

HUITIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

947



NICE du 1^{er} au 5 JUIN 1981

* SIMULATION DES IMAGES DU FOND MARIN OBTENUES PAR UN SONAR DETECTEUR OU
CLASSIFICATEUR D'OBJETS

SIMULATION OF SEA BOTTOM IMAGES PRODUCED BY A HIGH RESOLUTION DETECTOR
OR CLASSIFIER SONAR

BILLON Didier - JOSEPH Jacques - LE GALL Jean

THOMSON-CSF, Division A.S.M. 29283 - BREST CEDEX
(France)

THOMSON-CSF, A.S.M. Division, 29283 - BREST CEDEX
(France)

RESUME

La recherche par sonar des objets posés sur le fond marin s'effectue généralement en deux étapes : détection grâce à un sonar ayant une portée relativement grande mais une résolution moyenne (dimensions de l'objet inférieures ou égales à celles de la cellule d'analyse), puis classification par un sonar de portée plus faible mais à haute définition.

La simulation des images obtenues par ces deux types de sonars répond à deux objectifs importants : développement des simulateurs d'entraînement, aide à l'optimisation des chaînes de traitement sonar.

L'image produite par un sonar détecteur peut être modélisée sous la forme d'un signal aléatoire bidimensionnel. A l'issue d'une étude statistique effectuée sur des signaux enregistrés, on a choisi de caractériser la réverbération de fond par une loi de probabilité de WEIBULL.

Le modèle statistique choisi pour les images "classificateur" est plus simple (loi de RAYLEIGH), car le réalisme de l'image est essentiellement lié à la simulation d'effets déterministes : simulation du relief du fond (rides), calcul des ombres portées, filtrage par le lobe de directivité.

On se limite ici à la simulation d'images fixes mais le modèle s'applique à la simulation de séquences d'images.

Le réalisme du modèle est mis en évidence par la présentation d'images réelles et d'images simulées par ordinateur.

*

Etude financée par la Direction des Recherches, Etudes et Techniques, Paris (France) et le Groupe d'Etudes Sous-Marines de l'Atlantique, Brest (France)

SUMMARY

The search by sonar for objects lying on the sea bottom is generally performed in two steps : first, detection at a rather long distance by a sonar which resolution cell is larger than or equal to the object, then classification at a shorter distance by a very high resolution sonar.

Simulation of images obtained by these two types of sonars has two main goals : development of training simulators and aid to optimization of sonar processing units.

Images produced by a detector sonar can be modeled as two dimensional random signals. Statistical analysis of true recorded signals has led to the conclusion that bottom reverberation is best characterized by a WEIBULL probability distribution.

The statistical model chosen to describe "classifier" images is simpler (Rayleigh distribution), because the realism of images depends mainly on simulation of deterministic effects : simulation of bottom profile (sand ripples, ...), calculation of the shape of shadows, blurring by the directivity pattern.

Only simulation of fixed images is covered in this paper, but the model can be applied to simulation of sequences of pictures. Examples of true and computer simulated pictures are presented, showing the efficiency of the model.



SIMULATION DES IMAGES DU FOND MARIN OBTENUES PAR UN SONAR DETECTEUR OU
CLASSIFICATEUR D'OBJETS

1 - INTRODUCTION

La simulation des images du fond marin obtenues par un sonar détecteur ou classificateur d'objets a deux buts :

- présentation d'images comparables à la réalité, pour entraîner les opérateurs à la détection et à la classification des objets.

- aide à la mise au point d'algorithmes de traitement du signal ou de traitement d'images sonar, et aide à l'optimisation des paramètres des sonars.

On se limite dans cette présentation à la simulation d'images fixes. Néanmoins le modèle développé s'applique à la simulation de séquences d'images.

2 - GENERALITES

L'image fournie par un sonar détecteur ou classificateur d'objets est la résultante de trois composantes : la réverbération du fond marin, les échos d'objets divers, les bruits d'origine électronique ou acoustique.

La réverbération de fond est un signal aléatoire qui est la réponse au signal émis, de la multitude des microcibles tapissant le fond marin. Les échos d'objets se rajoutent à la réverbération pour caractériser le fond observé. Des ombres peuvent apparaître quand l'objet est de dimension supérieure à la cellule d'analyse (c'est surtout le cas sur l'image d'un classificateur, dont la résolution est plus grande). Enfin les bruits se superposent à l'image du fond formée par la réverbération et les objets.

Dans le sonar (fig.1) on forme alors des voies à partir des signaux reçus sur les colonnes acoustiques. Le signal de chacune des voies est détecté et intégré, puis échantillonné. On obtient ensuite, par multiplexage des voies, le signal vidéo, que l'on amplifie. L'image est visualisée sur un tube cathodique.

Un contrôle automatique de gain (CAG) régule la puissance moyenne du signal en sortie de formation de voies.

Dans l'exemple choisi pour illustrer l'exposé, l'image "détecteur" comprend 20 voies réparties sur un secteur de 30°. La portée est de quelques centaines de mètres. Etant donné la résolution moyenne du détecteur, le relief du fond et la forme des objets n'apparaissent généralement pas sur l'image qui peut donc être modélisée sous la forme d'un signal aléatoire bidimensionnel.

L'image "classificateur" est constituée d'un nombre plus élevé de voies (80), couvrant un secteur de 10°. La résolution est nettement meilleure et la simulation d'effets déterministes (rides du fond, ombres ...) est nécessaire pour le réalisme de l'image.

Dans la simulation, on modélise d'abord la réverbération puis on introduit les échos et les bruits en fonction de leur contraste par rapport à la réverbération.

Ainsi le contraste Echo/Réverbération est :

$$C_{E/R} = T - (R_F + 10 \log A)$$

où T est l'index de réflexion de l'objet, R_F l'index de réverbération du fond et A l'aire de la cellule d'analyse du sonar.

Il existe deux approches pour la simulation du fond :

- génération directe de l'image en sortie de la chaîne sonar sous la forme d'un signal aléatoire bidimensionnel dont les propriétés statistiques dépendent du fond et des cotes du sonar.

- représentation du fond par une carte de coefficients de réflexion caractérisant à la fois les microcibles qui engendrent la réverbération et les objets plus étendus ; puis application du traitement sonar [1], [2], [3], [4], [5].

On a utilisé la première approche pour simuler l'image obtenue par un sonar détecteur pour laquelle il n'est pas nécessaire d'avoir une cartographie précise du fond.

Par contre, la deuxième approche, qui permet de simuler les effets déterministes liés au fond marin et aux objets (notamment les ombres), a été utilisée pour la simulation de l'image du classificateur.

3 - SONAR DETECTEUR

3.1. Modélisation

Pour simuler directement l'image en sortie de la chaîne sonar, il a été nécessaire de déterminer les propriétés statistiques du signal après détection-intégration. Ceci a été réalisé à partir de signaux de voies issus du sonar détecteur, que l'on a numérisés puis traités, avec calcul des moyennes, variances, histogrammes, spectres et corrélations.

Diverses lois de probabilité ont été testées sur les données grâce au test de "goodness of fit du χ^2 " : loi de Rayleigh, loi de Rice, loi Gamma, loi log normale, loi de Weibull. La loi de Weibull a donné les meilleurs résultats et on l'a adoptée comme modèle.

La densité de probabilité de la loi de Weibull (fig.2) est donnée par la formule

$$p(x) = \left(\frac{x}{q}\right)^{p-1} \left(\frac{p}{q}\right) \exp\left[-\left(\frac{x}{q}\right)^p\right], \quad x \geq 0$$

p et q sont les deux paramètres de la loi. On remarque que la loi exponentielle (p = 1) et la loi de Rayleigh (p = 2) sont deux cas particuliers de la loi de Weibull.

La moyenne et la variance de la loi sont données par :

$$m = q \cdot \Gamma(1 + 1/p)$$

$$\sigma^2 = q^2 \left[\Gamma(1 + 2/p) - \Gamma^2(1 + 1/p) \right]$$

où $\Gamma(\cdot)$ est la fonction Gamma.

On s'est intéressé à la loi de Weibull pour $1 \leq p \leq 3$.

Le paramètre p dépend du fond observé, les fonds les plus accidentés étant représentés par p voisin de 1.

On note en effet que le rapport m/σ croît avec p pour $p \geq 1$, ceci signifiant en particulier qu'à moyenne constante, l'écart type est plus élevé quand p diminue.

L'étude statistique des données réelles a permis de montrer que, du moins dans le cas particulier étudié, la corrélation intervoies est négligeable et que la corrélation dans le sens de chacune des voies est apportée essentiellement par le sonar (longueur de l'impulsion émise, durée d'intégration) ; l'influence du fond marin est négligeable.

La réverbération de fond en sortie de détection-intégration sera donc modélisée sous la forme d'un signal aléatoire bidimensionnel obéissant à une loi de Weibull corrélée dans le sens de la distance et décorrélée de voie à voie.

3.2. Simulation de l'image détecteur

3.2.1. Simulation de la réverbération

Il s'agit de simuler pour chacune des voies une succession de points weibulliens corrélés.

On montre [6] qu'une variable weibullienne Z_i peut s'exprimer à l'aide de deux variables gaussiennes indépendantes X_i et Y_i , à moyenne nulle et variance σ^2 , sous la forme :

$$Z_i = (X_i^2 + Y_i^2)^{1/p}$$

La valeur moyenne $E[Z_i]$ et la variance $D^2[Z_i]$ de la variable Z_i sont :

$$E[Z_i] = (2\sigma^2)^{1/p} \Gamma(1 + 1/p)$$

$$D^2[Z_i] = (2\sigma^2)^{2/p} \left[\Gamma(1 + 2/p) - \Gamma^2(1 + 1/p) \right]$$

Pour représenter la suite weibullienne $\{Z_i\}$, représentant le signal d'une voie, on utilise deux suites gaussiennes blanches $\{X_{bi}\}$ et $\{Y_{bi}\}$ indépendantes entre elles que l'on filtre pour obtenir deux suites gaussiennes corrélées $\{X_i\}$ et $\{Y_i\}$. On calcule alors $z_i = (X_i^2 + Y_i^2)^{1/p}$.

Si $s(\tau)$ et $r(\tau)$ sont respectivement les fonctions d'auto-corrélation des suites weibulliennes $\{Z_i\}$ et gaussiennes $\{X_i\}$, $\{Y_i\}$, on montre [6] que, pour $1 \leq p \leq 3$, on a $s(\tau) \approx r^2(\tau)$. Ainsi, le filtre à appliquer sur $\{X_{bi}\}$ et $\{Y_{bi}\}$ pour obtenir les suites gaussiennes corrélées $\{X_i\}$ et $\{Y_i\}$ est constitué de deux filtres en série : le premier a une réponse impulsionnelle égale à l'enveloppe de l'impulsion émise, le second est un filtre passe-bas du premier ordre de constante de temps double de celle de l'intégration réalisée dans le sonar.

3.2.2. Simulation des échos

Un écho est déterminé sur l'image par sa position (nv_e, i_e) , (nv_e numéro de voie, i_e position sur la voie) et son amplitude a_e , normalisée par rapport à la valeur moyenne de la réverbération.

On fait alors la somme pondérée des nombres gaussiens, représentant la réverbération, et de l'amplitude de l'écho a_e . On obtient ainsi :

$$\begin{cases} X_b(nv_e, i_e) = \alpha X_b(nv_e, i_e) + a_e \\ Y_b(nv_e, i_e) = \alpha Y_b(nv_e, i_e) + a_e \end{cases}$$

La pondération permet de tenir compte de l'éten- due de l'écho par rapport à la cellule d'analyse du sonar. Si $\alpha = 0$ l'objet recouvre toute la cellule d'analyse.

La corrélation est appliquée sur les suites gaussiennes ainsi modifiées.

Les échos sont, soit déterministes, donc positionnés par l'opérateur, soit aléatoires, intervenant alors en tant que perturbations locales de la réverbération weibullienne.

La méthode décrite ci-dessus permet de simuler des échos fluctuants, dont une composante est fixe (a_e) et l'autre aléatoire (X_b, Y_b).

3.2.3. Simulation des bruits

On distingue les bruits électroniques et les bruits acoustiques (bruits de mer et bruits propres au bateau). Néanmoins, on admet que l'ensemble de ces bruits donne naissance à un bruit de Rayleigh, après détection-intégration, dont l'écart type dépend de l'environnement. On suppose également que la corrélation est apportée uniquement par l'intégration.

On rajoute ainsi le bruit au signal weibullien de réverbération après détection-intégration. L'importance du bruit dépend bien entendu du contraste réverbération/bruit. Ainsi à distance élevée, la réverbération est noyée dans le bruit, alors qu'à courte distance, le bruit est négligeable.

3.2.4. Simulation de l'image

L'image détecteur présentée sur le tube a un nombre limité de lignes (1024). Or le signal vidéo comprend un nombre de lignes beaucoup plus élevé, proportionnel à la portée. Dans le sonar, il est donc nécessaire de présenter sur la même ligne de l'écran plusieurs lignes du signal vidéo.

Tout se passe comme si, au niveau de l'écran, on réalisait la sommation de plusieurs lignes.

Dans la simulation, cette sommation est effectuée par programme.

On présente ci-après, (fig.4 et 5) deux images "détecteur" simulées. Les images ne sont pas bruitées. Elles ont été visualisées sur papier photographique à l'aide d'un enregistreur à laser SORO, couplé au calculateur.

- Figure 4 - réverbération weibullienne ($p = 1,2$) avec des échos

- Figure 5 - réverbération weibullienne ($p = 2$; loi de RAYLEIGH) avec des échos

La moyenne du signal vidéo est la même sur les deux images, les échos ont le même index. On a moyenné 12 lignes vidéo successives avant visualisation.

On note le nombre nettement plus élevé de points brillants sur l'image $p = 1,2$, qui peuvent rendre la détection des échos plus délicate.

On présente également une image "détecteur" réelle (fig.3).



SIMULATION DES IMAGES DU FOND MARIN OBTENUES PAR UN SONAR DETECTEUR OU CLASSIFICATEUR D'OBJETS

4 - SONAR CLASSIFICATEUR

4.1. Présentation du modèle

La résolution d'un sonar classificateur est telle qu'il est possible de reconnaître certains objets caractéristiques (épaves, ancras, bidons, chaînes, rides, rochers ...) essentiellement grâce à la forme de l'ombre qu'ils portent sur le fond de la mer.

C'est donc l'aspect déterministe (simulation de la forme des ombres et des échos), qui est fondamental dans la simulation d'une image "classificateur". La simulation comporte deux phases :

- génération d'une image source
- traitement sonar de l'image source

L'image source est une image acoustique du fond tel qu'il serait vu par un sonar de résolution très supérieure à celle du sonar à simuler. Le traitement qui lui est appliqué simule la chaîne sonar sous la forme d'une convolution de l'image source par le lobe de l'antenne et par l'enveloppe de l'impulsion émise. Dans la perspective d'une simulation en temps réel, il est nécessaire de simplifier ce traitement : étant donné que, dans la plupart des cas, la résolution en distance est meilleure que la résolution en gisement, il est possible de supprimer la convolution par l'enveloppe de l'impulsion tout en conservant un degré de réalisme suffisant.

4.2. L'image source

4.2.1. Structure générale

Elle se compose de M lignes de N points, chacun des M x N points représentant un point du fond :

$$(\rho_i, \theta_j) \quad 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$$

repéré en coordonnées polaires par rapport au centre de l'antenne de réception. Dans l'exemple choisi M = 1000 et N = 400 ; la distance ρ est comprise entre 50 m et 200 m, et le gisement θ varie dans un secteur de 10°. Le pas d'échantillonnage en distance est égal à la résolution du sonar, soit 15 cm.

Le relief du fond et des objets qui s'y trouvent est modélisé par une surface d'équation $z = f(x, y)$. Il faut donc associer, en fonction de la hauteur d'eau et de la position de l'antenne, à chaque point (ρ_i, θ_j) de l'image un point (x, y, z) de cette surface.

4.2.2. Calcul d'ombre

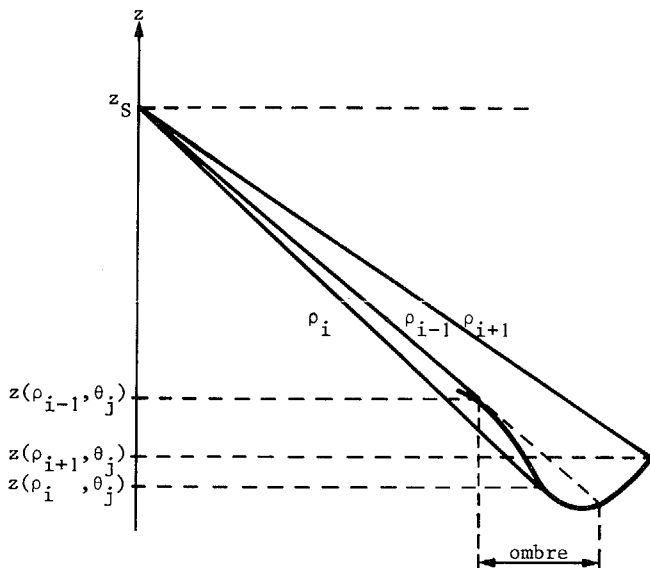
L'image est générée ligne par ligne dans le sens des ρ croissants. La i ème ligne est composée des N points à la distance ρ_i et de gisements θ_j , $1 \leq j \leq N$.

L'ombre d'un point (ρ_{i0}, θ_j) ne peut recouvrir que les points (ρ_i, θ_j) tels que $\rho_i > \rho_{i0}$.

On mémorise donc, pour chacun des N gisements θ_j , le sinus s_j de l'angle de site sous lequel est vu le dernier point de gisement θ_j qui n'est pas dans l'ombre. Ainsi, après avoir fait le calcul d'ombre sur les $i-1$ premières lignes, on a en mémoire les N valeurs :

$$s_j = \min_{k \leq i-1} \frac{z_s - z(\rho_k, \theta_j)}{\rho_k}, \quad 1 \leq j \leq N$$

où z_s est la hauteur de la source au dessus du niveau moyen du fond (figure ci-dessous)



Alors si : $s_j \leq \frac{z_s - z(\rho_i, \theta_j)}{\rho_i}$

le point (ρ_i, θ_j) est dans l'ombre et la valeur de s_j reste inchangée. Sinon le point n'est pas dans l'ombre et il faut modifier s_j :

$$s_j = \frac{z_s - z(\rho_i, \theta_j)}{\rho_i}$$

Dans les deux cas, on a finalement :

$$s_j = \min_{k \leq i} \frac{z_s - z(\rho_k, \theta_j)}{\rho_k}$$

qui sera la valeur utilisée pour faire le calcul d'ombre sur le point θ_j de la ligne $i + 1$.

4.2.3. Coefficient de réverbération

Chaque point de l'image source a un coefficient de réverbération complexe $X + iY$ dont le module et l'argument représentent la phase et l'amplitude du signal provenant de ce point.

Pour les points de l'ombre, on a $X = Y = 0$. Les autres points sont répartis en deux catégories :

- les points appartenant à la réverbération du fond, pour lesquels X et Y sont modélisés par des variables aléatoires gaussiennes centrées, indépendantes. Alors $X + iY = Re^{i\varphi}$, où R suit une loi de Rayleigh et φ est équirépartie sur $[0, 2\pi]$. Deux points de réverbération distincts sont considérés comme indépendants.
- les points appartenant à l'écho d'un objet, pour lesquels X et Y sont des constantes telles que :

$$10 \log (X^2 + Y^2) = C + 20 \log \bar{R}$$

où C est le contraste écho sur réverbération pour l'objet considéré et \bar{R} la valeur moyenne de R.



SIMULATION DES IMAGES DU FOND MARIN OBTENUES PAR UN SONAR DETECTEUR OU
CLASSIFICATEUR D'OBJETS

4.3. Le traitement

La chaîne de traitement appliquée à l'image source est représentée par la figure 6. L'image subit d'abord un filtrage monodimensionnel, ligne par ligne, qui correspond à l'action de l'antenne de réception : vis à vis des fréquences spatiales, celle-ci agit comme un filtre passe-bas dont la réponse impulsionnelle est le lobe de l'antenne. Il s'agit ici d'un lobe de Tchébycheff dont l'ouverture à 3 dB est de $0,17^\circ$ et dont les secondaires sont à -30 dB. On procède ensuite à un sous-échantillonnage M points $\rightarrow N_V$ points qui correspond à la formation des N_V voies du sonar à simuler. Dans l'exemple traité $N_V = 80$. Ce sous-échantillonnage est compatible avec le théorème de Shannon si la fréquence spatiale d'échantillonnage est supérieure au double de la fréquence spatiale de coupure de l'antenne, c'est à dire si, très grossièrement, l'intervalle entre voies est inférieur à la largeur à 3 dB du lobe de directivité. Enfin, la visualisation est précisée, de même que dans les sonars réels, par une interpolation entre voies qui supprime les résidus d'échantillonnage.

4.4. Exemples

Les images présentées ont été visualisées sur papier photographique grâce à un enregistreur à laser SORO.

4.4.1. Image n°1 (fig. 7)

Le bas de l'image représente les points à 50 m de l'antenne, le haut ceux à 200 m. A gauche, les objets sont des cylindres de longueur 2 m et de diamètre 0,50 m, dont l'axe fait un angle de 30° avec l'axe de l'image. A droite, les objets sont de forme sphérique avec un diamètre de 1 m. Le fond est plat.

4.4.2. Image n°2 (fig. 8)

C'est un agrandissement de l'image n°1 ne représentant qu'une zone de 25 m centrée autour de la distance 120 m, l'échelle en gisement n'étant pas modifiée.

A titre de comparaison on montre une image réelle obtenue avec un sonar ayant des caractéristiques comparables (fig. 9).

5 - CONCLUSION

Les principes de simulation exposés ici permettent de synthétiser par calcul des images sonar dont le degré de réalisme est suffisant, non seulement pour entraîner des opérateurs à la détection et à la classification d'objets, mais aussi pour aider à la mise au point d'algorithmes de traitement du signal et d'images.

Ce modèle peut aisément être étendu à la simulation de séquences d'images. Dans le cas particulier du sonar détecteur, une étude a montré que la réverbération est décorrélée d'une image à la suivante ; de plus le modèle de génération des échos exposé au § 3.2.2. permet de simuler des échos fluctuants.

REFERENCES

- [1] P. FAURE "Theoretical model of reverberation noise" JASA Vol. 36, n°2 pp 259 - 266 - February 1964
- [2] D. MIDDLETON "A statistical theory of reverberation and similar first order scattered fields" IEEE Transactions on Information Theory.
 - "Part I : Waveforms and the general process" Vol. IT-13, n°3, July 1967, p 372.
 - "Part II : Moments, spectra and special distributions" Vol. IT-13, n°3, July 1967, p 393.
 - "Part III : Waveforms and fields" Vol. IT-18, n°1, January 1972, p 35.
 - "Part IV : Statistical models" Vol. IT-18, n°1, January 1972, p 68.
- [3] V.V. OL'SHEVSKII "Characteristics of sea reverberation" Acoustics Institute - Academy of Sciences of the USSR MOSCOW
- [4] W.J. JOBST and T.I. SMITS "Mathematical model for volume reverberation : experiment and simulation" JASA Vol. 55, n°2, February 1974, pp 227 - 236.
- [5] D.L. FOLDS and N.F. ANDERSON "High resolution Sonar Simulation Technique" NCSL - TR 322-77 (AD A045043)-Naval Coastal Systems Laboratory September 1977.
- [6] W.J. SZAJNOWSKI "The generation of correlated Weibull clutter for signal detection problems" IEEE Transactions on AES Vol. AES-13 n°5, September 1977, pp 536 - 540.



SIMULATION DES IMAGES DU FOND MARIN OBTENUES PAR UN SONAR DETECTEUR OU CLASSIFICATEUR D'OBJETS

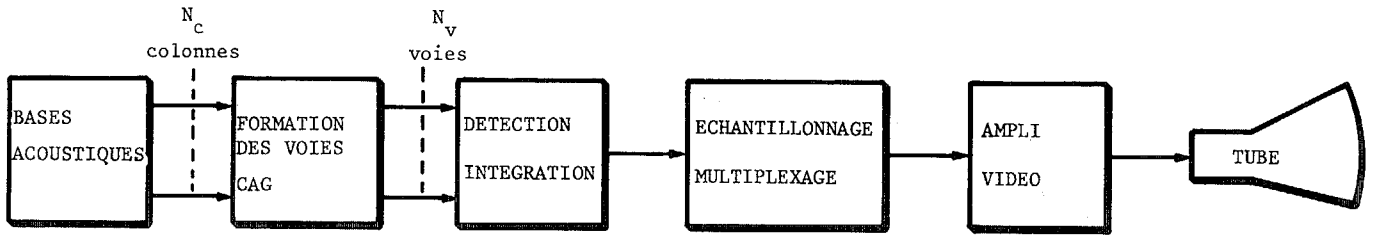


Fig. 1 - Chaîne de réception simplifiée d'un sonar détecteur ou classificateur

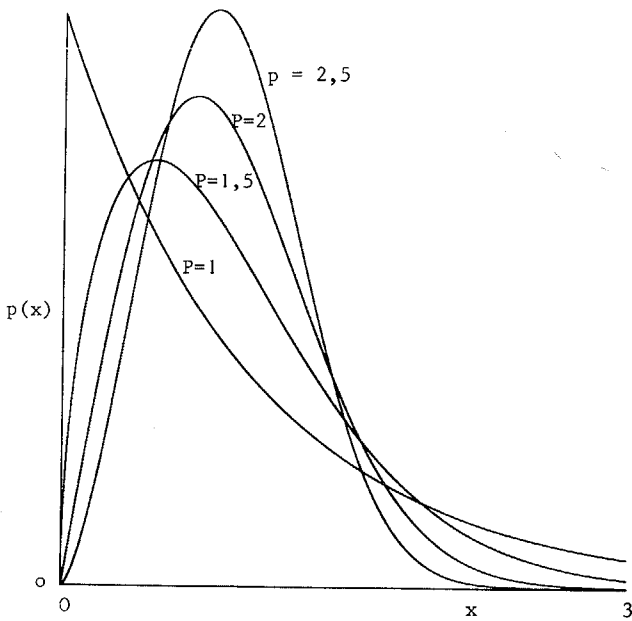


Fig. 2 - Loi de Weibull $p(x) = \left(\frac{x}{q}\right)^{p-1} \left(\frac{p}{q}\right) \exp. \left[-\left(\frac{x}{q}\right)^p\right]$ pour $q = 1$ et $p = 1, 1.5, 2, 2.5$

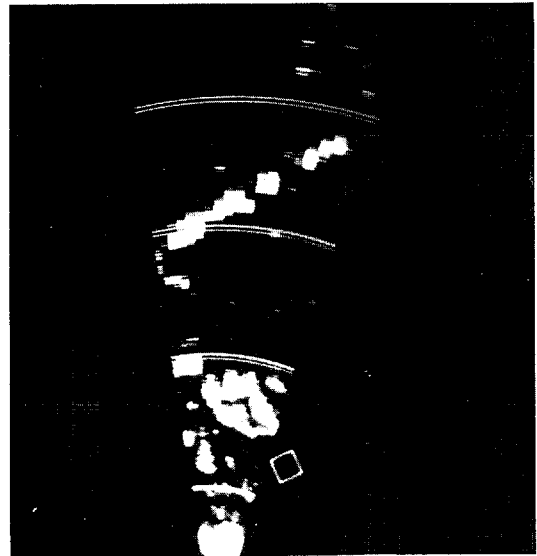


Fig. 3 - Image détecteur réelle

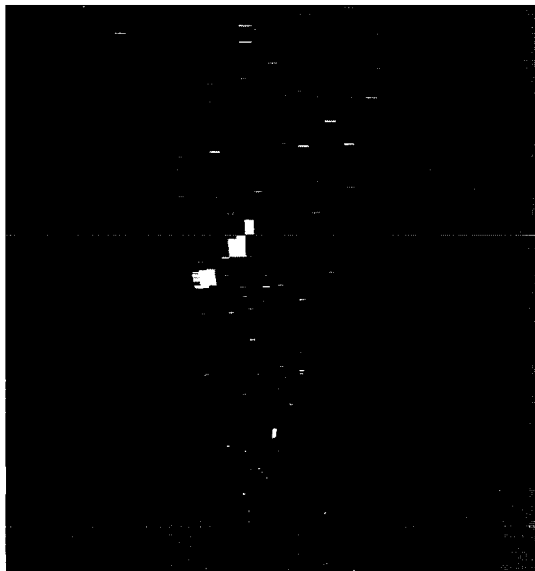


Fig. 4 - Image "détecteur" simulée
Loi de Weibull $p = 1,2$ - moyenne sur 12 lignes

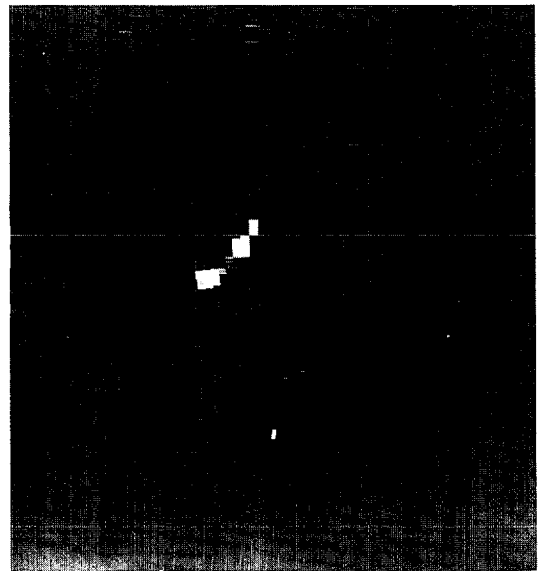


Fig. 5 - Image "détecteur" simulée
Loi de Weibull $p = 2$ - moyenne sur 12 lignes



SIMULATION DES IMAGES DU FOND MARIN OBTENUES PAR UN SONAR DETECTEUR OU CLASSIFICATEUR D'OBJETS

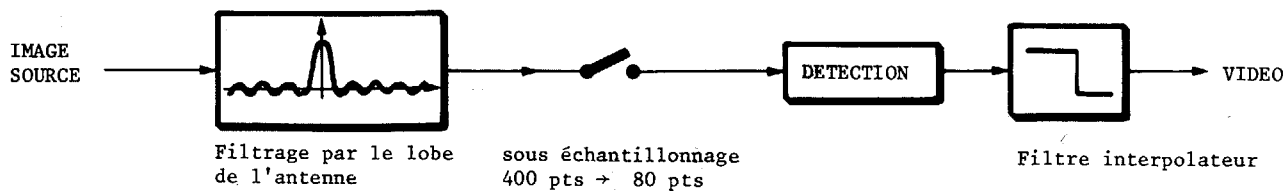


Fig. 6 - Chaîne de simulation

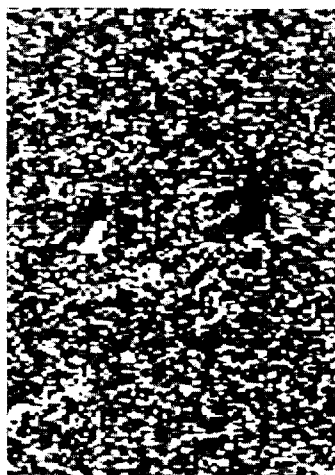


Fig. 8 - Agrandissement de l'image synthétique

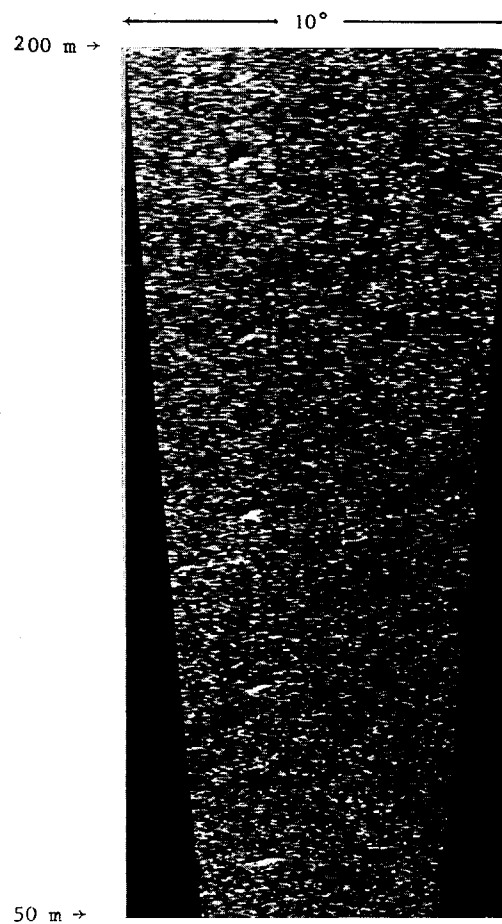


Fig. 7 - Image sonar synthétique



Fig. 9 - Agrandissement d'une image réelle

