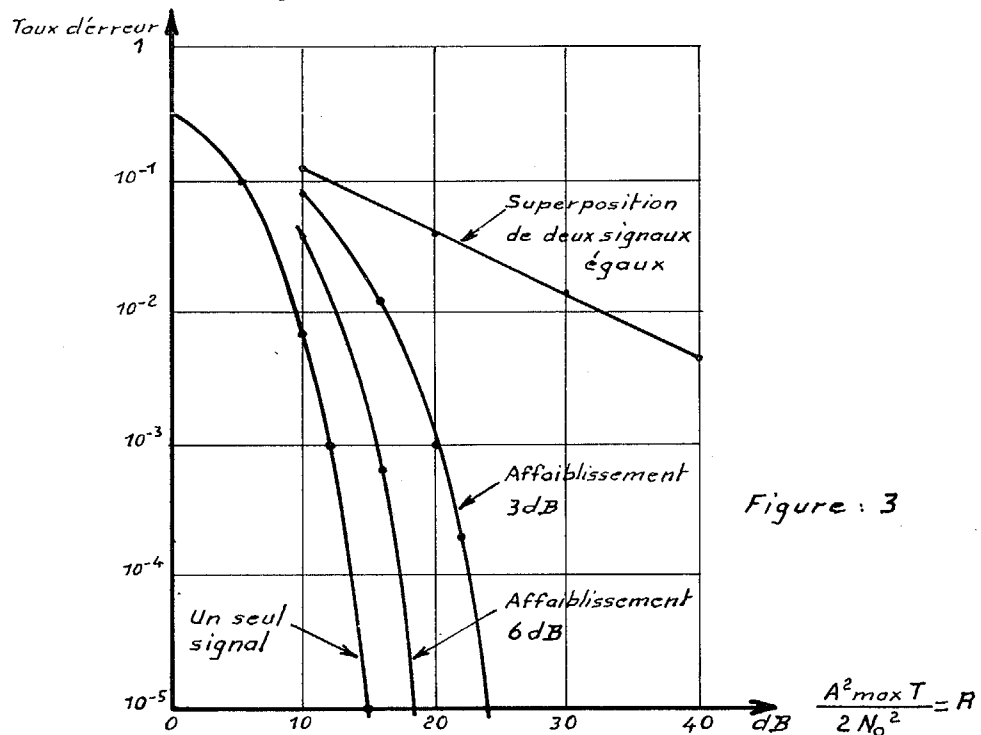
$\frac{x^2}{2 N_0}$, le taux d'erreur moyen est :

$$P(R_{\max}) = \int_0^{A_{\max}} \frac{2}{\pi} \frac{P(x)}{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{A_{\max}}\right)^2}} dx \quad R_{\max} = \frac{A_{\max}^2}{2 N_0}$$



TRANSMISSION D'INFORMATION PAR VOIE ACOUSTIQUE

Nous obtenons dans le cas de la modulation FSK déjà traitée la courbe représentée sur la figure 3. La détérioration est extrêmement importante et même pour un rapport signal sur bruit de 20 dB le taux d'erreur reste prohibitif.



Remarquons que l'utilisation d'une modulation M^{aire} n'est pas susceptible d'améliorer cette situation dans la mesure où le bruit parasite a un niveau spectral indépendant de M, car la décroissance du taux d'erreur avec le paramètre R est trop faible. Par contre, le moindre affaiblissement sur le trajet parasite améliore rapidement la situation. Nous avons tracé sur la figure 3 la variation du taux d'erreur en fonction de R pour un affaiblissement de 3 et 6 dB en assimilant la fonction de répartition des amplitudes crête à une sinusoïde superposée à une composante continue.



TRANSMISSION D'INFORMATION PAR VOIE ACOUSTIQUE

6.- CONCLUSIONS

La transmission d'information sous-marine semble donc offrir de larges perspectives. Cependant, de grandes précautions doivent être prises pour éviter d'être gravement perturbé par les trajets multiples. Il ne semble pas qu'il y ait de solution générale au problème et la complexité de la solution adoptée dépendra de la géométrie du système.



TRANSMISSION D'INFORMATION PAR VOIE ACOUSTIQUE

- (1) Etude du canal de transmission acoustique sous-marine
M. GRANDVAUX - 3ème Colloque GRETSI.

- (2) Transmission Rate limits in underwater acoustic telemetry.
R.O. Rowlands and F.G. Quinn.
Underwater acoustics (volume 2). Edité par V.M. Albers.
Plenum Press N.Y. 1967.

- (3) The theory of optimum noise immunity.
V.A. Kotel'nikov.
Mc Graw Hill Book Company, Inc. 1959.