RADAR DISCRET POUR SOUS-MARINS

marché CTSN n° A 99 77 065 00 470 75 53

Annexe au CR d'activité numéro 4
Dépouillement des enregistrements BHR de fouillis de mer

	NUMERO DOCUMENT/DOCUMENT NUMBER	FORMAT/SIZE	PAGE
THALES	TNF/BRS/139/01	A4	1/42
F8224	Date: 15/04/2002		- REV

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

RADAR DISCRET POUR SOUS-MARINS

MARCHÉ CTSN N° A 99 77 065 00 470 75 53

ANNEXE AU COMPTE-RENDU D'AVANCEMENT N°4

Ce document est classifié DIFFUSION RESTREINTE et comporte 91 pages numérotées de 1 à 91.

Les destinataires de ce document sont:

1ère diffusion:	M. Bambouvert	DGA/SPN	1 exemplaire
	M. Martinet	DGA/CTSN/SESDA	1 exemplaire
	M. Saulais	TNF/BRS	1 exemplaire
	M. Chautard	TNF/BRS	1 exemplaire
	M. Campana	TAD/RD/RDTC	1 exemplaire
	Bibliothèque TNF	TNF/BRS	1 disquette
	Bibliothèque TNF	TNF/BRS	l' original

Total 5 ex. + 1 disquette + l'original

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

APPROBATIONS

Ind/Date	-/	A/	B/	C/	D/
Etabli par	Date :	Date :	Date :	Date :	Date :
Vérifié par	Date :	Date :	Date :	Date :	Date :
Approuvé par Chef de service	Date :	Date :	Date :	Date :	Date :
Etabli par	A. CHAUTARD TNF/BRS Date :	Date :	Date :	Date :	Date :
Vérifié par	P. SAULAIS TNF/BRS Date :	Date :	Date :	Date :	Date :
Approuvé par Chef de service	F LACOSTE TNF/BRS Date :	Date :	Date :	Date :	Date :

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

EVOLUTIONS

REVISION INDEX	DESCRIPTION DES EVOLUTIONS/DESCRIPTION OF CHANGE
- Date :	Edition initiale
A Date :	
B Date :	
C Date :	
D Date :	

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION 7

2. RÉFÉRENCES 7

3. DÉMARCHE 8

4. CHOIX D'UN MODÈLE DE FOUILLIS 9

4.1 Définition des critères de choix 9
4.1.1 Besoin de l'étude 9
4.1.2 Critères de choix 10
4.2 Définition des principales classes de modèles 12
4.3 Résultat de l'analyse multi critères 12

5. MODÈLE PHYSIQUE DE LA SURFACE DE LA MER 14

5.1 Densité spectrale d'énergie des vagues de gravité: 15
5.2 Densité spectrale d'énergie des vagues de capillarité 16
5.3 La hauteur de la houle: 17
5.4 L'état de surface de la mer: 17

6. MODÈLE DE RÉTRODIFFUSION 19

6.1 Critère de Rayleigh 19
6.2 Diffraction de Bragg 22
6.3 Phénomènes de diffraction ou rétrodiffusion diffuse 22
6.4 Phénomènes de réflexion spéculaire 24
6.5 Phénomène de "spikes" 31
6.5.1 Introduction 31
6.5.2 Dispositif expérimental et analogie avec le radar pour sous marin 32
6.5.3 Analyse qualitative 32
6.5.4 Analyse quantitative 35
6.5.5 Modèle retenu pour la composante spéculaire du fouillis de mer 36

7. COMPTE RENDU DES ESSAIS SURICATE DE BREST 38

7.1 Analyse spatio temporelle du signal 38
7.2 Analyse statistique du signal 39

8. DÉPOUILLEMENT DES ESSAIS BHR DE TOULON 41

8.1 Choix des fichiers à dépouiller 41
8.2 Démarche d'analyse 42
8.2.1 Suppression de la composante continue. 42
8.2.2 Visualisation du signal radar et suppression des échos parasites 44
8.2.3 Analyse statistique 45

9. SYNTHÈSE ET CONCLUSION 49

9.1 Paramètre d'échelle des fluctuations 49
9.2 Loi de fluctuation 49
9.3 Modèle de fouillis retenu 50
9.3.1 Exposé du modèle 50
9.3.2 Modélisation d'un processus de Lévy. 52

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

9.3.3 Statistique des coefficients de rétrodiffusion 52
9.3.4 Influence de la distance de corrélation (longueur d'onde de la houle) 53
9.3.5 Fonction d'appareil du Radar 53
9.3.6 Corrélation temporelle 53
Synoptique global 54

10. ANNEXE 1: DÉPOUILLEMENT DES FICHIERS 2208F1R6 55

11. ANNEXE 2: DÉPOUILLEMENT DES FICHIERS 2208F5R1 62

12. ANNEXE 3: DÉPOUILLEMENT DES FICHIERS 2208AFR1 68

13. ANNEXE 4: DÉPOUILLEMENT DES FICHIERS 2308F1R01 73

14. ANNEXE 5: DÉPOUILLEMENT DES FICHIERS 2308F4R01 80

15. ANNEXE 6: ELÉMENTS MATHÉMATIQUES SUR LES LOIS DE LÉVY 87

15.1 Généralités 87
15.2 Comportement asymptotique des lois de Lévy 87
15.3 Simulation de bruits de Lévy 88
15.3.1 Simulation d'une mer force 1: D=1,95 89
15.3.2 Simulation d'une mer force 3: D=1,8 89

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

1. Introduction

Ce document s'inscrit dans le cadre de l'étude Radar Discret pour Sous Marin.

Il a pour objet de lever les points durs évoqués au début de l'étude sur les niveaux de bruit en entrée du récepteur. En effet, en propagation très basse altitude, les échos de fouillis seront de niveau élevé, provoquant des remontées du bruit de phase, susceptibles de gêner la détection.

Afin de spécifier ces niveaux de bruit, une campagne de mesures a été effectuée. Le but de notre document est de:

- proposer un modèle pertinent au vu de l'application RDSM (incidence faible, propagation basse altitude, distance proche) et justifier le choix.
- décrire le modèle retenu.
- confronter les mesures au modèle retenu
- généraliser les résultats obtenus aux concepts d'emploi les plus larges possibles.

2. Références

[1]Radar principles Nadav Levanon.

[2]Radar propagation at low altitudes M L Meeks

[3]Radar 97 Conférences

[4]Probability, random variables and Stochastic processes Papoulis

[5]Experimental scatterer characterization: the importance and nature of compact scatterers in LGA imaging of the ocean, emphazing microbreakers.

Jorn Fuchs University of california – Santa barbara

[6] HRR Analysis of sea clutter: dépouillement de saisies radar

[7] Modélisation IR de la mer – Documentation TCO

[8] Chaotic Dynamics of sea clutter. Simon Haykin

[9] Cours SAE: Analyse et reconnaissance de signature

[10] Radar reflectivity of land and sea. Maurice W Long

[11] Les objets fractals. B Mendelbrot

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

[12] Applied Non Gaussian Processes Mircea Grigoriu.

[13] Scattering and propagation above any random rough surface at near grazing angles

A Khenchaf IRESTE, Université de Nantes

3. Démarche

Notre démarche est double:

- Dans un premier temps, il s'agit de capitaliser l'expérience relative à la compréhension du phénomène complexe qu'est la rétrodiffusion des ondes radar par la mer et de choisir une modélisation adéquate au besoin de l'étude.
- Dans un deuxième temps, il s'agit de décrire le modèle retenu et de le confronter aux expérimentations récentes.

A partir d'éléments issus de la littérature sur le sujet, nous allons constituer une liste des différents types de modèles utilisés (physique, empirique, texture, modèles usuels de nos spécifications).

Par ailleurs, l'analyse du besoin de l'étude va conduire à définir des critères de choix de modèles. Une analyse multi critères va permettre de définir une classe de modèles préférentielle: les modèles physiques ou comportementaux.

Le modèle physique est caractérisé par les mécanismes physiques mis en jeu. Un modèle géométrique de la mer et une analyse qualitative de la nature physique des échos (réflexion, diffraction) permettront de déterminer les composantes du modèle:

- une composante moyenne liée à la diffraction des ondes radar sur les vagues de capillarité, donc à l'incidence et au niveau de rugosité de la mer.
- une composante fluctuante liée à la formation des vagues de gravité de la houle (modèle de facettes de mer) et à la diffraction des ondes radar sur les crêtes de vagues (spikes).

Cette modélisation permettra de réaliser un modèle qualitatif, dépendant d'un nombre limité de paramètres significatifs, ces paramètres ayant tous une signification physique:

- Etat de la mer: longueur d'onde et hauteur de la mer, vitesse du vent
- Configuration géométrique du problème: incidence de l'onde radar

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

- Propriétés électromagnétiques de l'onde incidente: longueur d'onde, polarisation.

Afin de donner vie à ce modèle, nous le confronterons à des mesures expérimentales:

- Expérimentations BFR bande X (Toulon 2001) pour valider le modèle de la composante moyenne. En effet, au cours de ces expérimentations, une mer avec très peu de houle a été observée.
- Expérimentations SURICATE bande X (Brest 2000) pour valider le modèle de la composante fluctuante du fouillis et étalonner les niveaux de fluctuations. Les niveaux élevés de ces fluctuations correspondent à la gêne la plus dimensionnante dans le cas du radar discret pour sous marin.

4. Choix d'un modèle de fouillis

4.1 Définition des critères de choix

4.1.1 Besoin de l'étude

Le contexte opérationnel du radar discret pour sous marin est très spécifique.

- Le radar situé 1 à 2 m au dessus de la surface de la mer souffre des échos de mer proches. Nous considèrerons qu'à distance très proche le faisceau est tubulaire, ce qui se traduit concrètement par un élargissement du faisceau incident et un gain sur l'énergie rétrodiffusée. L'incidence est conservée et le coefficient de rétrodiffusion champ proche se déduit du coefficient de rétrodiffusion champ lointain par un facteur de correction. Le calcul du coefficient de rétrodiffusion champ lointain reste une nécessité.
- Pour les détections lointaines, l'incidence est rasante.
- Pour les échos proches, l'incidence est élevée (quelques degrés).
- De plus le radar est à ondes continues et de nombreux modèles concernent les radars à impulsion. Nous considèrerons les propriétés physiques des radars continus comme un passage à la limite (taille de l'impulsion égale à la période de de répétition) du cas des radars à impulsion, laissant au premier ordre invariantes les propriétés de rétrodiffusion par les objets.
- Les expérimentations à Toulon sur BFR ont été réalisées avec un état de mer force 1. Le besoin sera d'extrapoler les résultats obtenus à des états de mer 3 ou 5.

Le but de cette étude est de fournir et de valider un modèle qui devra:

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

- être appliqué à des conditions opérationnelles différentes des conditions d'expérimentation., ce qui implique un domaine d'application et de représentativité le plus large possible.
- posséder une signification physique intelligible afin de valider simplement les hypothèses d'utilisation et de le corréler à des résultats d'expérimentations.
- posséder un niveau de complexité limité (nombre de paramètres d'entrée)
- être facilement implantable en minimisant la charge et le temps des calculs.

4.1.2 Critères de choix

L'analyse du besoin de l'étude nous a conduit à définir des critères de choix pour le modèle de fouillis:

- domaine d'application et de représentativité
- signification physique
- niveau de complexité
- simplicité algorithmique

Pour chacun de ces critères, nous pouvons définir une note de satisfaction prenant des valeurs entières de 0 à 3, chacune de ces notes ayant une signification décrite dans le tableau suivant.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

Critère	0	1	2	3
Domaine d' application	Très locale: reproduit seulement une séquence comparable à la séquence observée	Locale: produit un modèle satisfaisant pour une hypothèse donnée (bande radar ou incidence ou état de mer)	Modèle applicable à un contexte opérationnel donné (Katzin, LAAMS ..) mais pas généralisable	Modèle général basé sur des lois physiques applicable à beaucoup de cas
Signification physique	Modèle boîte noire sans lien apparent avec la physique	Modèle boîte noire synthèse de nombreuses campagnes d'expérimentations: les paramètres sont ajustés mais n'ont pas de signification physique directe	Modèle boîte noire dont les paramètres d'entrée ont une signification physique (LAAMS, KATZIN)	Modèle boîte blanche détaillé s'appuyant sur la physique fondamentale
Complexité	Grand nombre de degrés de liberté: modèle aux différences finies …	Nombre de degrés de liberté limité		Peu de paramètres d'entrée
Simplicité algorithmique	Code de calcul uniquement: éléments ou différences finies		Expression sous forme analytique intelligible mais demande une certaine	Expression sous forme analytique intelligible et calculable

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

			puissance de calcul	

4.2 Définition des principales classes de modèles

Nous pouvons définir 5 classes de modèles hiérarchisés permettant de représenter un système physique:

- Les codes de calcul: par éléments ou différences finies, ils intègrent les équations de propagation et les conditions aux limites. Leur nombre de degrés de liberté est considérable et correspond au maillage du domaine d'étude.
- Les modèles physiques ou comportementaux. Ils s'appuient sur des hypothèses et des lois physiques. Ils se déclinent sous forme de "boîte blanche", c'est à dire que les mécanismes reliant les sorties aux entrées sont plus ou moins détaillés et expliqués.
- Les modèles usuels que nous connaissons bien (Katzin, LAAMS, Barton …) et qui sont utilisés dans le contexte des radars moyenne ou longue portée, afin de spécifier des performances.
- Les modèles empiriques: ils sont la synthèse d'expérimentations et de mesures mises sous forme de lois dont les paramètres ne sont pas directement reliés à des lois physiques. C'est un modèle boîte noire. difficile à extrapoler en dehors du domaine de validité des mesures.
- Les modèles de texture: ce sont des modèles boîte noire qui à partir de l'analyse statistique (histogramme, corrélation) d'un enregistrement de fouillis sont capables par transformation d'un bruit blanc gaussien de reproduire un signal ou une texture semblable.

4.3 Résultat de l'analyse multi critères

L'analyse multi critères consiste à donner une note pour chaque critère à chacun des modèles. L'analyse sera faite en cumulant les notes et en considérant les notes minimales. Le tableau suivant correspond à notre analyse.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

	Code de calcul	Modèle comportemental	Modèle usuel	Modèle empirique	Modèle de texture
Domaine d'application	3	3	2	1	0
Signification physique	3	3	2	1	0
Complexité	0	3	3	1	3
Calcul	0	2 ou 3	2	2	0
Total	6	11 ou 12	9	5	3

Fig 1: Analyse multicritères pour le choix du modèle de fouillis

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

L'analyse multi critères conduit à:

- rejeter les modèles code de calcul peu dimensionnés au contexte de l'étude pour leur manque de disponibilité et pour la difficulté de mise en œuvre.
- rejeter les modèles de texture car ils offrent peu d'appui pour tenter des extrapolations et qu'ils ont une signification physique réduite (pas d'hypothèses intelligibles autres que les conditions des enregistrements qui les ont créés)
- différer l'emploi des modèles usuels devant le contexte opérationnel spécifique du radar discret.
- retenir le modèle comportemental qui représente un bon compromis coût de mise en œuvre/ objectif.

Il reste alors à parcourir la littérature prolixe sur le sujet afin de constituer notre modèle comportemental.

Ce modèle sera basé sur

- un modèle physique reconnu de la surface de la mer
- un modèle de rétrodiffusion basé sur la simplification des équations de calcul des champs électromagnétiques à l'aide des hypothèses de l'approximation géométrique et des conditions de Rayleigh pour l'application de l'optique physique et de la diffraction.

5. Modèle physique de la surface de la mer

La surface de la mer peut être représentée comme la superposition de 2 types de vagues:

- Les vagues de gravité qui provoquent l'aspect macroscopique de la surface de la mer. les longueurs d'ondes varient entre 200 m et quelques fractions de mètre. la cause principale des ondes de gravité est la force de gravité. Par ailleurs des mesures montrent que sur cette composante moyenne viennent se superposer des "spikes" . Une analyse physique montre que ces "spikes" sont dus à la diffraction des ondes radar sur les crêtes de mer. Dans cette partie, nous effectuerons une analyse critique de cet article et corrèlerons les résultats à ceux observés lors de la campagne de mesures Brest 2000.
- Les vagues de capillarité: conduisent à la structure fine de la surface de la mer. Leurs longueurs d'onde sont de l'ordre de 2 cm ou moins. La cause principale de ces ondes est la force de tension superficielle.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

Pour nos radars,la longueur d'onde est petite (de l'ordre de quelques cm). Un modèle simplifié consiste à considérer que l'onde radar rentre en résonnance avec les ondes de capillarité. A faible échelle, la surface de la mer opère comme un réseau de diffraction.

Le modèle proposé est un modèle comportant 4 aspects:

- Une densité spectrale d'énergie pour les vagues de gravité,
- Une densité spectrale d'énergie pour les phénomènes de dissipation (vagues de capillarité).
- Un modèle d'évolution des hauteurs de mer
- Une caractérisation de l'état de surface de la mer.

5.1 Densité spectrale d'énergie des vagues de gravité:

La houle est un phénomène de propagation lié à la formation de structures en déplacement sous l'action de la gravité et de la vitesse du vent. La représentation traditionnelle est donnée par le spectre de Pierson et Moskowitz (cf. référence [8])

$$\mathrm{P}(k) = 0{,}0081 \times \frac{1}{k^3} \times \exp(-0{,}74 \frac{k_p^2}{k^2})$$

exprimé en nombre d'ondes et qui traduit la structure ondulatoire spatiale de la mer à un instant donné, i.e. comme une photographie ou comme l'image saisie par le radar.

Ce spectre se compose de deux parties:

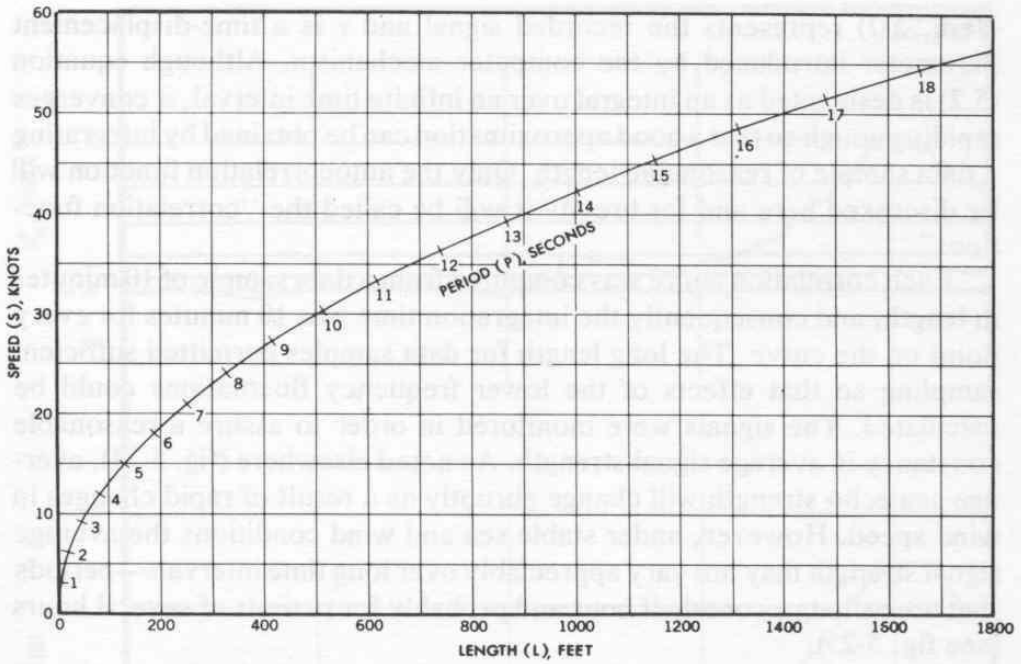
- une résonnance au voisinage d'une longueur d'onde particulière liée à la vitesse du vent et à la gravité dont la formule est la suivante $\lambda_p = \frac{2\pi}{0{,}8^2} \times \frac{V_{Vent}^2}{g}$.

Cette longueur d'onde correspond en première approximation à la longueur de corrélation de la surface de mer.

Le schéma suivant montre la relation théorique existant entre la longueur d'onde de la houle et la vitesse du vent:

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



Source: Bigelow and Edmondson (1947).

Figure 5-23. Graphical Presentation of the Theoretical Relationship between Wavelengths, Velocities, and Periods in Deep Water.

Fig 2: Relation existant entre les différentes caractéristiques de la houle

- Un comportement asymptotique pour les faibles longueurs d'onde avec un spectre en $\frac{1}{k^3}$ qui semble comparable à un bruit en 1/f en électronique. La référence [13] décrit ce type de spectre comme un processus fractal possédant les mêmes propriétés statistiques quelle que soit l'échelle à laquelle on l'observe

5.2 Densité spectrale d'énergie des vagues de capillarité

Les vagues de capillarité ont des longueurs d'ondes inférieures à 5 cm. Par exemple pour une mer à 20°C, la longueur d'onde correspondant au maximum de la densité spectrale d'énergie des vagues de capillarité vaut 1,23 cm et la vitesse de propagation est de l'ordre de 23 cm/s.

5.3 La hauteur de la houle:

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

La hauteur de la houle H (m) est en relation directe avec l'état de la mer (fonction croissante). Elle est donnée par la formule empirique suivante: $H = 0{,}021 \times w^2$:

avec $w = 2.1 \times SS^{1.18}$

Avec SS état de la mer (sans unités).

Etat de mer: SS	0	1	2	3	4	5	6	7
W (m/s)	<1,75	<3,5	<6	<8	<10	<12,5	<16	<22,5
Qualité	Calme	Faible à modérée			Agitée	Très agitée	forte	très forte

Remarque: Dans le modèle ci-dessus, on peut remarquer que le rapport entre la hauteur de houle et la longueur d'onde est une constante et ne dépend pas de l'état de la mer.

$$\frac{\lambda}{H} = \frac{2\pi}{0{,}021 \times 0{,}8^2 * g} = 47{,}6$$

5.4 L'état de surface de la mer:

Dans notre problème, nous allons faire l'hypothèse que les propriétés statistiques de l'état de surface de la mer sont liées à la répartition de facettes aux orientations aléatoires. L'état de surface de la mer sera donc caractérisé par une loi de probabilité.

Nous allons proposer un modèle de répartition basé sur les considérations suivantes:

- des considérations de physique fondamentale: trouver un modèle qui représente au mieux l'aspect oscillatoire et turbulent de la houle.
- des considérations d'économie de moyens: il s'agit de représenter la complexité de la houle par un modèle possédant peu de paramètres, en généralisant l'emploi de la loi gaussienne (1 paramètre) à des lois possédant un paramètre d'échelle (comparable à un écart type) et un paramètre de forme (caractéristique de la déformation de la houle avec la vitesse du vent).
- des considérations de régularité et de facilité d'implémentation: les lois retenues doivent s'accompagner d'un bagage mathématique suffisamment balisé pour faciliter la constitution des modèles et simplifier leur formalisme mathématique.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

Afin de respecter ces règles, nous allons nous appuyer sur le modèle géométrique de la houle précédemment établi. En effet, le comportement asymptotique du spectre de Pierson et Moskowitz conduit à imaginer un processus aux propriétés géométriques invariantes avec l'échelle d'observation, donc à modéliser la surface de la mer par un objet fractal.

Des objets fractaux très simples ont été étudiés par Benoit Mendelbrot dans son ouvrage en référence [12]. Il y a par exemple les modèles de flocon de neige (Courbe de Von Koch) ou les modèles de côtes ou de relief construits à l'aide d'un motif simple que l'on reproduit à l'infini, par homothétie, à toutes les échelles.

Ces processus dont les propriétés statistiques sont invariantes avec l'échelle d'observation (résolution) sont modélisés par des lois de Lévy ou alpha stables. Nous modéliserons donc la répartition des pentes de mer par un processus de Lévy. Une description mathématique sommaire de ces lois et quelques propriétés utiles sont rappelées en annexe 6.

Afin de déterminer les paramètres représentatifs de la répartition des pentes de mer, nous allons dériver le profil de la houle.

Ecrivons la hauteur z de la houle qui peut s'exprimer de la façon suivante:

$Z(x) = H \times f(\frac{x}{\lambda})$ où la fonction f ne dépend que de la topographie de la me

En dérivant 1 fois, on obtient

$$Z'(x) = \frac{H}{\lambda} \times f'(\frac{x}{\lambda})$$

Le modèle retenu pour la géométrie de la mer est un modèle fractal. Ce modèle est caractérisé par une répartition statistique des pentes de mer dite loi de Lévy commandée par deux paramètres: m et D. (cf. annexe 6)

Le paramètre d'échelle $m = \frac{H}{\lambda}$ traduit la largeur de la Densité De Probabilité, c'est à dire qu'il est analogue à l'écart type pour une Densité De Probabilité de Gauss, correspondant à l'ensemble des valeurs de pentes de mer les plus probables.

Le paramètre de forme traduit le comportement asymptotique de la loi. Ce paramètre dépend de l'état de la mer. Plus la mer est agitée, plus la probabilité des pentes élevées devient grande. Plus la houle est développée, plus la structure des vagues est ordonnée, et la

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

mémoire du processus importante. Ce paramètre de forme traduit la rugosité de la surface de la mer.

Par exemple, lorsque la dimension fractale D est égale à 1, on est en présence d'un processus de Cauchy. Lorsque la dimension fractale vaut 2, on est en présence d'un processus gaussien. Les lois de probabilité correspondantes n'ont pas de forme analytique connue. Cependant, de nombreux développements mathématiques ont été réalisés pour décrire ce type de phénomène.

La description mathématique du modèle passe par une relation de dépendance entre:

- Le paramètre d'échelle et l'état de la mer que l'on peut simplement exprimer grâce au paragraphe 5.3.
- Le paramètre de forme et l'état de mer, i.e. la relation liant la dimension fractale D et la vitesse de la mer. On peut par exemple dégager la tendance: plus l'état de mer est élevé, plus la mer est agitée et formée, ce qui veut dire une dimension fractale d'autant plus proche de 1. lorsque la mer est plate, on peut s'attendre à des dimensions fractales proches de 2.

La relation reliant la dimension fractale D à l'état de mer reste à déterminer. Pour dégager cette relation, on s'appuiera dans un premier temps sur de nombreuses mesures expérimentales des rétrodiffusions spéculaires du fouillis de mer (cf. paragraphe 6.4).

6. Modèle de rétrodiffusion

6.1 Critère de Rayleigh

Deux effets sont à conjuguer pour traduire l'essentiel des phénomènes de rétrodiffusion sur la surface de la mer:

- L'effet diffus: la présence de structures fines de taille proche de la longueur d'onde gêne la propagation et la rétrodiffusion des ondes: réflexions multiples, masques. Ceci constitue un rétrodiffusion diffuse, plutôt à base de phénomènes de diffraction.
- L'effet spéculaire: lorsque la surface est suffisamment "lisse" (facettes de mer), la réflexion n'est pas gênée et se produit principalement dans la direction définie par l'optique géométrique. La réflexion n'est pas isotrope et dépend de la répartition des facettes de mer. le schéma suivant permet de visualiser différents types de réflexions: isotrope, directionnelle selon Descartes, normale:

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

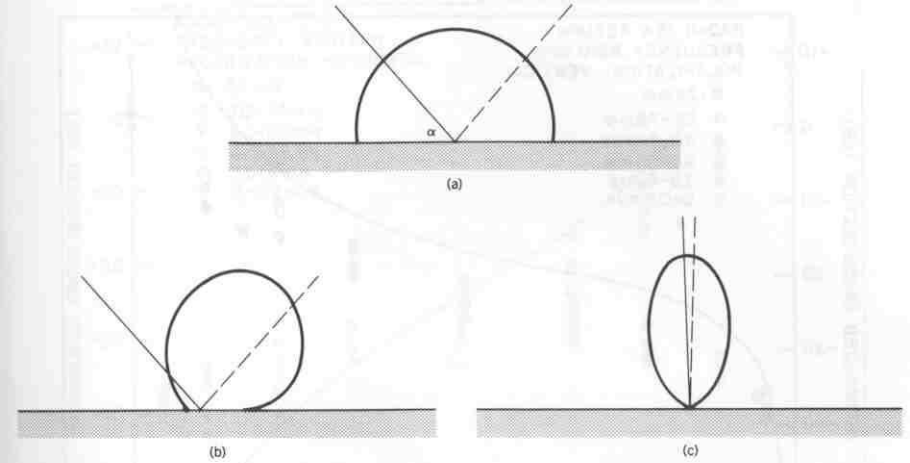


Figure 4.8 Reflection pattern of rough surfaces: (a) Isotropic reflection pattern. (b) Slanted incidence. (c) Near-vertical incidence.

Fig 3: Cas de rétrodiffusion par une surface rugueuse

Ces deux effets distincts sont limités par le critère de Rayleigh.

Le critère de Rayleigh permet de faire une distinction entre une surface lisse et une surface rugueuse.

Le schéma suivant représente une surface rugueuse et montre géométriquement comment dériver, à partir de la théorie de la diffraction (différences de marche) le critère de Rayleigh.

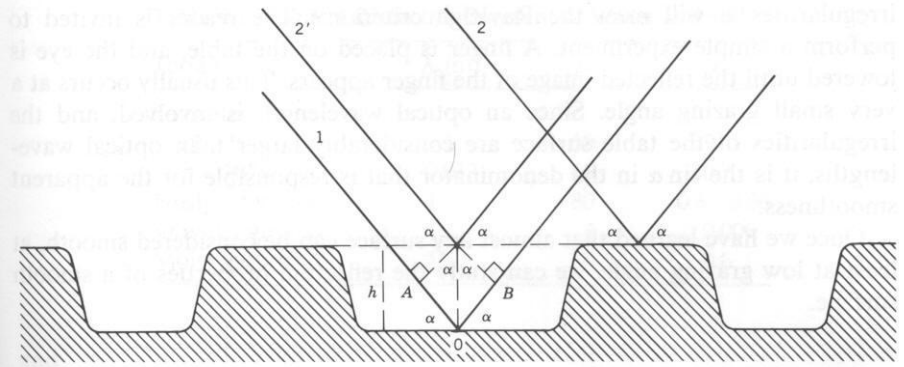


Figure 4.1 Rough-surface reflection.

Fig 4: rétrodiffusion de Rayleigh

Si h est la hauteur des irrégularités (traduisant la rugosité) et α l'angle d'incidence par rapport à l'horizontale, le critère s'écrit:

$$h \leq \frac{\lambda}{8 \times \sin(\alpha)}$$

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

Le schéma suivant représente en fonction de la longueur d'onde du radar et de la hauteur du relief la limite entre spéculaire et diffus.

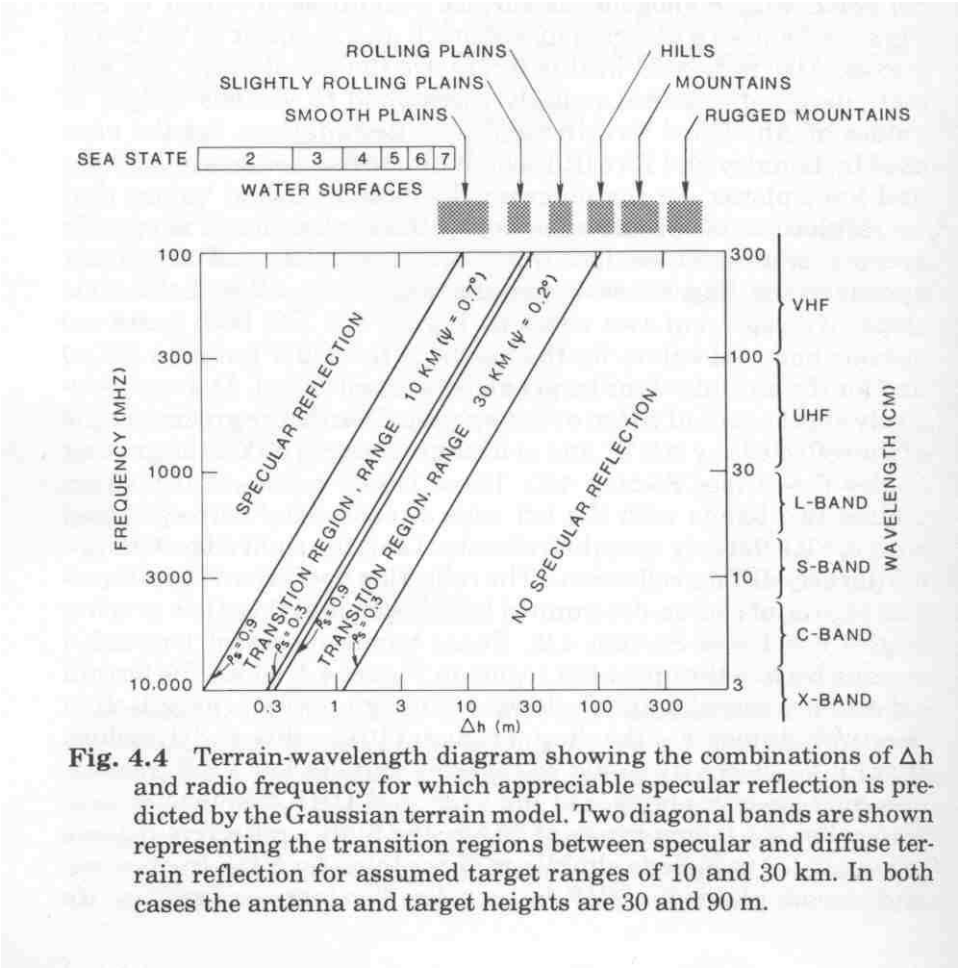


Fig. 4.4 Terrain-wavelength diagram showing the combinations of Δh and radio frequency for which appreciable specular reflection is predicted by the Gaussian terrain model. Two diagonal bands are shown representing the transition regions between specular and diffuse terrain reflection for assumed target ranges of 10 and 30 km. In both cases the antenna and target heights are 30 and 90 m.

Fig 5: cas d'application du critère de Rayleigh

Par exemple, en bande X , à faible incidence, on se situe à la limite des effets spéculaire et diffus, pour les faibles états de mer. Il faut alors tenir compte des 2 phénomènes.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

6.2 Diffraction de Bragg

Les vagues de capillarité circulant au dessus des vagues de gravité peuvent avoir des distances de corrélation de l'ordre de la longueur d'onde du radar. On observe alors un phénomène de "résonnance", car la surface de la mer se comporte comme un réseau de diffraction.

La relation reliant alors l'angle d'incidence et la distance de corrélation peut se mettre sous la forme d'une figure d'interférence avec des différences de marche constructives ou destructives. Les échos de mer sont liés aux interférences constructives.

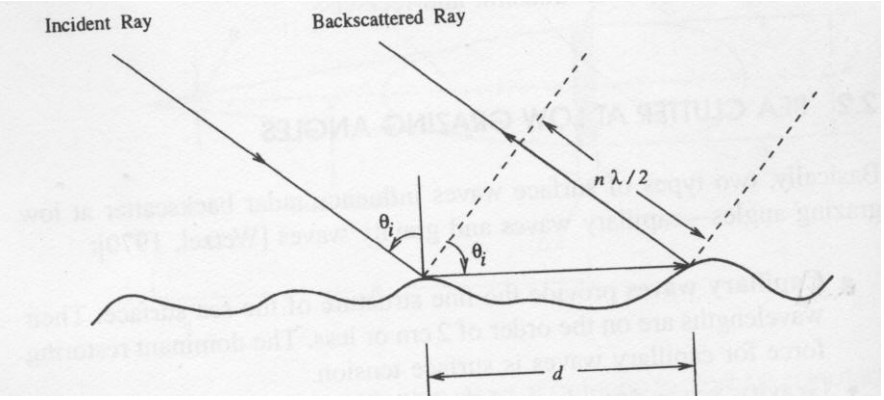


Fig 6: Géométrie de la Diffraction de Bragg

La relation s'écrit:

$$n \times \frac{\lambda}{2} = d \times \sin(\theta)$$

Ce modèle décrit les phénomènes de diffraction et de masques qui existent à faible incidence.

6.3 Phénomènes de diffraction ou rétrodiffusion diffuse

Le modèle est issu de la littérature.

J W WRIGHT (1966) a donné un modèle de rétrodiffusion sur une surface de mer faiblement rugueuse.

Ce modèle considère la surface de la mer comme un ensemble de points brillants. Ces points brillants sont caractérisés par une fonction de corrélation. La rétrodiffusion est donnée par la figure d'interférence produite par ces points brillants. Ce rayonnement est appelé rayonnement diffus.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

J. W. Wright a comparé ses calculs avec des mesures réalisées avec un radar bande X sur une surface où il a généré des vagues de capillarité en contrôlant les conditions d'expérience: taille des vagues avec des longueurs d'onde de capillarité correspondant à des fractions de centimètre. .

Les mesures ont été faites:

- en polarisation horizontale et verticale
- à la même distance du radar
- pour des angles d'incidence variant de 4° à 80°.

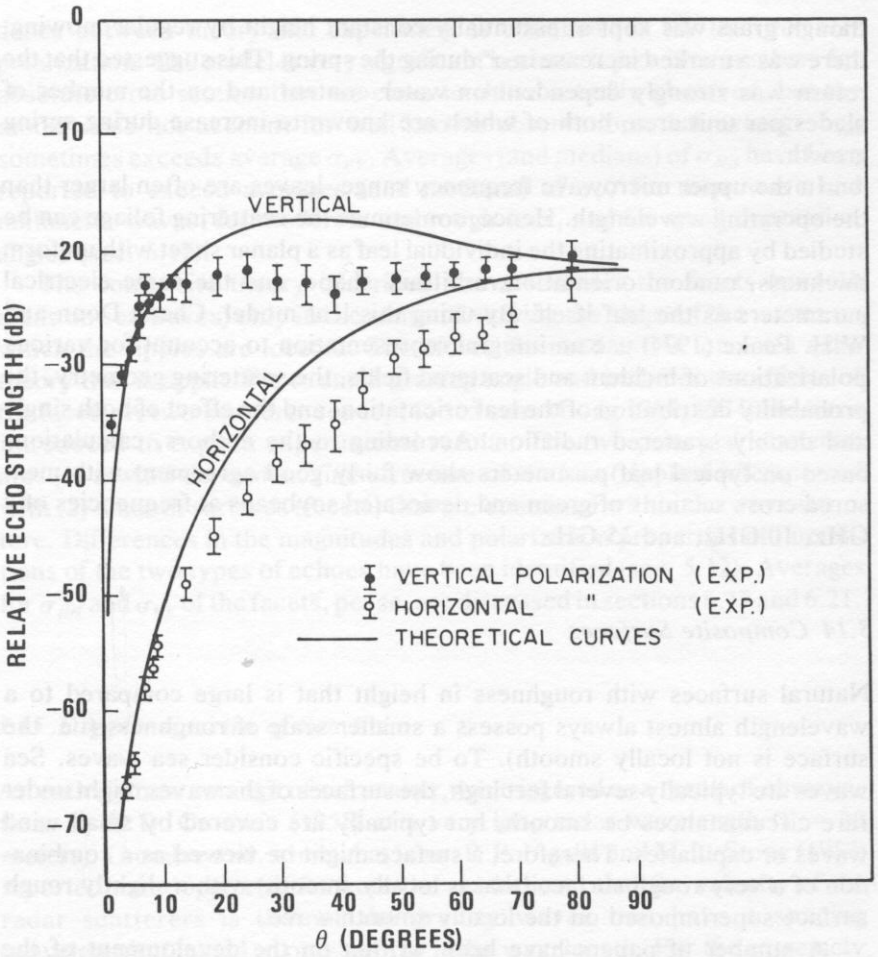
Wright montre ici que, à une incidence donnée, le coefficient de rétrodiffusion du fouillis est principalement lié aux phénomènes de diffraction (Bragg ou Rayleigh) par les vagues de capillarité.

La figure ci-dessous montre les comparaisons entre les mesures expérimentales et les résultats théoriques.

En ordonnée, on représente le niveau reçu par le radar. Ce niveau est exprimé en dB et n'a pas été reconverti en densité de SER, tenant compte ainsi des caractéristiques du dispositif expérimental. Toutefois, pour une même valeur de l'angle d'incidence, les rapports entre niveau reçu en polarisation verticale et niveau reçu en polarisation horizontale correspondent au rapport entre coefficients de rétrodiffusion, ce qui se justifie par l'équation de bilan radar à même distance. En abscisse, l'angle d'incidence avec l'horizontale est exprimé en degrés.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



Source: Wright (1966).

Figure 3-9. Radar Cross Section Versus Depression Angle for Capillary Waves on Tap Water.

Fig7: Comparaison du modèle de Wright avec des mesures de rétrodiffusion de vagues de capillarité mesurées à même distance pour des polarisations différentes.

On observe qu'à très faible incidence (inférieure à 10°), l'effet de la polarisation est déterminant. La polarisation verticale se situe 20 dB au dessus de la polarisation horizontale (ce que l'on observe effectivement avec les mesurtes BHR).

6.4 Phénomènes de réflexion spéculaire

- Si l'on fait l'hypothèse que la hauteur de houle et la longueur d'onde sont grandes devant la longueur d'onde du radar, on peut se placer dans une approximation de type optique géométrique. Cela veut dire que la répartition des échos de mer est liée en première approximation à la loi de répartition des facettes de mer. Cette condition appelée

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

$\frac{2\pi}{\lambda} \times L \geq 6$

condition de Kirchoff a été écrite de la manière suivante dans la littérature: $Rc \geq \lambda$ où L est la longueur de corrélation de la mer et Rc est le rayon de courbure moyen de la surface rugueuse formée par la mer.

Le coefficient de rétrodiffusion conséquent aux réflexions sur la mer dans ce cas de figure a été exprimé et sa formulation mathématique apparaît en référence [13].

Le coefficient de rétrodiffusion spéculaire va uniquement dépendre:

- de la loi de répartition des pentes de mer liées à l'état de mer
- de l'incidence de l'onde

Le coefficient de rétrodiffusion sera invariant vis à vis de la longueur d'onde et de la polarisation.

La loi d'évolution du coefficient de rétrodiffusion spéculaire en fonction de l'angle d'incidence doit permettre de remonter à l'expression des paramètres de forme de la loi en fonctrion de l'état de la mer. On pourra ainsi répondre partiellement au problème posé au paragraphe 5.4: compléter la description de la géométrie de la mer.

Le paragraphe 5.4 part de l'hypothèse d'une description statistique de la répartition des pentes de mer comme une loi de Lévy de paramètres D et $m = \frac{4 \times H}{\lambda}$ (cf. Annexe 6)

En dérivant l'expression asymptotique de la loi de probabilité cumulée des facettes de mer (cf. annexe 6), on obtient l'expression suivante:

$$\sigma(\theta) = D \times m^{D} \times \frac{\left(\sin(\theta)\right)^{D-1}}{\left(\cos(\theta)\right)^{D+1}} \quad [1]$$

Cette forme est analogue à des lois empiriques existant dans la littérature. Par exemple, dans l'ouvrage de Nadav Levanon (cf. référence [1]), ce dernier propose un modèle empirique du coefficient de rétrodiffusion de la forme:

$$\sigma(\theta) = C \times \frac{\left(\sin(\theta)\right)^{n}}{\left(\cos(\theta)\right)^{u}}$$

où n est un réel compris entre 1 et 2 et u un réel compris entre 1 et 5.et C une constante

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

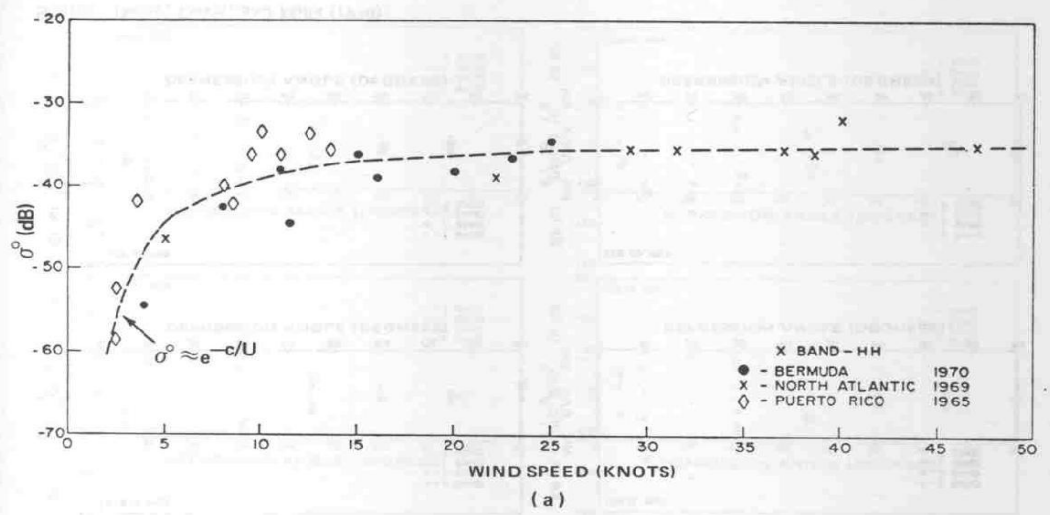
Le coefficient de rétrodiffusion pour une incidence donnée est directement relié à la dimension fractale D de la loi de répartition des facettes de mer. Ce résultat va permettre de dériver l'expression de D de modèles empiriques construits à partir de campagnes de mesures.

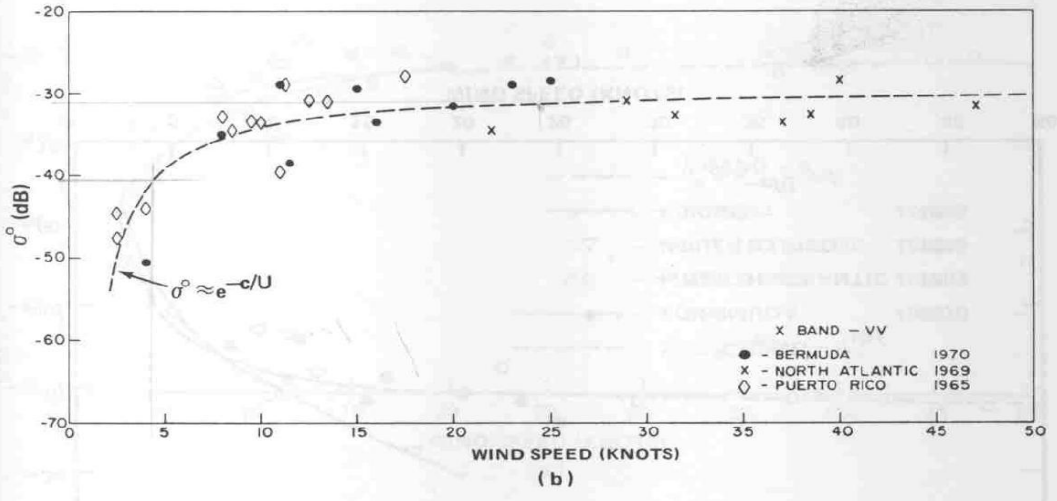
Dans la suite de ce paragraphe, nous allons déterminer une relation reliant la dimension fractale de la loi de répartition des facettes de mer et l'état de mer caractérisé par la vitesse du vent.

La photo ci dessous représente un modèle empirique issu de la référence [10] qui représente une compilation importante de données expérimentales. Ce modèle a été réalisé à partir de mesures de la valeur médiane de coefficients de rétrodiffusion, issus de campagnes d'expérimentations en des lieux et des dates différents. Ces courbes proviennent de mesures faites en 1971, avec un radar bande X et montrent pour les polarisations horizontale et verticale des mesures collectées pour des vitesses de vent différentes de 0 à 50 nœuds pour un angle d'incidence de 10 degrés.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.





Source: Daley, Ransone, and Burkett (1971).

Figure 6-40. Median σ°_{VV} of the Sea Versus Wind Speed (X Band, Upwind, 10° Depression Angle).

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

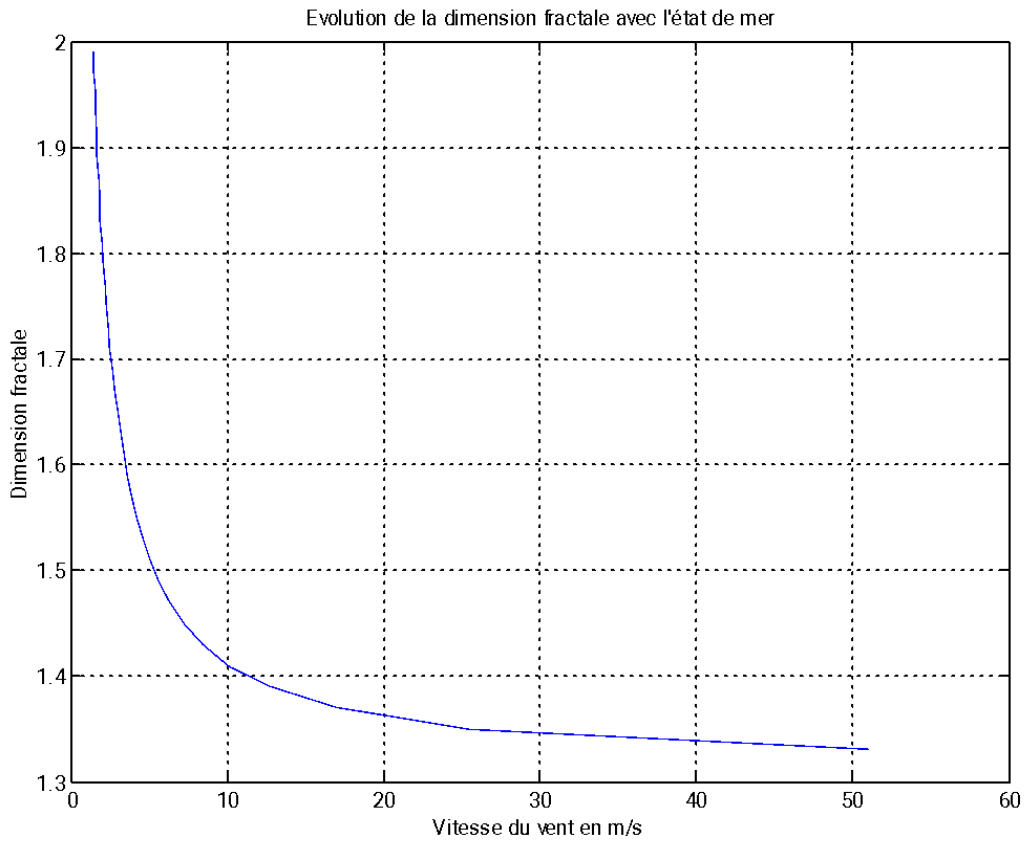
This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

Fig 8: Lissage empirique de l'évolution du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'état de mer: les mesures proviennent de campagnes et de lieux différents.

Les deux planches de la figure 8 montrent:

- Une indépendance vis à vis de la polarisation.
- Une loi de comportement du coefficient de rétrodiffusion en fonction de la vitesse du vent de la forme: $\sigma = A \times \exp(-\frac{C}{U})$ où U est la vitesse du vent et A une constante.

En comparant cette relation avec la formule analytique du calcul du coefficient de rétrodiffusion [1](des calculs ont été réalisés sur PC), nous pouvons déduire une relation reliant la dimension D à la vitesse du vent représentée sur le graphique suivant.



Cette courbe traduit les faits suivants:

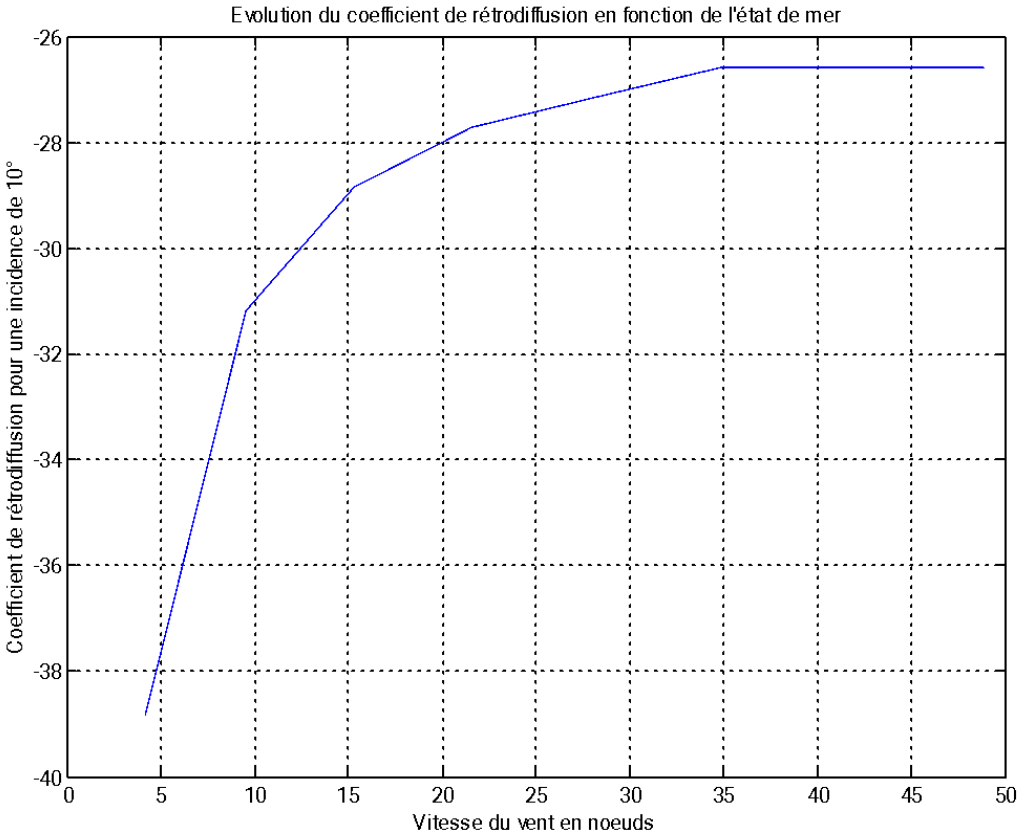
Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

- Lorsque la vitesse du vent est faible, la répartition des facettes de mer est très désordonnée et correspond à un bruit blanc gaussien, avec une répartition statistique bornée: les facettes verticales sont des évènements très rares.
- Lorsque la vitesse du vent augmente, la mer se ride, se forme, faisant apparaître de grandes valeurs des pentes de facettes. On a une structure plus ordonnée et les grandes valeurs de pentes ne sont plus des évènements rares.

A partir de la relation [1] et de l'expression empirique de la dimension fractale, nous avons recalculé les coefficients de rétrodiffusion:

- Pour une incidence de 10° en fonction de la vitesse du vent.



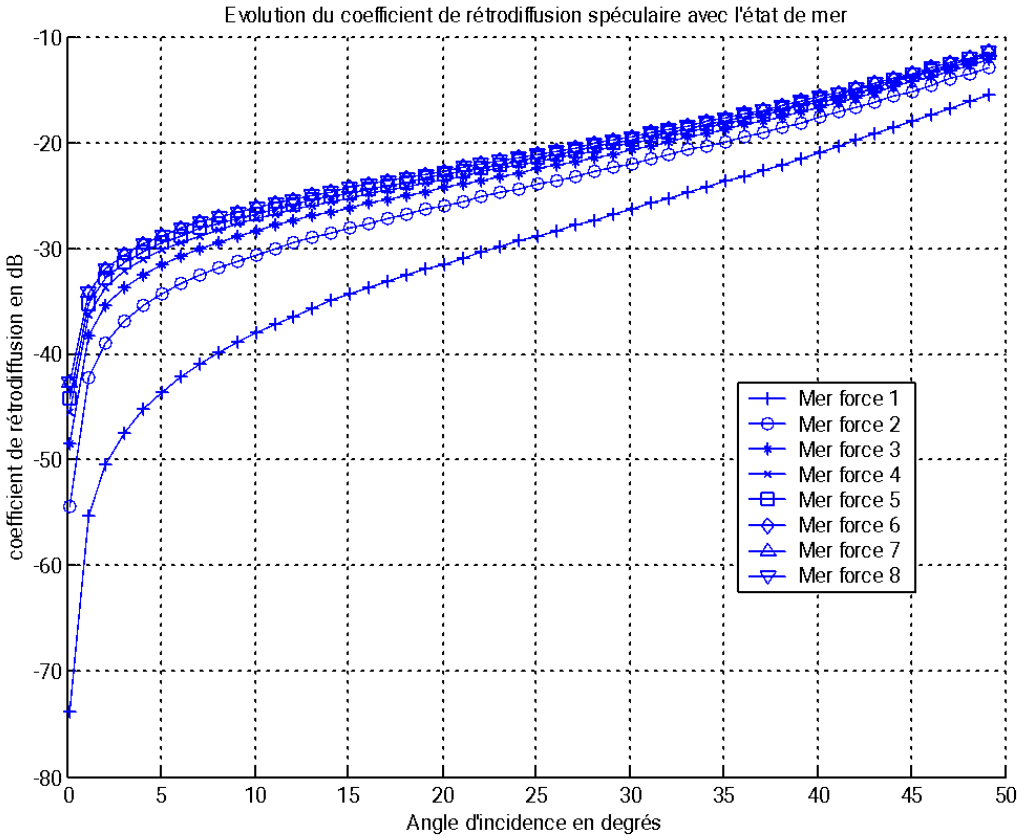
Cette expression du coefficient de rétrodiffusion est à rapprocher des mesures expérimentales représentées sur la figure.

Nous constatons que ce modèle permet de respecter les ordres de grandeur annoncés par la littérature et les expérimentations.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

- Pour différents états de mer en fonction de l'incidence par rapport au sol jusqu'à 50° , limite de validité de la formule [1].



Nous pouvons la comparer aux mesures rassemblées en bande X par Levanon (cf. référence [1]). Nous constatons aussi que ce modèle permet de ***respecter les ordres de grandeur*** annoncés par la littérature et les expérimentations. Un travail important reste à faire pour mieux ajuster les résultatts aux mesures (moindres carrés, synthèse de données plus importante voire expression théorique de la dimension fractale en fonction de la vitesse du vent).

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

6.5 Phénomène de "spikes"

6.5.1 Introduction

L'analyse de ce phénomène repose sur un article récent décrivant une expérience conduisant à mettre en évidence les phénomènes de haut niveau énergétique que l'on observe à faible incidence. (cf. référence [5])

L'expérience a été conduite à l'Ocean Engineering Laboratory de l'Université de Californie à Santa Barbara. Elle a mis en œuvre un radar à ondes continues en bande C avec une résolution distance de 3,77 cm. et un générateur de vagues.

L'analogie avec le radar pour sous marin peut être vue :

- dans le dispositif d'expérimentation. Un radar face à de la houle à une altitude faible par rapport au niveau moyen de la houle (guère plus haut que la houle).
- dans le phénomène physique observé: les vagues observées et les phénomènes de spikes peuvent être considérés comme des phénomènes spéculaires, donc rentrant dans l'approximation de l'optique géométrique, indépendante de la longueur d'onde du radar. Pour ce type de phénomène, une observation avec un radar en bande C peut être considérée comme équivalente à une observation avec un radar en bande C.

Une grande variété de vagues ont été observées avec des vitesses de vent différentes. La synchronisation des enregistrements des hauteurs de vagues et de la vidéo radar ont montré que les grandes valeurs du coefficiennt de rétrodiffusion sont dues à la diffraction se produisant à la crête des vagues lorsque celles ci se brisent.

La différence entre les effets de Bragg et la rétrodiffusion des crêtes de vagues s'appuie sur une analyse statistique puis Doppler des échos reçus.

L'étude de la cause physique des effets de spike s'appuie sur une analyse dynamique de la formation des vagues.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

6.5.2 Dispositif expérimental et analogie avec le radar pour sous marin

Les expérimentations ont été menées dans une chambre de génération de vagues de 50 m de long et haute de 2,6 m et est représenté sur la figure ci-dessous .

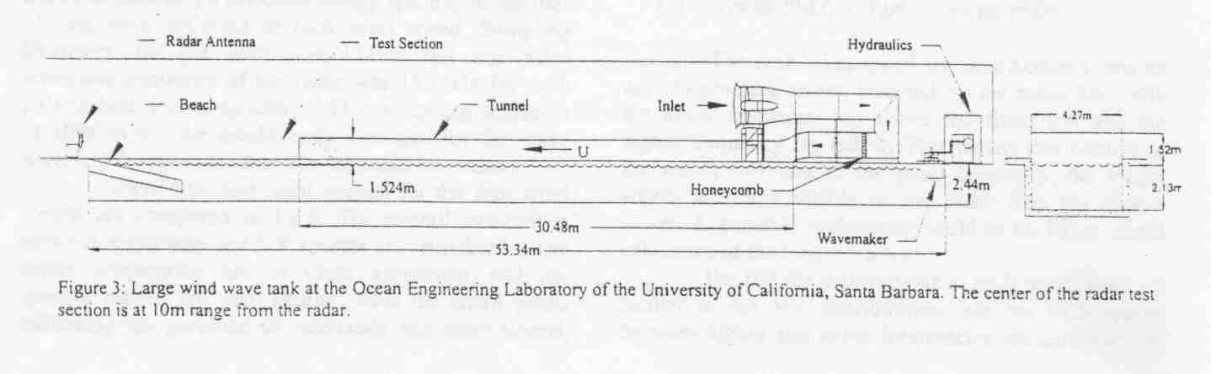


Figure 3: Large wind wave tank at the Ocean Engineering Laboratory of the University of California, Santa Barbara. The center of the radar test section is at 10m range from the radar.

Fig 9: Dispositif expérimental

La chambre est équipée avec:

- un générateur hydraulique de vagues commandé par ordinateur pouvant générer des vagues dont la hauteur peut varier entre 0,6 m et 4 m et la longueur d'onde de 0,75 m à 35 m.
- une soufflerie pour générer des conditions analogues à l'océan.
- des capteurs de position
- un radar FMCW bande C haute résolution distance (3,7 cm).

Ce dispositif est analogue au contexte opérationnel du radar pour sous marin:

- plate forme très peu élevée par rapport au niveau de la mer
- vagues provoquant des échos proches du radar (distance inférieure à 50 m)
- une incidence faible (6°)

La vérification de ces quelques hypothèses conduit à l'applicabilité des résultats de cette étude à notre problème.

6.5.3 Analyse qualitative

Les vagues de gravité provoquent deux effets de rétrodiffusion:

- Lorsqu'elles se brisent, elles créent un réflecteur parabolique qui renvoie l'énergie vers le senseur comme le décrit le schéma ci dessous.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

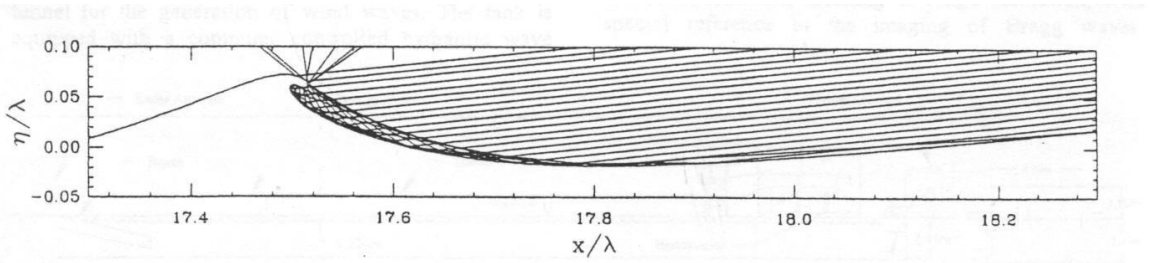


Figure 1: Focussing effect of the parabolic front face of an energetic breaking wave. The breaking wave was computed with LONGTANK. Rays are drawn at 6° grazing angle. Clearly visible is the jet moving into the focal region. We have measured peak HH RCS of several m² and HH/VV above 30dB in this phase of the breaking process. VV reflections from the front face are reduced significantly due to Brewster angle attenuation.

Fig 10: réflexion spéculaire par une vague

- La présence de vent modifie cet effet de focalisation en créant des vagues de plus petites dimensions dont la rugosité modifie la rétrodiffusion. Ces vaguelettes ont des dimensions de 0,1 à 1 m et lorsqu'elles se brisent subissent les effets de tension superficielle, créant au sommet une protubérance en forme de bulbe. Ce bulbe se caractérise par une facette réfléchissante verticale. Le schéma ci-dessous montre la déformation de ces vagues lorsqu'elles se brisent.

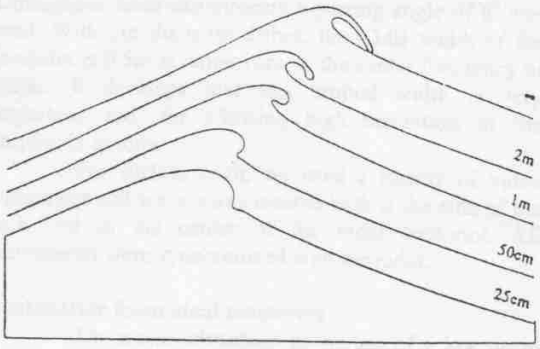


Figure 2: The effect of surface tension on the jet development. Wave profiles were computed with LONGTANK. Microbreakers have wave length below 1m and surface tension reduces the jet to a bulge.

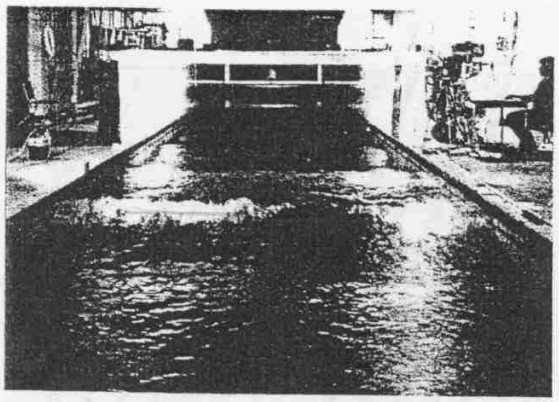


Figure 4: Photo of the tank, from the position of the radar. Clearly visible is a 2.3wave breaking in the foreground, and the two fans above the wind tunnel. The −3dB width of the radar beam is 50cm at 10m range.

Fig 11: Evolution de la forme des vagues avec la vitesse du vent

Afin de mettre en évidence l'impact de la dynalmique des vagues dans la valeur du coefficient de rétrodiffusion, les expérimentateurs ont synchronisé un relevé de la hauteur de la vague et la vidéo radar associée. le capteur de position est situé à 10 m du radar. la vitesse du vent est de 6 m/s. Le capteur de position montre une modulation d'amplitude typique d'un groupe de vagues. Alignés avec les pics de position apparaissent les pics de

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

SER en polarisation H et V, caractéristiques des spikes, comme le montre les diagrammes ci dessous.

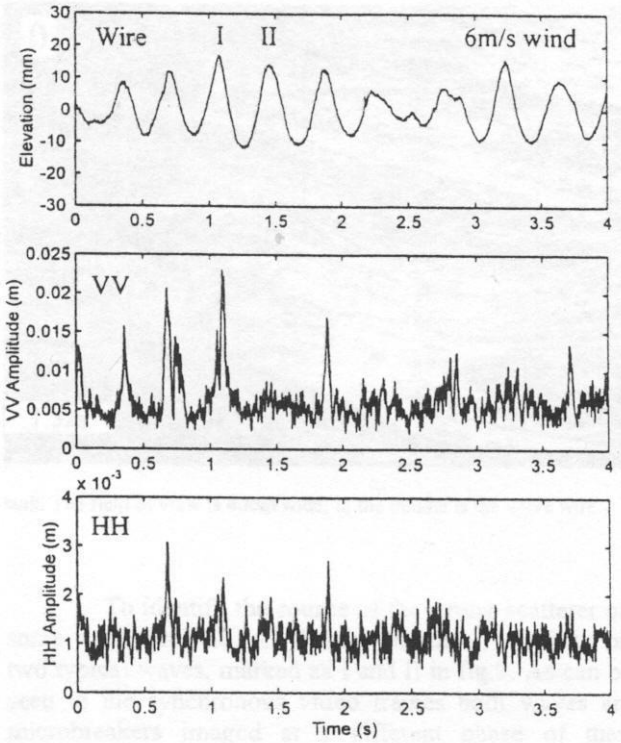


Figure 9: Wave wire elevation record from the wire in the center of the radar footprint at 10m, with synchronous HH and VV backscatter magnitude from the same range cell. In fig. 10 are synchronous video images.

Fig 12: Synchronisation des signaux vidéo et niveau de mer

L'image vidéo associée permet de voir apparaître les spikes dans un fond de diffraction de Bragg.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

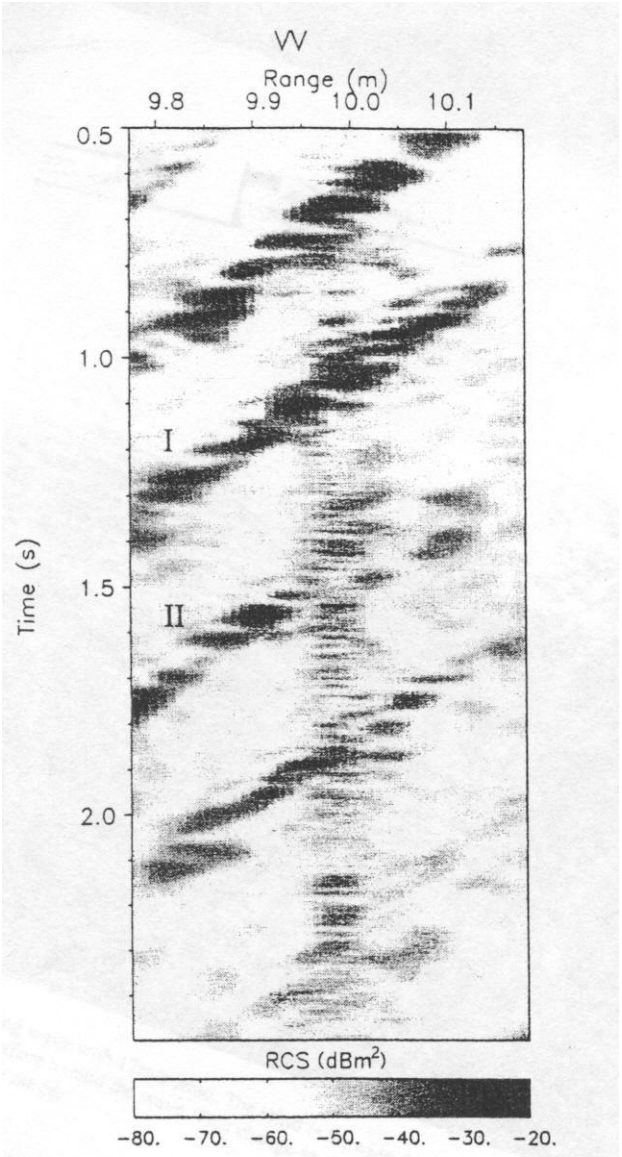


Figure 11: VV RTI diagram, from the same experiment as in fig. 9,10. Range resolution is 3.77cm. Strongly visible above the Bragg background are the traces of the microbreakers., peak RCS is ~20dBm^2. The traces are narrow in range and originate from the crest of the wave, compare to fig.10.

Fig 13: Signal rétrodiffusé

6.5.4 Analyse quantitative

L'analyse qualitative doit nous permettre de quantifier les niveaux de SER liés aux spikes afin de reporter les valeurs pour le dimensionnement du radar discret pour sous marin. L'article étudié permet

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

- de donner un premier ordre de grandeur de ces niveaux
- de caractériser la répartition statistique de ces niveaux.

Afin de caractériser la répatition statistique des niveaux rétrodiffusés, la loi de probabilité cumulée de ces niveaux a été tracée sur du papier Rayleigh (graphique dans lequel l'échelle de l'axe des ordonnées fait apparaître une distribution de Rayleigh par un alignement des points de mesure, la pente correpondant au paramètre de la loi).

La loi cumulée a été tracée pour

- Les polarisations horizontale et verticale
- Différents états de mer caractérisés par la vitesse du vent et la hauteur des vagues générées.

En référence sur chacun des graphiques apparaît la loi de répartition pour une surface de mer calme, soit quasi plane. Le comportement du coefficient de rétrodiffusion est dominé par la diffraction (critère de rayleigh). La surface se comporte comme un réseau de diffraction de points brillants, dont la combinaison obéit à la loi des grands nombres et converge vers une loi de Rayleigh.

Lorsque l'état de mer devient de plus en plus fort, cette répartition se déforme pour faire apparaître une composante asymptotique, pour laquelle le grandes valeurs ne sont pas rares. Lorsque l'état de mer s'accroit, la houle se forme. La loi de probabilité des orientations des facettes de mer, que nous avons, dans les hypothèses du rapport choisie de Lévy, prend des valeurs non négligeables pour les pentes de mer quasi verticales qui caractérisent les spikes. La répartition des valeurs du coefficient de rétrodiffusion est alors liée à l'état de la houle donc en particulier à la dimension fractale caractérisant cette houle.

La mesure sur la courbe de probabilité cumulée à 99% permet de montrer un rapport de 30 dB entre le niveau des spikes et le niveau du bruit de fond, ceci pour des conditions analogues à une mer force 5

6.5.5 Modèle retenu pour la composante spéculaire du fouillis de mer

Les répartitions de ces coefficients de rétrodiffusion font apparaître des grandes valeurs de signal avec des occurrences non négligeables. Ceci nous conduit à modéliser l'effet spéculaire du fouillis par une répartition des coefficients de rétrodiffusion suivant une loi ldont le comportement asymptotique autorise les grandes valeurs de signal.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

La loi lognormale est le modèle le plus simple qui caractérise l'apparition assez fréquente de grandes valeurs de signal.

L'occurrence des pics de signal étant directement liée à l'occurrence de facettes bien orientées (spikes), nous en déduisons que le facteur de forme de la loi de répartition du processus de rétrodiffusion est directement lié à la dimension fractale de la loi de répartition des pentes de mer. Ce paramètre de forme est donc lié à l'état de mer. Afin de déterminer une relation empirique reliant facteur de forme et état de mer des travaux supplémentaires devraient être menés, basés sur le dépouillement d'enregistrements de fouillis plus nombreux et aux conditions expérimentales plus larges (Mer formée …).

Le paramètre d'échelle de cette loi correspond au coefficient de rétrodiffusion établi au paragraphe 6.4 par l'équation [1]

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

7. Compte rendu des essais SURICATE de Brest

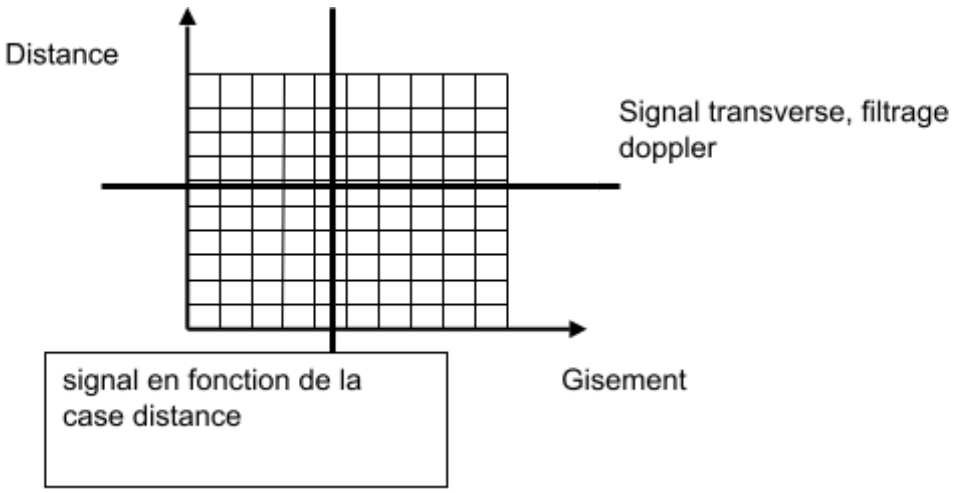
L'objectif de ce paragraphe est de:

- confirmer sur un théâtre grandeur nature les phénomènes observés qui ont servi de base à notre modèle. Ceci pourra être fait de manière synthétique par l'analyse spatio temporelle du signal codeur.
- déterminer pour une mer force 3 ou 5 les valeurs des niveaux de coefficients de rétrodiffusion liés aux spikes. Ces valeurs ne dépendant que de l'état de la mer, on peut supposer que l'influence du radar sera négligeable. Ceci sera fait à l'aide d' une analyse statistique

Le radar SURICATE est un radar de surveillance côtière en bande X. Lors des expérimentations, il était placé à l'extrémité de la Pointe Saint Mathieu, à une altitude de 50 m. La fenêtre distance était réglée pour les enregistrements autour de 5 km.

7.1 Analyse spatio temporelle du signal

L'analyse spatio-temporelle s'intéresse au signal par tour d'antenne en considérant l'évolution du module du signal en fonction de l'azimut (récurrences) et de la distance. L'analyse de ce signal est orientée "analyse d'image". Pour chaque tour le plan distance/azimut est l'équivalent d'une image en niveau de gris avec module = f(azimut, distance) qui pourra être ramené en coordonnées cartésienne dans le repère du radar pour faire une analyse cinématique plus facile. L'évolution en fonction du temps(tour d'antenne) peut être vue comme un film.

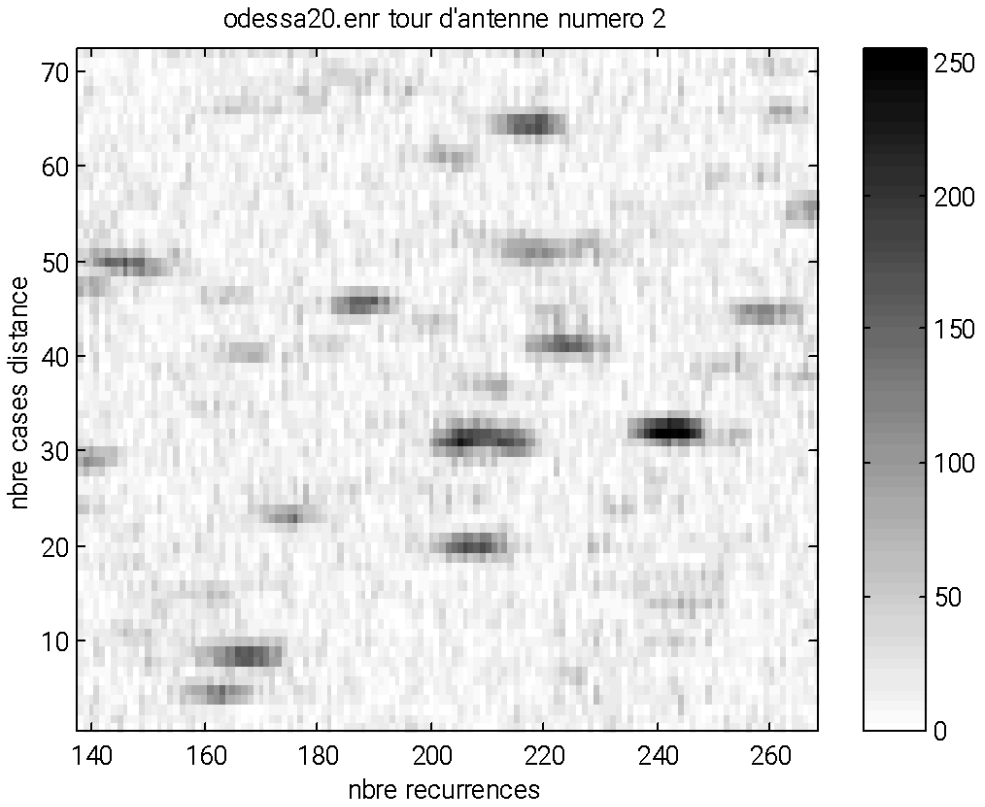


Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

Nous disposons d'un radar Haute Résolution distance (case distance de 2 m). L'analyse d'un tour d'antenne met en évidence la présence de quelques pointes de clutter de niveau élevé, dans une ambiance de niveau plus faible Il semble que ces pointes soient dues à la réflexion des ondes radar sur les crêtes de vagues, comme le suggère le paragraphe .6.5

Ci dessous on a représenté 1 tour d'antenne pour un fichier de fouillis enregistré à une distance de 5 km du radar, ce dernier étant à une altitude de 50 m (surveillance côtière).



Par ailleurs on observe en distance une modulation par l'impulsion et en azimut une modulation par le lobe d'antenne.

L'analyse spatio temporelle du signal de fouillis permet d'observer les spikes décrits dans l'analyse bibliographique. Ces spikes ont un niveau de 20 dB au dessus du bruit ambiant (diffus du fouillis de mer).

7.2 Analyse statistique du signal

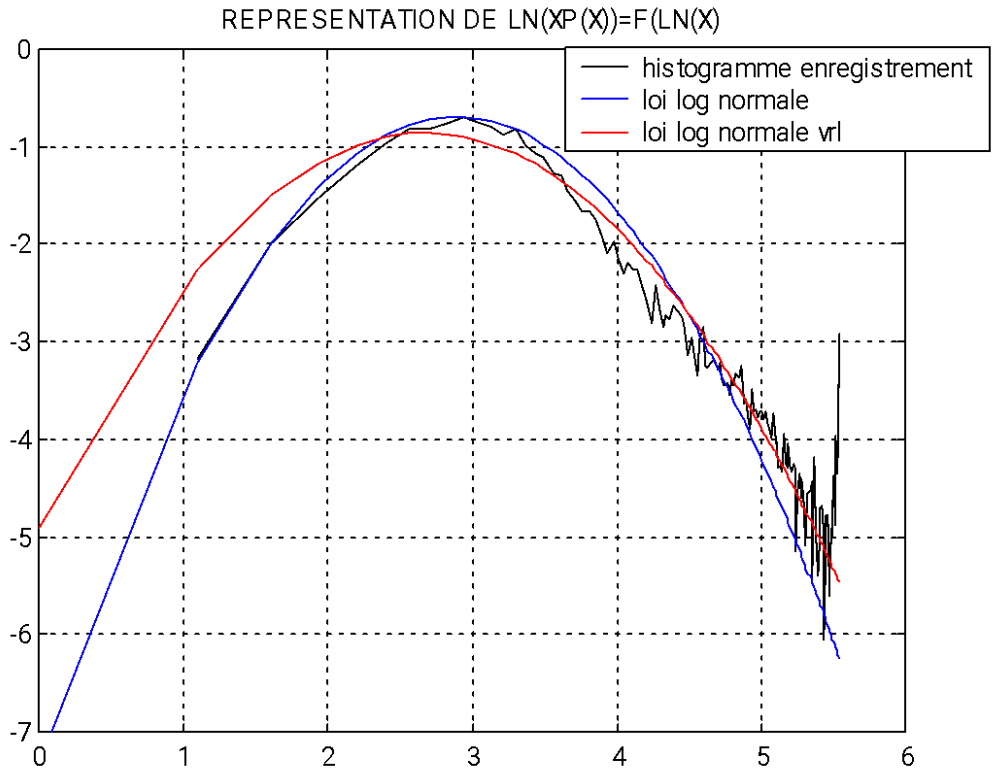
La mer possède en première approximation une structure isotrope. Ce qui signifie que quelque soit la direction d'observation, les amplitudes obéissent à la même loi statistique. Ceci est d'autant plus vrai dans le cas de notre étude que la plage distance est réduite

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

(fenêtre d'enregistrement sur quelques centaines de mètres pour les enregistrements Suricate). De plus on suppose que la fonction d'autocorrélation de la mer (filtre spatial) conserve la loi de probabilité initiale de répartition des amplitudes. C'est une hypothèse de fermeture au 1er ordre qui se justifie par la petite taille des cases distance (dans les cas des enregistrements Suricate). Aussi cette remarque conduit à construire un histogramme des amplitudes sur la totalité de l'enregistrement. On cherchera à fitter cet histogramme par une loi connue : loi lognormale, loi de Weibull,.

Le graphique ci-dessous présente la superposition des répartitions expérimentales avec le modèle lognormal.



<u>Le rapport des énergies reçues dues aux spikes et dues au phénomène diffus vaut 14 à 15 dB pour une mer force 2 à 3</u>

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

8. Dépouillement des essais BHR de Toulon

8.1 Choix des fichiers à dépouiller

Un choix de fichiers a été réalisé basé sur des considérations physiques. les propriétés statistiques du fouillis de mer dépendent des paramètres suivants:

- Etat de la mer
- Longueur d'onde du radar
- Angle d'incidence
- Polarisation

Les fichiers choisis couvrent pour les essais réalisés la diversité des cas, ce qui correspond à 60 cas (exploitation restreinte aux résolutions 1 m et 6 m cohérentes avec la définition du radar discret pour sous marin), et est résumé dans le tableau suivant:

		Polarisation Horizontale			Polarisation verticale		
		Bande X	Bande Ku	Agilité	Bande X	bande Ku	Agilité
Pas de vent	0°	2208F5R1	2208F1R6	2308AFR1	2208F5R1	2208F1R6	2308AFR1
	-2.5°	2208F5R1	2208F1R6	2308AFR1	2208F5R1	2208F1R6	2308AFR1
	-5°	2208F5R1	2208F1R6	2308AFR1	2208F5R1	2208F1R6	2308AFR1
	-7.5°	2208F5R1	2208F1R6	2308AFR1	2208F5R1	2208F1R6	2308AFR1
	-10°	2208F5R1	2208F1R6	2308AFR1	2208F5R1	2208F1R6	2308AFR1
Vent léger	0°	2308F4R1	2308F1R1		2308F4R1	2308F1R1	
	-2.5	2308F4R1	2308F1R1		2308F4R1	2308F1R1	

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

	-5°	2308F4R1	2308F1R1		2308F4R1	2308F1R1	
	-7.5°	2308F4R1	2308F1R1		2308F4R1	2308F1R1	
	-10°	2308F4R1	2308F1R1		2308F4R1	2308F1R1	

Nous avons laissé de côté les fichiers qui présentaient des anomalies (brouillage, échos parasites).

8.2 Démarche d'analyse

La fluctuation du fouillis de mer correspond au facteur de forme de la loi statistique de l'amplitude du signal reçu. Ce facteur de forme est déterminant dans la détermination du comportement asymptotique de la loi de fluctuation nécessaire pour évaluer la fausse alarme.

La démarche pour analyser ce facteur de forme est la suivante:

- Supprimer la composante moyenne du signal par comparaison à un signal de référence
- Visualiser le signal des fluctuations dans le plan distance/ récurrences puisque nous travaillons à antenne arrêtée.
- Supprimer les échos parasites
- Etablir un histogramme des fluctuations et le comparer à des modèles connus: Weibull, Rayleigh.

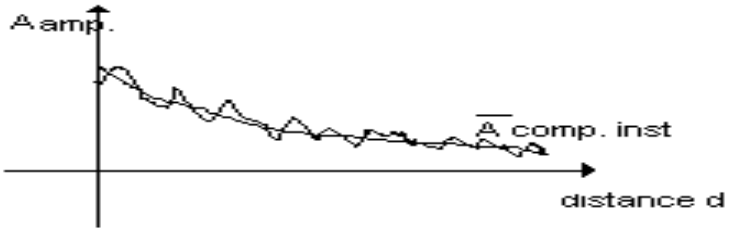
Cette approche consiste à étudier l' amplitude du signal de fouillis comme une image dans le plan gisement/distance. Ce signal se construit à partir de deux composantes: une valeur moyenne dépendant uniquement de la distance (Pouvoir réflecteur du fouillis) et une composante fluctuante que nous considèrerons stationnaire au second ordre i.e. représentable par un autospectre et une loi de répartition. Dans toute cette approche nous supposons une phase du fouillis de répartition uniforme.

8.2.1 Suppression de la composante continue.

Une fois corrigé du diagramme d'antenne, le niveau de fouillis se représente en fonction de la distance de la façon suivante:

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



$A = \overline{A(d)} * N(d)$ avec $\overline{A(d)}$ composante instationnaire du signal qui ne dépend que de la distance

(moyenne effectuée sur toutes les récurrences).

et $N(d)$ un estimateur du bruit associée à l'amplitude $\log(A)$

On réalise une double étude:

$$\ln(A) = \ln(\overline{A(d)}) + \ln(N(d))$$

D'une part on évalue la composante instationnaire $\overline{A(d)}$ par une moyenne glissante sur trois cases distance et sur toutes les récurrences. $$\ln(\overline{A(d)}) = \frac{\sum_{d_{i-1}}^{d_{i+1}} \sum_{j=1}^{j=nb_rec} A(d_i, rec_j)}{3 * nb_rec}$$

D'autre part on estime le bruit $N(d)$ associé au signal de la façon suivante:

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

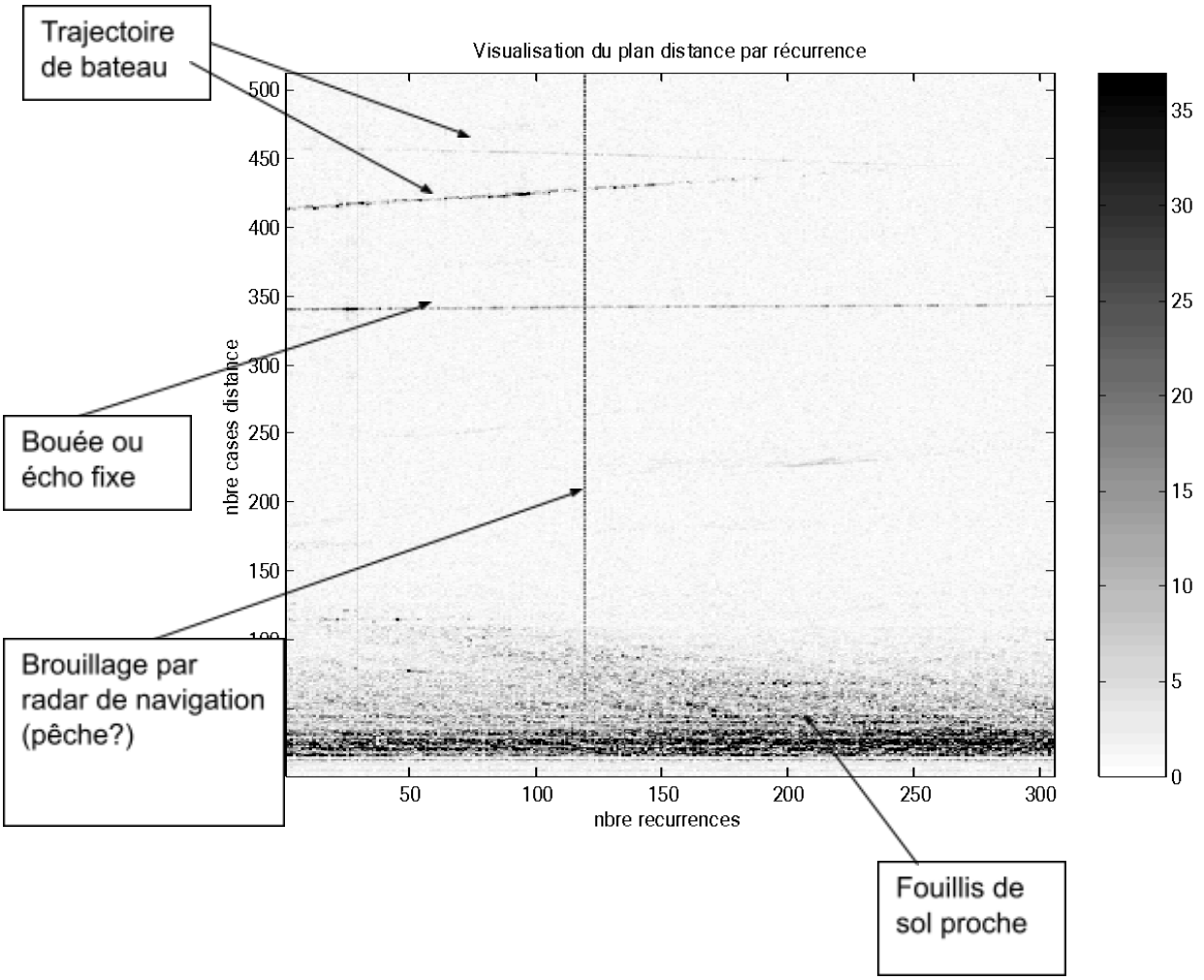
This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

$$\ln(N(d)) = \ln(A(d)) - \ln(\overline{A(d)})$$

Les amplitudes traitées sont les amplitudes corrigées.

8.2.2 Visualisation du signal radar et suppression des échos parasites

Après la suppression du signal de référence, l'image obtenue pour un fichier de fouillis a la forme suivante:



Il s'agit alors de supprimer les échos gênants pour faire une analyse statistique.

Ces échos apparaissant:

- comme des traces linéaires, ce qui suggèrerait l'utilisation d'une transformée de hough puis d'un filtrage pour les éliminer.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

- ayant un niveau élevé par rapport à l'écart type de la distribution, ce qui suggère de seuiller et d'éliminer les points correspondants.

8.2.3 Analyse statistique

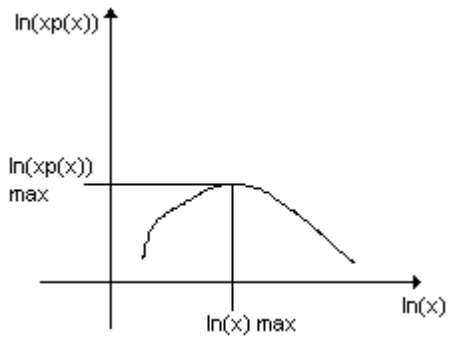
La mer possède en première approximation une structure isotrope. Ce qui signifie que quelque soit la direction d'observation, les amplitudes obéissent à la même loi statistique. Ceci est d'autant plus vrai dans le cas de notre étude que la plage distance est réduite. De plus on suppose que la fonction d'autocorrélation de la mer (filtre spatial) conserve la loi de probabilité initiale de répartition des amplitudes. C'est une hypothèse de fermeture au 1er ordre qui se justifie par la petite taille des cases distance. Aussi, cette remarque conduit à construire un histogramme des amplitudes sur la totalité de l'enregistrement. On cherchera à fitter cet histogramme par une loi connue : loi de Rayleigh, loi de Weibull, loi lognormale.

8.2.3.1 Fit de l'histogramme par une loi lognormale

On choisit dans un premier temps de fitter l'histogramme de l'enregistrement complet par une loi lognormale. Pour cela on cherche à évaluer les paramètres de forme et d'échelle de la loi lognormale de deux façons différentes.

<u>Première méthode:</u>

Cette évaluation des paramètres de forme et d'échelle consiste à donner une représentation logarithmique de $x * p(x)$ en fonction de $\ln(x)$, à en trouver le maximum afin d'une part de déterminer μ puis α. Cette méthode présente l'avantage d'être simple. Cependant , elle est sensible au bruit statistique au voisinage de l'extremum. En effet, on a :



Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

On part de : $$p(x) = \frac{1}{x * \sqrt{\pi\alpha}} \exp(\frac{-(\ln(x) - \mu)^2}{\alpha})$$ (1) densité de probabilité d'une loi lognormale où α désigne le paramètre de forme et μ désigne le paramètre d'échelle.

On multiplie l'expression (1) par x: 2)

$$x * p(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi\alpha}} \exp(\frac{-(\ln(x) - \mu)^2}{\alpha}) \quad ($$

On prend le logarithme de l'expression(2):

$$\ln(xp(x)) = -\ln(\sqrt{\pi\alpha}) - \frac{(\ln(x) - \mu)^2}{\alpha}$$

Dans ces conditions, le paramètre d'échelle (qui décrit la "hauteur " de la courbe) est donné par :

$\mu = \ln(x)$ pour $\ln(xp(x))$ maximum (= $\ln(xp(x))_{\max}$.

On en déduit alors le paramètre de forme (α) qui décrit l'écartement de la répartition.

$$\alpha = \frac{1}{\pi (xp(x))^2_{\max}}$$

A partir de l'estimation des paramètres α et μ , on trace la fonction de densité de probabilité d'une loi lognormale sur l'histogramme de l'enregistrement.

Deuxième méthode:

On utilise les outils d'estimation statistiques basés sur l'estimation des moments à partir des échantillons. Cette méthode consiste à estimer les paramètres de forme (α) et d'échelle (μ) à partir de la définition d'un processus lognormal (exponentielle d'un processus normal). L'estimation des paramètres α et μ consiste en une

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

moyenne et une variance sur le logarithme du processus selon le principe du maximum de vraisemblance.

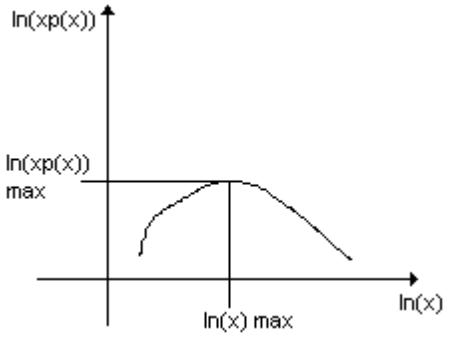
$$p(x) = \frac{1}{x * \sqrt{\pi\alpha}} \exp(\frac{-(\ln(x) - mu)^2}{\alpha})$$

8.2.3.2 Fit de l'histogramme par une loi de Weibull ou de Rayleigh

On cherche à fitter l'histogramme de l'enregistrement complet par un loi de Weibull. Pour cela on cherche à évaluer les paramètres de forme η et d'échelle A de la loi de Weibull de trois façons différentes.

Première méthode:

Ce principe d'estimation consiste à évaluer les paramètres η et A en recherchant le max de ln(xp(x)) en fonction de ln(x).



On part de : $p(x) = \eta A (Ax)^{\eta-1} \exp(-(Ax)^{\eta})$ (3)

On multiplie l'expression (3) par x: $x * p(x) = \eta (Ax)^{\eta} \exp(-(Ax)^{\eta})$ (4).

On prend le logarithme de (4).

$$\ln(x * p(x)) = \ln(\eta) + \eta \ln(A) + \eta \ln(x) - A^{\eta} \exp(\eta \ln(x))$$

On pose $u = \ln(x)$

On cherche l'abscisse u pour lequel $\ln(xp(x))$ est maximal. Le paramètre d'échelle est alors défini par $u_{\max}$.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

Soit $\frac{\partial(\ln(xp(x))}{\partial \ln(x)} = \eta(1 - A^{\eta} \exp(\eta \ln(x))$ (5)

On cherche $\ln(x)$ pour lequel (5)=0 ce qui nous donne $\ln(x)_{\max} = -\ln A$.

donc le paramètre d'échelle A est défini de la façon suivante: $A = \exp(-\ln(x)_{\max})$

On en déduit le paramètre de forme η : $\eta = \exp(\ln(xp(x))_{\max} + 1)$

A partir de l'estimation des paramètres η et A, on trace la fonction de densité de probabilité d'une loi de Weibull sur l'histogramme de l'enregistrement.

Deuxième méthode:

On cherche l'abscisse correspondant au max de $x * p(x)$.

On part de $p(x) = \eta A(Ax)^{\eta-1} \exp(-(Ax)^{\eta})$ (3)

On pose $Z = Ax$ alors (3) devient $p(Z) = \eta A Z^{\eta-1} \exp(-Z^{\eta})$.

On cherche alors Z tel que $p(Z)$ soit max ou encore $p'(Z) = 0$

On obtient $Z = \left(\frac{\eta - 1}{\eta}\right)^{\frac{1}{\eta}}$. On déduit que l'abscisse correspondante au max de $x * p(x)$ est $x_{\max} = \frac{1}{A}\left(\frac{\eta - 1}{\eta}\right)^{\frac{1}{\eta}}$ (6).

On effectue une recherche sur le fichier d'enregistrement du max de $x * p(x)$. On en déduit l'abscisse correspondante c'est à dire $x_{\max}$.

La valeur retenue pour η est celle qui annule l'expression (7) (équation transcendante).

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

$$x_{\max} * p(x)_{\max} = (\eta - 1)\exp(-\frac{\eta - 1}{\eta}) \quad (7).$$

Puis on peut facilement déterminer A à partir de la formule (6).

$$A = \frac{1}{x_{\max}}\left(\frac{\eta - 1}{\eta}\right)^{\frac{1}{\eta}}$$

Ces méthodes présentent des limites et se montrent également sensibles au bruit statistique au voisinage de l'extremum.

Troisième méthode:

L'estimation est réalisée en déterminant une moyenne et une variance sur la puissance du processus (principe du maximum de vraisemblance)

$$p(x) = \eta A(Ax)^{\eta - 1}\exp(-(Ax)^{\eta}) .$$

9. Synthèse et conclusion

9.1 Paramètre d'échelle des fluctuations

Le tableau suivant permet de comparer la densité de SER en fonction de la polarisation émise / reçue pour un même jour d'expérimentation.

Fréquence	Polarisation	Résolution 0.1m	Résolution 1m	Résolution 6m	Modèle de Wright (incidence 2,5°)
Bande X	**HH**	-80	-80	-70	-75
Bande X	**VV**	-65	-60	-55	-55

Densité de SER à 50m du radar Mesures du 22/08

La différence positive entre les polarisations VV et HH est cohérente avec le modèle de Wright. Ceci implique qu'à incidence faible et à mer calme, le critère de Rayleigh s'applique. La valeur moyenne du coefficient de rétrodiffusion est liée à la diffraction des ondes radar à la surface de l'eau. Le coefficient de rétrodiffusion moyen dépend:

- de la longueur d'onde et de la polarisation du radar

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

- de l'angle d'incidence

Le modèle de WRIGHT semble coincider.

9.2 Loi de fluctuation

L'analyse des fichiers BHR a permis de dégager 2 grands types de comportement:

- Lorsque la mer est calme, les fluctuations de niveau de fouillis sont assez bien représentées par une loi de Weibull. Le comportement asymptotique des fluctuations est rapide. Ceci peut s'expliquer en remarquant que par mer calme, la surface de la mer est assez plane, ce qui veut dire que les facettes de mer réfléchissantes tournées vers le radar sont très rares. Le paramètre de forme de la loi ne dépend que de l'état de la mer.
- Lorsque la mer s'agite sous l'effet de la vitesse du vent, la surface se ride, faisant apparaître des facettes plus obliques ou des spikes. On voit alors apparaître des niveaux élevés de fluctuation (20 dB au dessus du bruit de fond). Ces pointes de bruit peuvent se modéliser par une loi de probabilité non gaussienne (Loi log normale par exemple). Les essais de Brest confirment les valeurs des niveaux de fluctuation pour les spikes: 20 ou 30 dB au dessus du bruit de fond. le paramètre de forme de la loi ne dépend que de l'état de la mer. le comportement du fouillis semble alors très analogue aux résultats de l'expérience citée en référence [5].

9.3 Modèle de fouillis retenu

9.3.1 Exposé du modèle

Suite à l'analyse bibliographique et aux dépouillements effectués, nous pouvons établir un modèle de fouillis utilisable dans le cas du radar discret pour sous marin.

Les éléments qui sont à la base de la rétrodiffusion de la mer sont les vagues. Il faut distinguer 2 sortes de vagues:

- Les vagues de gravité, liées à la force de gravité, que l'on peut voir en œuvre lorsque le vent se met à souffler. La rétrodiffusion de ces structures obéit à l'approximation de l'optique géométrique et se définit par une rétrodiffusion spéculaire d'une structure rugueuse, caractérisée par une répartition statistique de facettes. Nous avons constaté qu'une modélisation adéquate était une répartition de Lévy, dont la dimension fractale était directement liée à l'état de mer. La présence de spikes ou de facettes bien orientées conduit à de grandes valeurs de signal assez fréquentes. Ceci conduit à une répartition

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

statistique des coefficients de rétrodiffusion organisée selon une loi non gaussienne: lognormale, Lévy ….. Le paramètre d'échelle de cette loi correspond à la valeur calculée au paragraphe 6.4. le facteur de forme dépend uniquement de l'état de la mer.

- Les vagues de capillarité, liées aux phénomènes de tension superficielle dont la rétrodiffusion peut être observée à mer calme. Elles sont caractérisées par le critère de Rayleigh et se comportent comme un réseau de diffraction ou un ensemble de points brillants cohérents. la répartition statistique des coefficients de rétrodiffusion est une loi à décroissance rapide: Rayleigh ou Weibull. le facteur d'échelle de cette loi peut être calculé par le modèle de Wright .

Sur une mer formée ces deux composantes se superposent. Comme les caractéristiques spectrales (longueur d'onde et bande spectrales) des ondes de gravité et des ondes de capillarité sont différentes, une relation additive peut convenir.

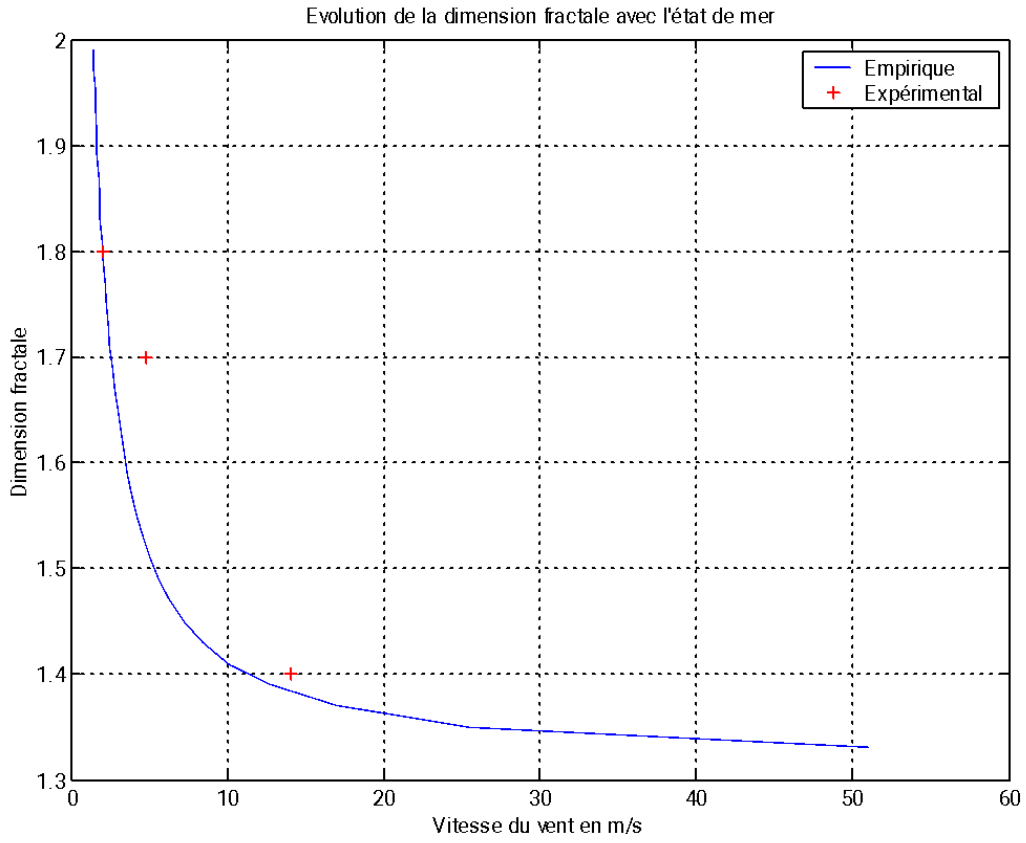
La synthèse pour la composante spéculaire entre états de mer faibles (Force inférieure à 2) et états de mer élevés (force supérieure à 2) passe par une modélisation de la répartition des coefficients de rétrodiffusion par une loi de Lévy:

- En effet, nous pouvons dire que la proportion de valeurs élevées de signaux supérieures à un niveau donné est directement égale à la proportion de facettes de mer dont la pente est supérieure à une valeur donnée. Ceci nous conduit à modéliser la loi de répartition des niveaux de mer par une loi de lévy dont la dimension fractale est égale à celle du relief de la mer.
- Les mesures effectuées
    - sur les enregistrements de fouillis du SURICATE,
    - sur les enregistrements BHR (mer agitée)
    - pour l'état de mer 5, de l'analyse des données de la référence[5],

analysées avec cette méthode (cf annexe 6) sont superposées sur la planche ci-dessous avec la loi d'évolution empirique de la dimension fractale de la surface de mer via la vitesse du vent.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



9.3.2 Modélisation d'un processus de Lévy.

La référence [12] donne les formules permettant de modéliser un bruit de Lévy de dimension fractale D. Considérons:

- Une variable uniforme U entre -π/2 et +π/2
- Une variable de répartition exponentielle W de moyenne unitaire: une répartition de ce type se simule comme la somme des carrés de 2 variables gaussiennes indépendantes.
- Un coefficient positif ξ et une dimension D compris entre 1 et 2 (1 Cauchy, 2 Gauss) calculés par les formules des paragraphes précédents.

Le processus de Lévy se déduit de la formule de tirage suivante:

$$Z = \frac{\sin(DU)}{(\cos(U))^{1/D}} \times \left[\frac{\cos[(1-D)U]}{W}\right]^{\frac{1-D}{D}}$$

9.3.3 Statistique des coefficients de rétrodiffusion

Le champ électromagnétique rétrodiffusé par la mer est la somme algébrique (variables I et Q) des champs spéculaire et diffus tirés avec des variables aléatoires indépendantes, lié aux diffractions de Bragg et aux réflexions sur les facettes de mer dont l'orientation est aléatoire (cf. paragraphe 7). Nous considèrerons que la géométrie du problème est donnée par le balayage du radar et que la répartition des niveaux de rétrodiffusion possède une symétrie

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

de révolution. Le modèle statistique lorsque la case distance est courte est donné par l'analyse HR distance.

9.3.4 Influence de la distance de corrélation (longueur d'onde de la houle)

On suppose une houle isotrope et formée caractérisée par la distance de corrélation qui s'identifie à la longueur d'onde de la houle. On suppose que cette corrélation se traduit par un filtre spatial dont la forme est la suivante

$$H(\Delta t, \Delta D, D) = \exp(-[\frac{\Delta D^2}{2\lambda^2} + \frac{\Omega^2 D^2 \Delta t^2}{2\lambda^2}])$$

Δt et ΔD sont des paramètres locaux en distance et en temps (Azimut)

Ω est la vitesse de rotation de l'antenne.

9.3.5 Fonction d'appareil du Radar

Elle se traduit par la modulation par le lobe d'antenne en gisement et par le filtre de compression d'impulsion en distance.

9.3.6 Corrélation temporelle

Pour une case donnée du plan gisement/Distance, nous considérons la suite des échantillons en fonction du temps (tours d'antenne). la corrélation dans le temps se traduit par un filtre temporel gaussien de durée caractéristique égale à la période T de la houle.

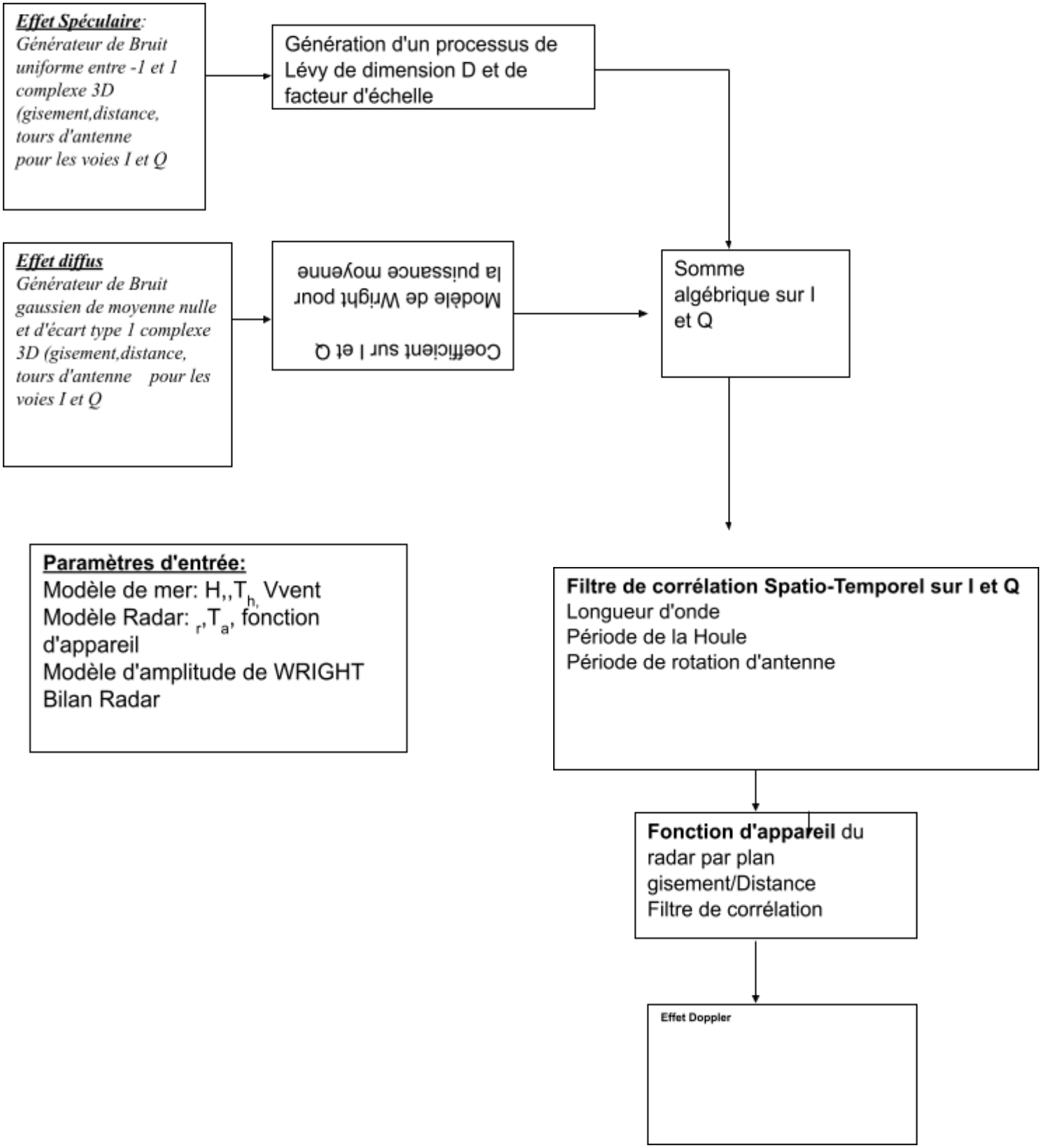
$$H(n) = \exp(-\frac{n^2}{2}\frac{T^2{}_a}{T^2{}_h})$$

pour n variant entre $\pm 3\frac{T_h}{T_a}$

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

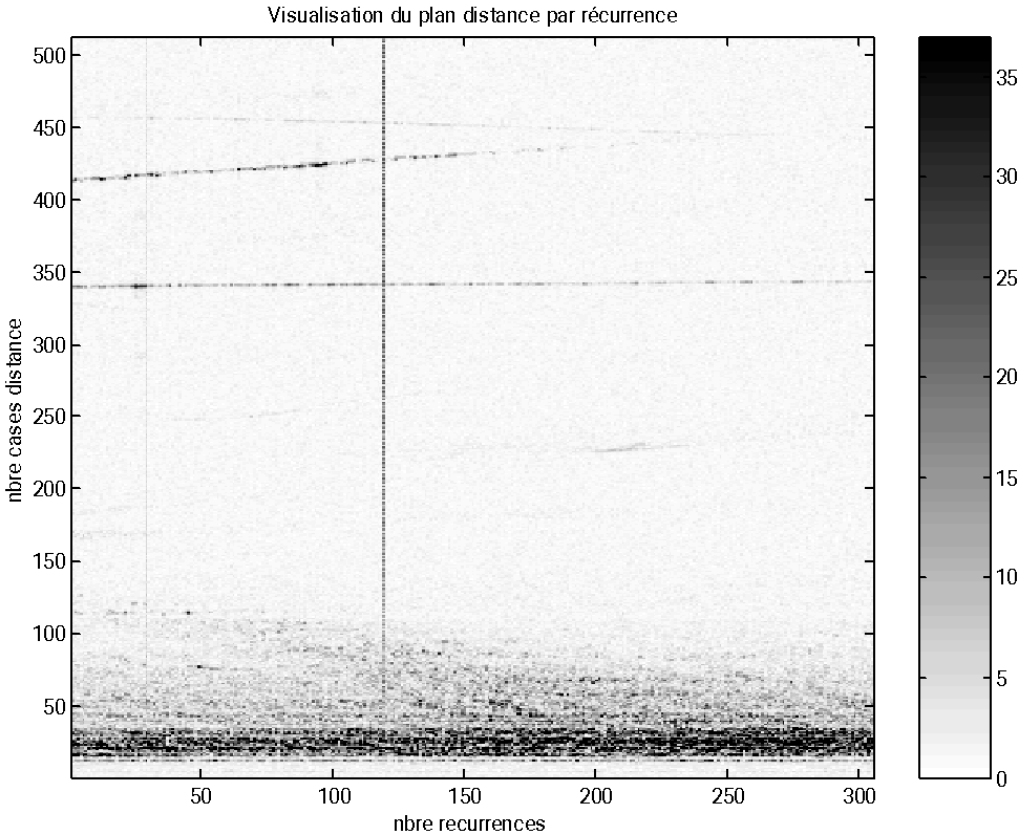
9.3.7 Synoptique global



Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

10. Annexe 1: Dépouillement des fichiers 2208F1R6

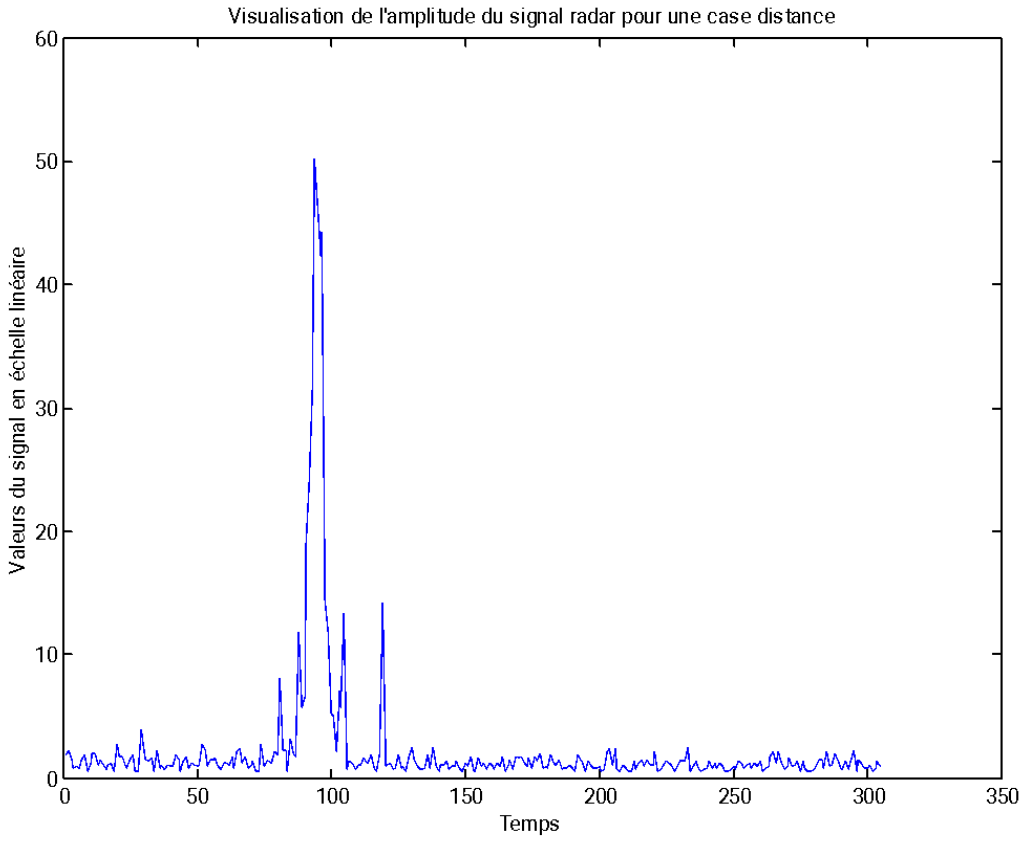


A titre d'exemple nous présentons les résultats du dépouillement du fichier à site 0° en polarisation horizontale.

Le diagramme ci-dessus représente l'image vidéo de la fluctuation du signal radar. On peut distinguer le fouillis de sol en zone proche, une bouée (case distance 350) et un bateau en éloignement (cases distances supérieures à 400)

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

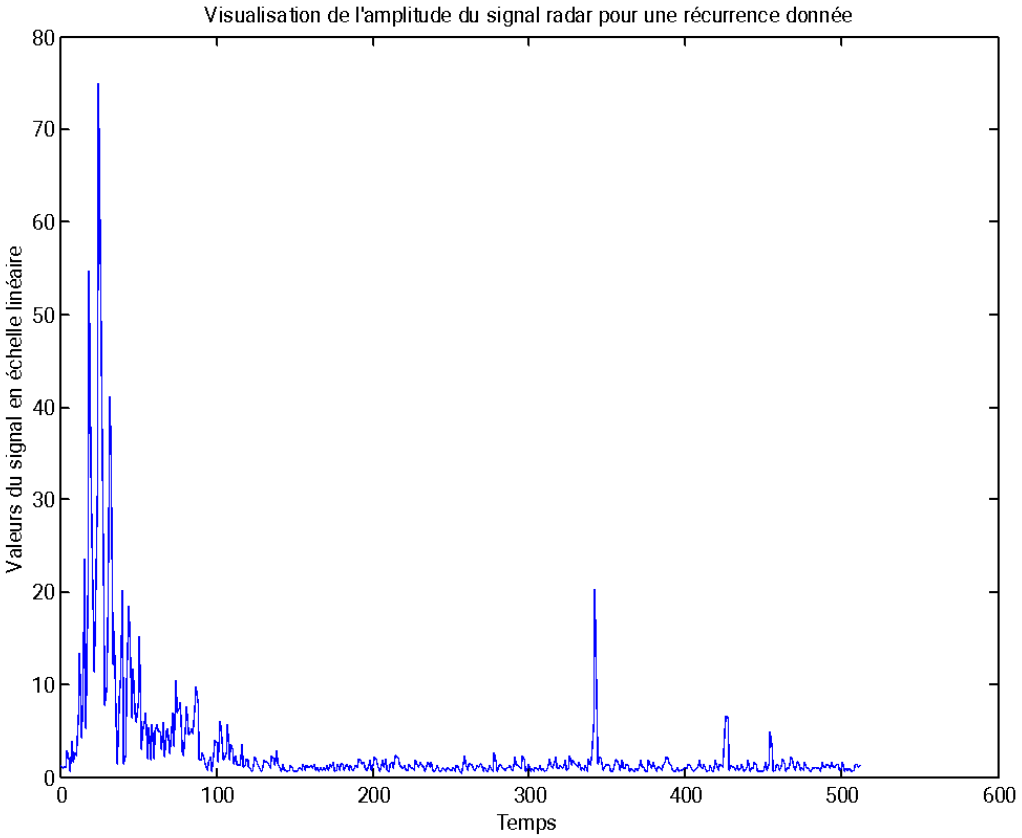


Le diagramme ci dessus représente l'amplitude du signal pour une case distance (ici 425). On observe un gros écho très certainement lié à un bateau.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

L

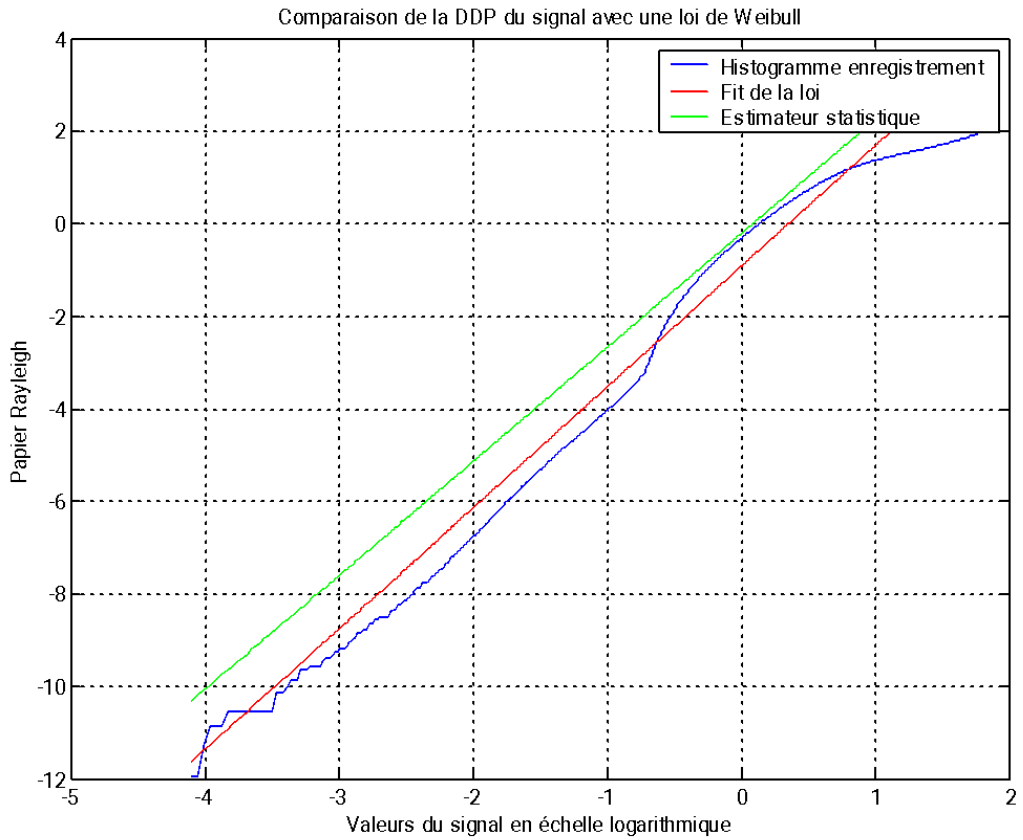


Le diagramme ci-dessus représente l'évolution du signal pour une récurrence donnée. On voit apparaître le fouillis de sol dans les s cases proches. D'autres échos apparaissent:

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

bouées et éventuellement vagues formées.

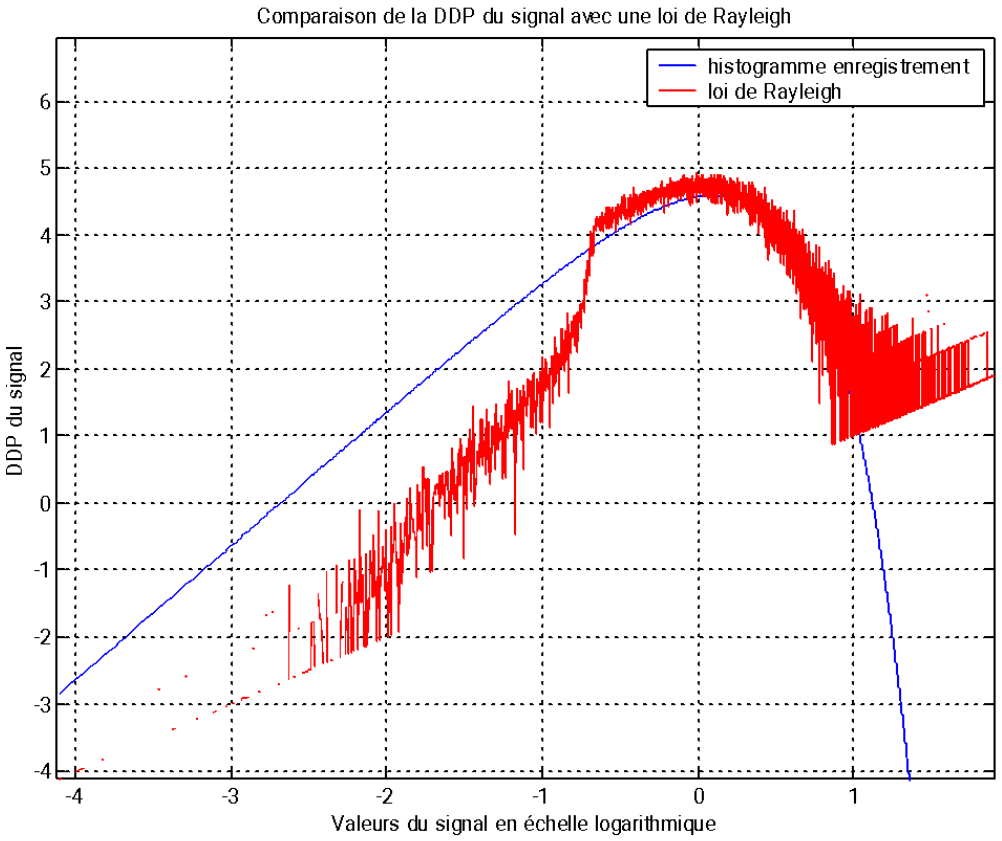


Le diagramme ci dessus représente l'analyse statistique de la probabilité cumulée des fluctuations du signal vidéo, exprimée sur une échelle de rayleigh. Sur une telle représentation les répartitions obéissant à une loi de Weibull ou de Rayleigh apparaissent sous forme d'un nuage de points alignés sur une droite dont la pente correspond au facteur de forme .

Nous observons un alignement des points, ce qui nous conduit à chercher un modèle de Rayleigh ou de Weibull.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

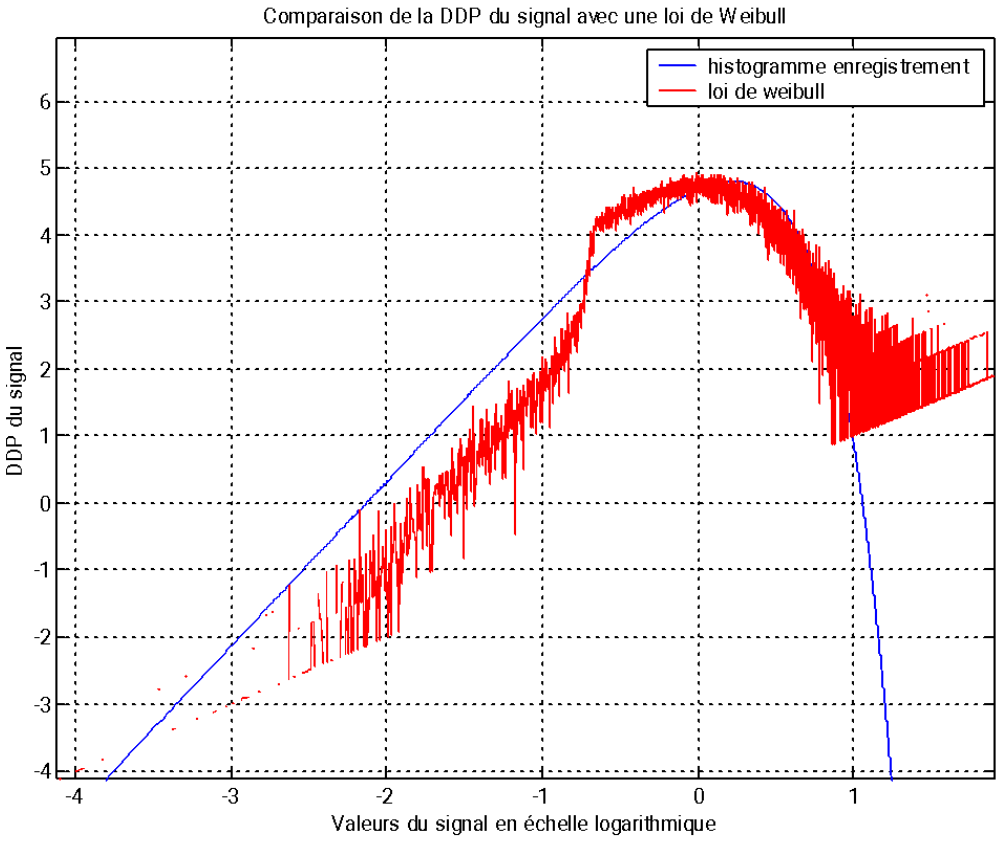
This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



Le diagramme ci-dessus représente le fit de l'histogramme des fluctuations avec une loi de Rayleigh de facteur d'échelle A = 0,79 . Le comportement de l'histogramme au voisinage du maximum semble correspondre ainsi que le comportement asymptotique.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



Le diagramme ci-dessus représente le fit de l'histogramme des fluctuations avec une loi de Weibull de facteur d'échelle A = 0,79 et d'exposant 2,4. Le comportement de l'histogramme au voisinage du maximum semble correspondre ainsi que le comportement asymptotique.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

Le dépouillement des différents fichiers a conduit au tableau suivant

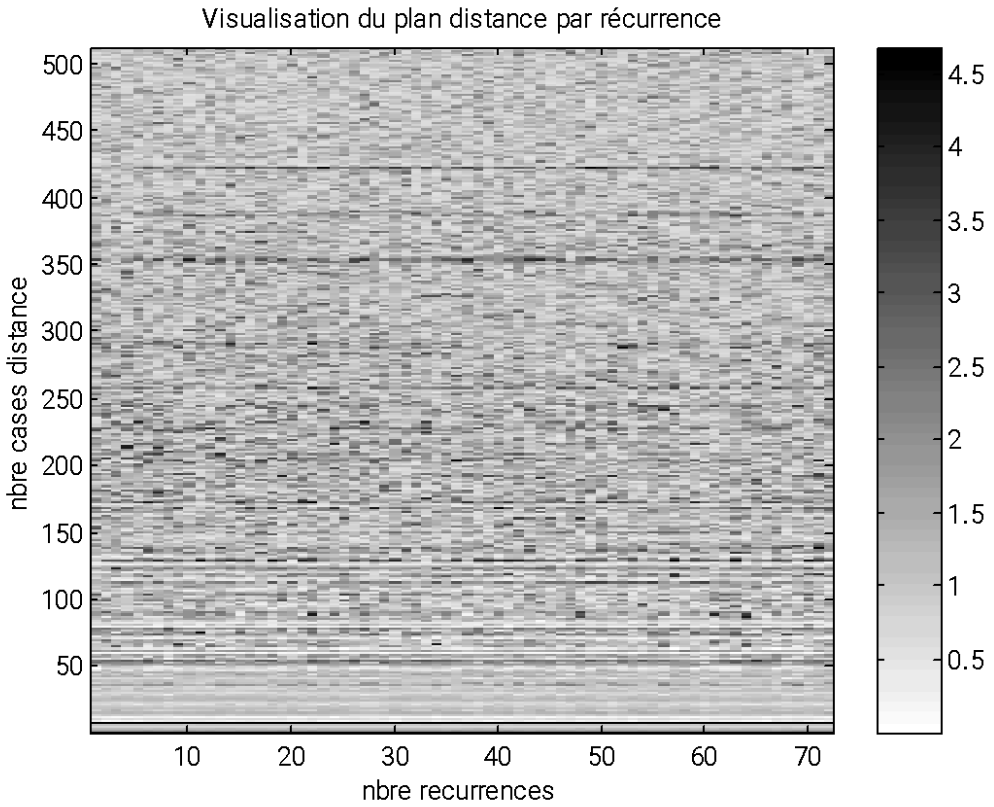
Site	Polarisation	Type de loi	Paramètre d' échelle	Paramètre de forme
0°	HH			
	VV			
2,5°	HH	Weibull	0,74	1,84
	VV	Weibull	0,81	2,77
5°	HH	Weibull	0,82	2,91
	VV	Weibull	0,82	2,93
7,5°	HH	Weibull	0,83	3,03
	VV	Weibull	0,83	3
10°	HH	Weibull	0,83	3,12
	VV	Weibull	0,84	3,02

En première approximation, le paramètre de forme de la loi ne semble dépendre ni de la polarisation, ni de l'angle d'incidence.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

11. Annexe 2: Dépouillement des fichiers 2208F5R1

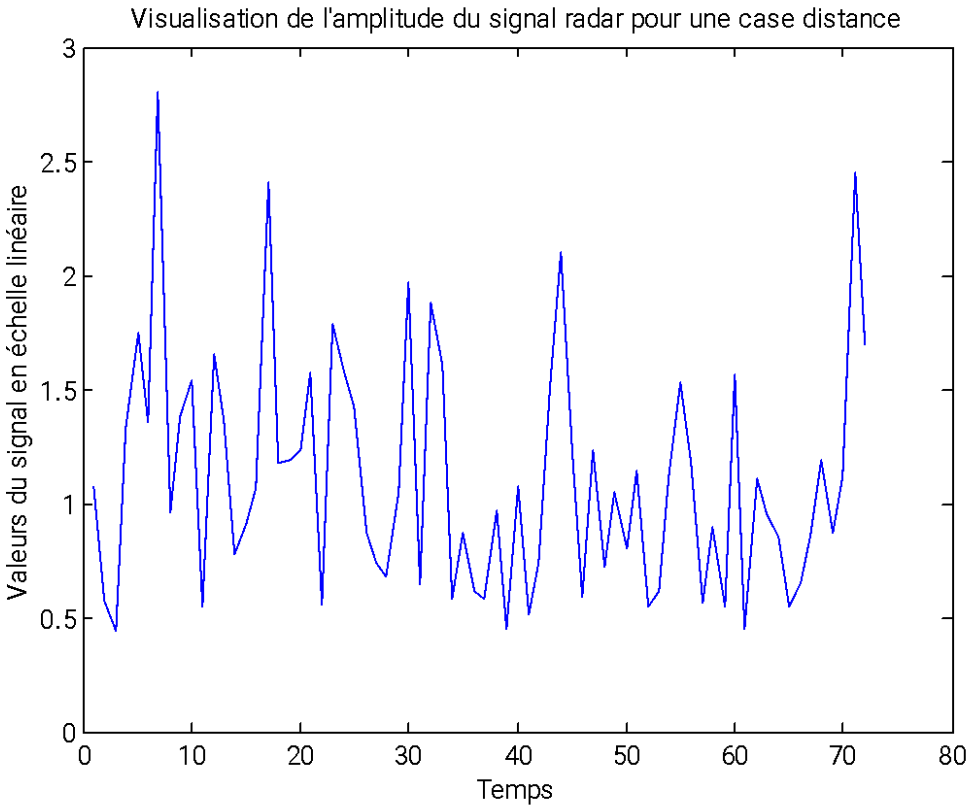


Le diagramme ci-dessus représente l'image vidéo de la fluctuation du signal radar. On peut distinguer un bruit uniforme sur tout l'enregistrement.

A titre d'exemple nous présentons les résultats du dépouillement du fichier à site 0° en polarisation horizontale.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

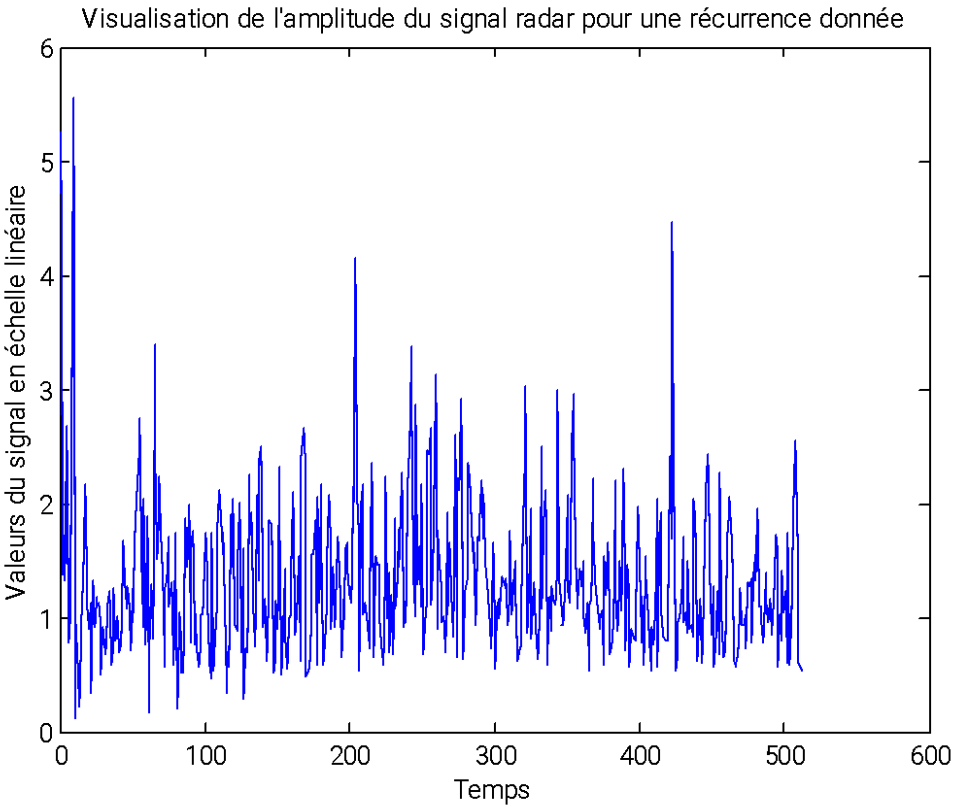
This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



Le diagramme ci dessus représente l'amplitude du signal pour une case distance (ici 425).

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

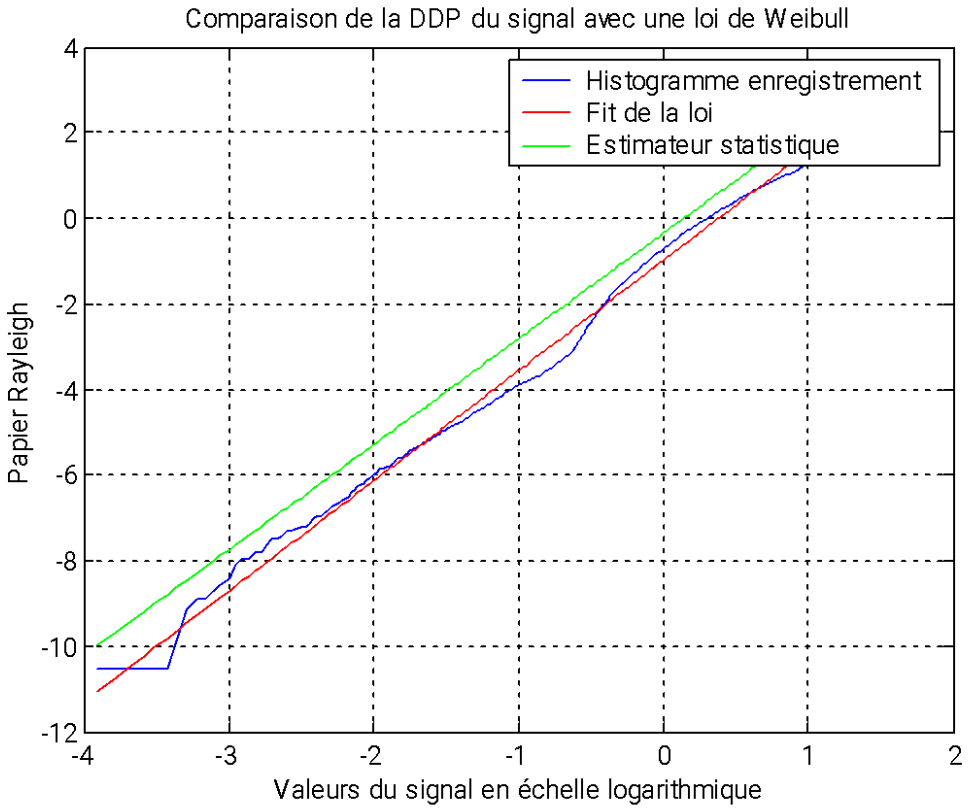
This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



Le diagramme ci-dessus représente l'évolution du signal pour une récurrence donnée.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



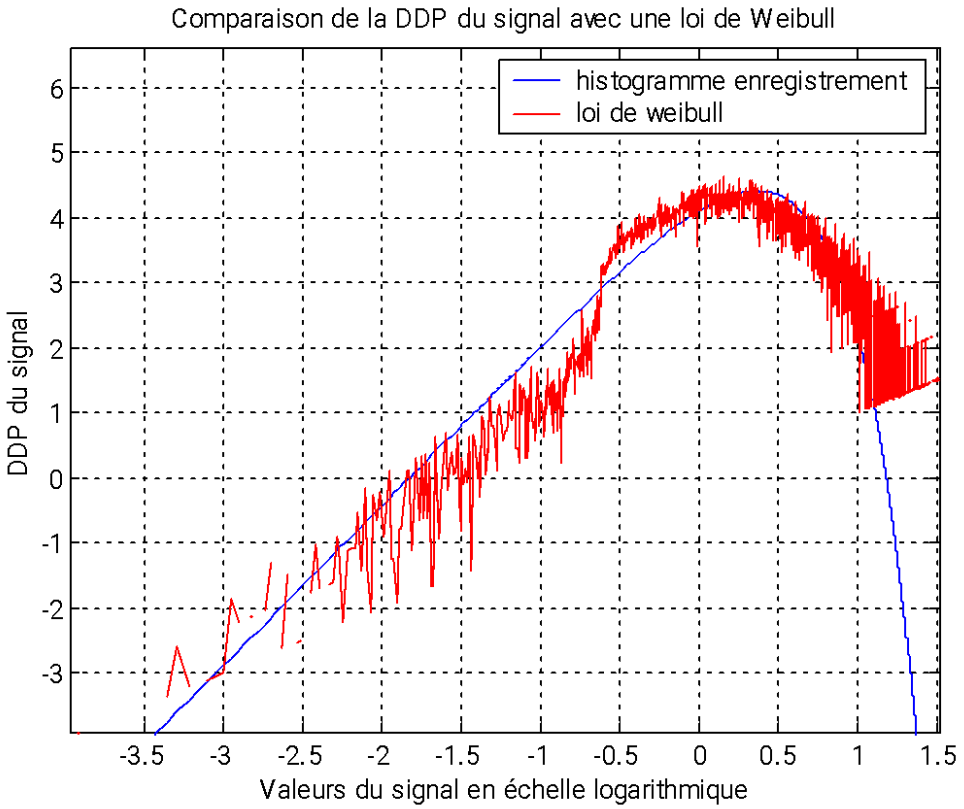
.

Le diagramme ci dessus représente l'analyse statistique de la probabilité cumulée des fluctuations du signal vidéo, exprimée sur une échelle de rayleigh. Sur une telle représentation les répartitions obéissant à une loi de Weibull ou de Rayleigh apparaissent sous forme d'un nuage de points alignés sur une droite dont la pente correspond au facteur de forme .

Nous observons un alignement des points, ce qui nous conduit à chercher un modèle de Rayleigh ou de Weibull.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



Le diagramme ci-dessus représente le fit de l'histogramme des fluctuations avec une loi de Weibull de facteur d'échelle A = 0,82 et d'exposant 3,01. Le comportement de l'histogramme au voisinage du maximum semble correspondre ainsi que le comportement asymptotique.).

Les conditions expérimentales correspondent à une mer d'huile. Le phénomène observé correspond à des fluctuations dont l'amplitude est donnée par le niveau moyen de rétrodiffusion. Le paramètre de forme traduit une loi de probabilité des fluctuations à décroissance rapide: les pentes des facettes de mer orientées vers le radar sont en nombre très rare.

Le dépouillementr des différents fichiers nous a conduit au tableau suivant:

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

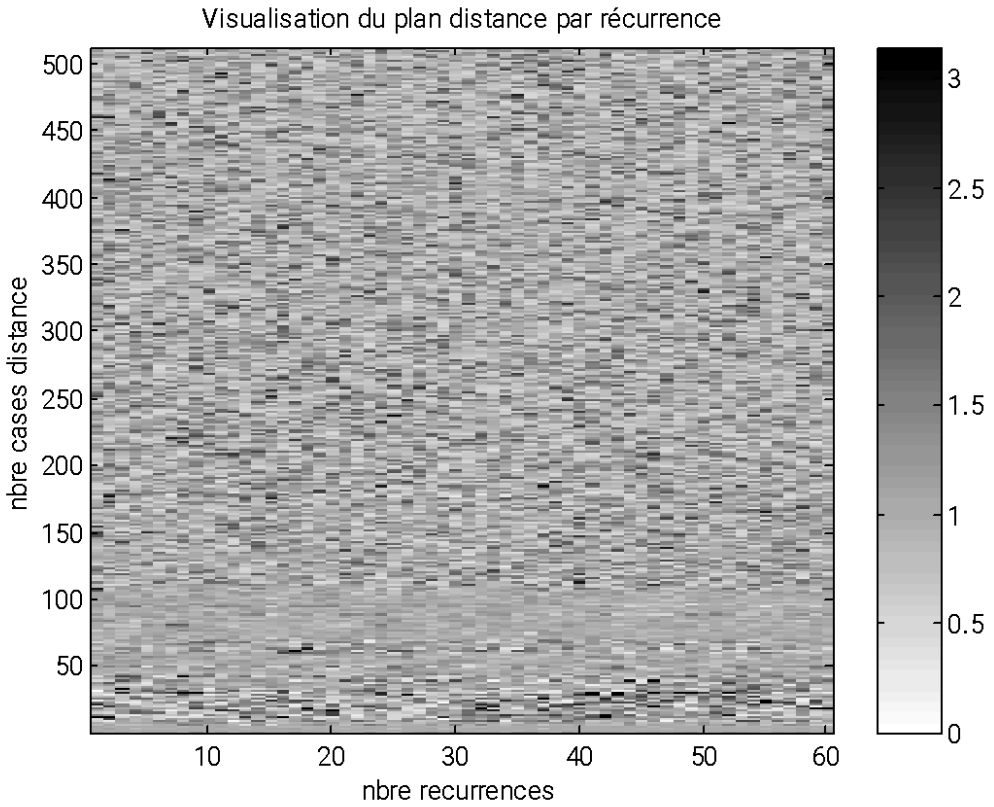
Site	Polarisation	Type de loi	Paramètre d' échelle	Paramètre de forme
0°	HH	Weibull	0,83	3,24
	VV	Weibull	0,82	3,01
2,5°	HH	Weibull	0,81	2,73
	VV	Weibull	0,75	2,2
5°	HH	Weibull	0,78	2,29
	VV	Weibull	0,73	1,81
7,5°	HH	Weibull	0,80	2,54
	VV	Weibull	0,74	1,83
10°	HH	Weibull	0,81	2,43
	VV	Weibull	0,77	2,2

En première approximation, le paramètre de forme de la loi ne semble dépendre ni de la polarisation, ni de l'angle d'incidence

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

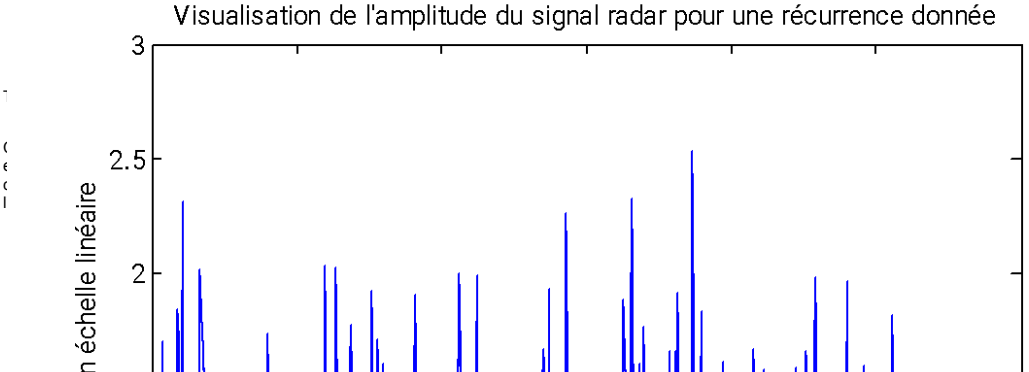
This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

12. Annexe 3: Dépouillement des fichiers 2208AFR1



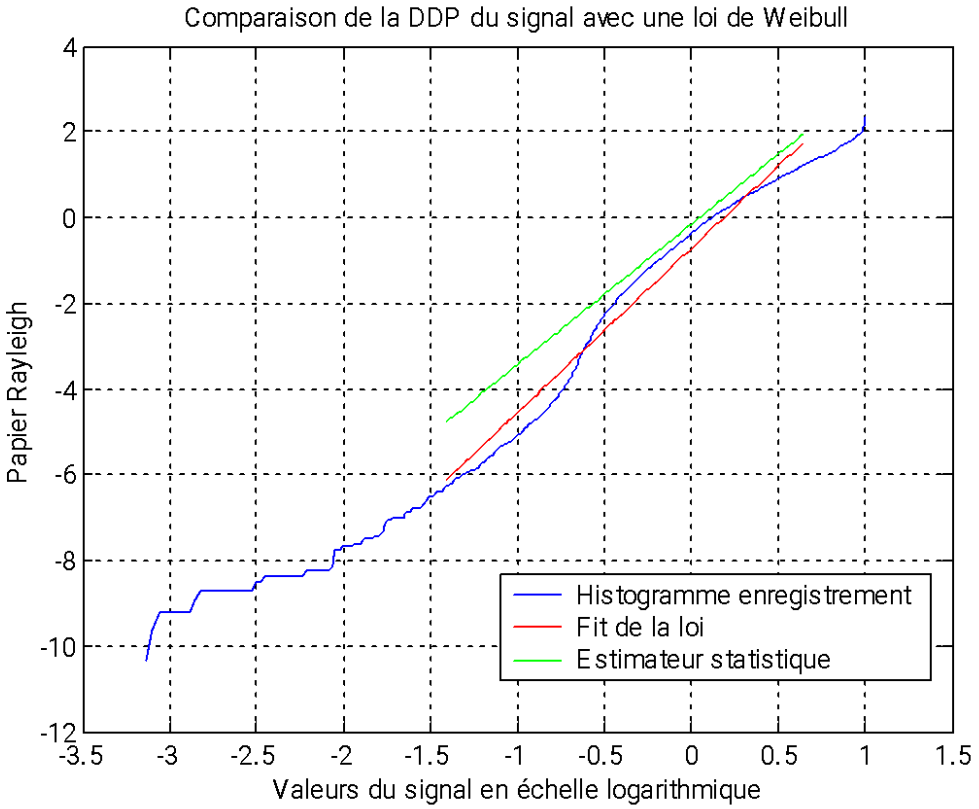
Le diagramme ci-dessus représente l'image vidéo de la fluctuation du signal radar

A titre d'exemple nous présentons les résultats du dépouillement du fichier à site 0° en polarisation horizontale.



of THALES and
person except to
f THALES.

Le diagramme ci-dessus représente l'évolution du signal pour une récurrence donnée. On observe un bruit borné en amplitude.



Le diagramme ci dessus représente l'analyse statistique de la probabilité cumulée des fluctuations du signal vidéo, exprimée sur une échelle de rayleigh. Sur une telle représentation les répartitions obéissant à une loi de Weibull ou de Rayleigh apparaissent sous forme d'un nuage de points alignés sur une droite dont la pente correspond au facteur de forme .

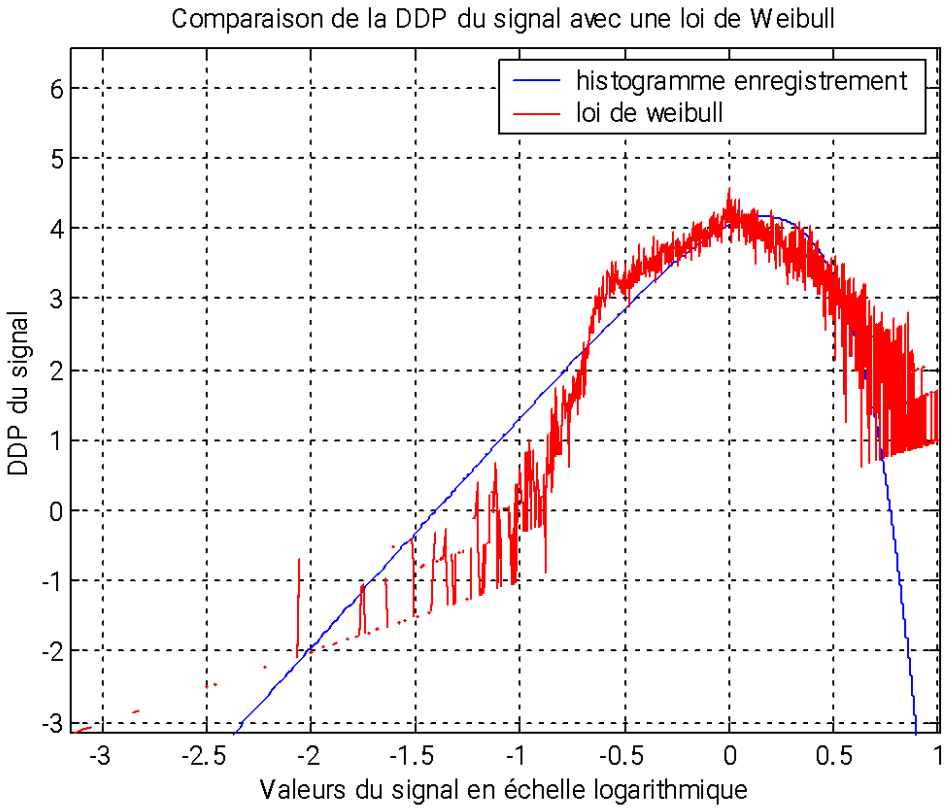
Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

Nous observons un alignement des points, ce qui nous conduit à chercher un modèle de Rayleigh ou de Weibull.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



Le diagramme ci-dessus représente le fit de l'histogramme des fluctuations avec une loi de Weibull de facteur d'échelle A = 0,79 et d'exposant 2,4. Le comportement de l'histogramme au voisinage du maximum semble correspondre ainsi que le comportement asymptotique. le creux dans la première partie de la courbe correspond aux faibles valeurs des fluctuations (quantification des codeurs?)

Les conditions expérimentales correspondent à une mer d'huile. Le phénomène observé correspond à des fluctuations dont l'amplitude est donnée par le niveau moyen de rétrodiffusion. Le paramètre de forme traduit une loi de probabilité des fluctuations à décroissance rapide: les pentes des facettes de mer orientées vers le radar sont en nombre très rare

Le tableau suivant donne les résultats des différents dépouillements.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

Site	Polarisation	Type de loi	Paramètre d' échelle	Paramètre de forme
0°	HH	Weibull	0,86	2,55
	VV	Weibull	0,83	2,95
2,5°	HH	Weibull	0,84	3,23
	VV	Weibull	0,83	3
5°	HH	Weibull	0,83	3,19
	VV	Weibull	0,83	3,18
7,5°	HH	Weibull	0,83	3,18
	VV	Weibull	0,83	3,12
10°	HH	Weibull	0,84	3,27
	VV	Weibull	0,84	3,27

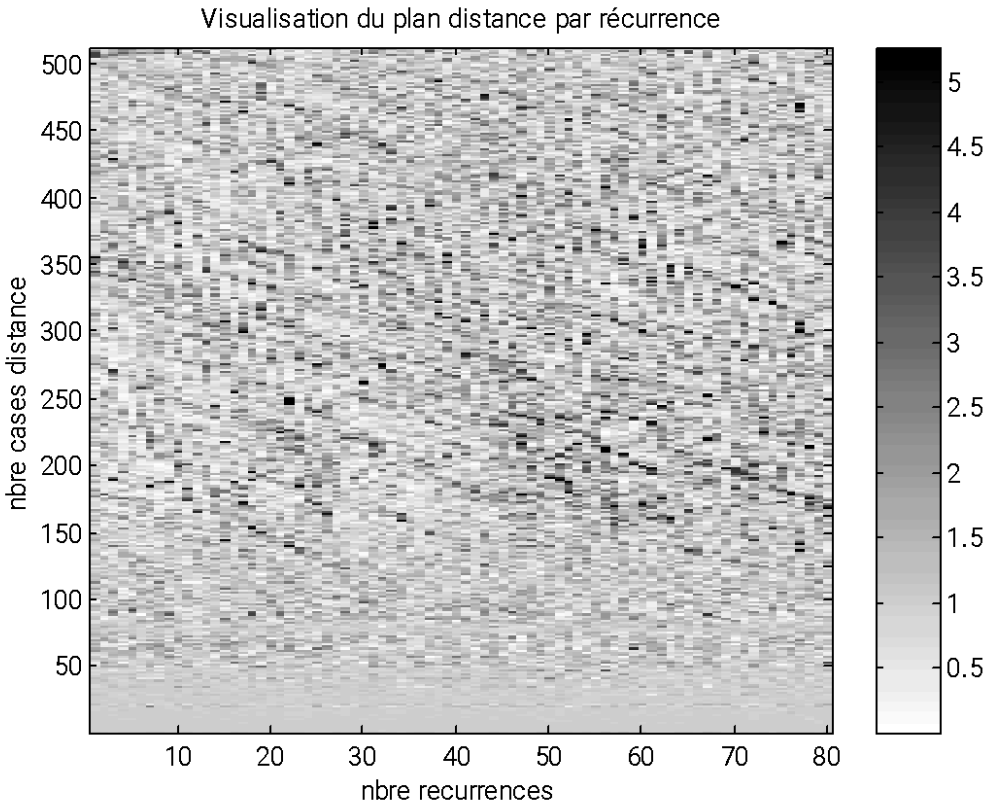
En première approximation, le paramètre de forme de la loi ne semble dépendre ni de la polarisation, ni de l'angle d'incidence

.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

13. Annexe 4: Dépouillement des fichiers 2308F1R01



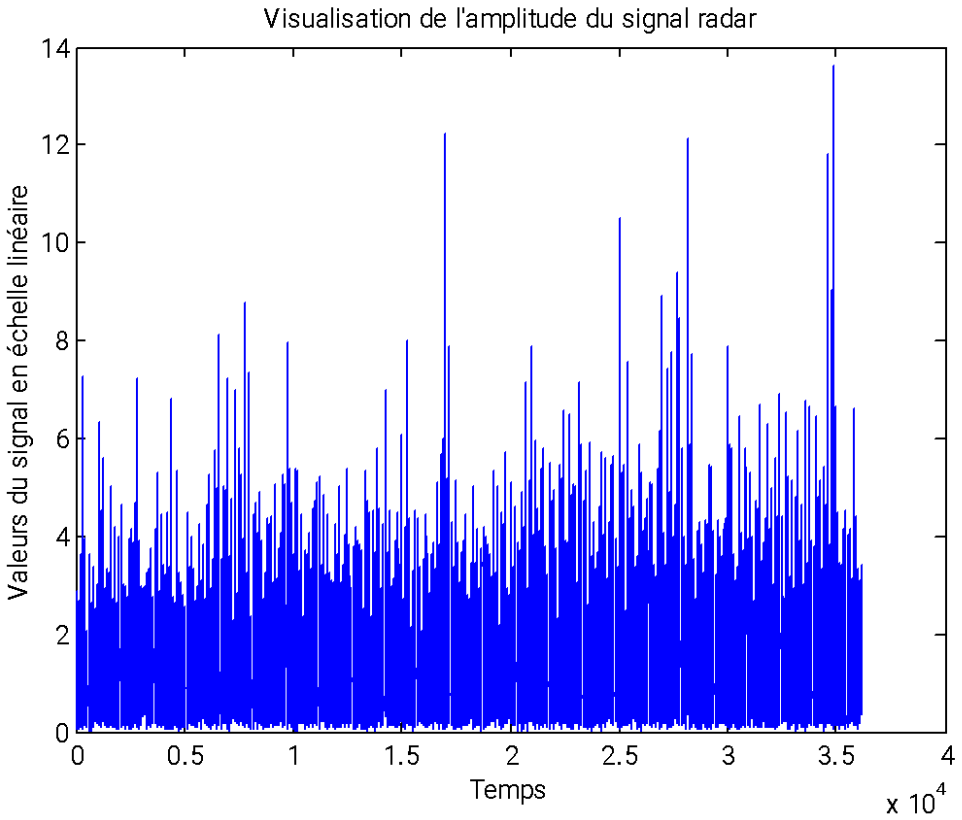
Le diagramme ci-dessus représente l'image vidéo de la fluctuation du signal radar.

La résolution du radar est élevée (0,1 m). On observe sur cette image, des stries obliques qui peuvent s'interpréter comme le déplacement des structures de vagues avec la vitesse du vent. La mer est légèrement agitée.

A titre d'exemple nous présentons les résultats du dépouillement du fichier à site 0° en polarisation horizontale.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

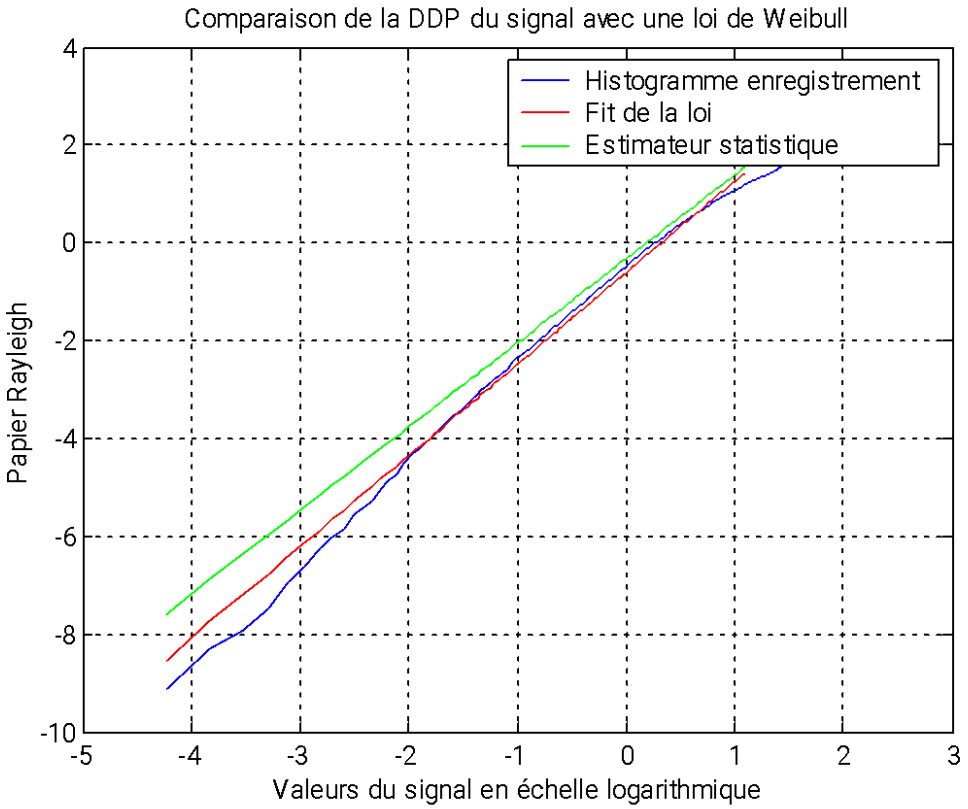
This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



Le diagramme ci-dessus représente l'évolution du signal pour une récurrence donnée. On peut voir surgir au milieu de valeurs regroupées (quelques écarts types) des valeurs élevées qui ne sont pas complètement rares.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

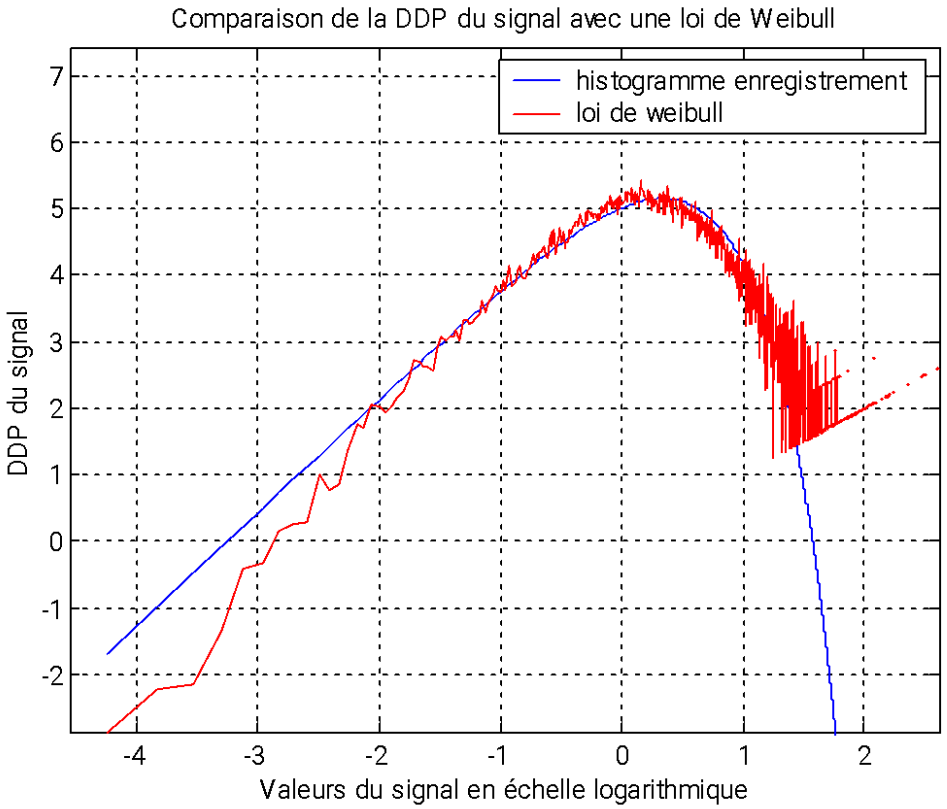


Le diagramme ci dessus représente l'analyse statistique de la probabilité cumulée des fluctuations du signal vidéo, exprimée sur une échelle de rayleigh. Sur une telle représentation les répartitions obéissant à une loi de Weibull ou de Rayleigh apparaissent sous forme d'un nuage de points alignés sur une droite dont la pente correspond au facteur de forme .

Nous observons un alignement des points, ce qui nous conduit à chercher un modèle de Rayleigh ou de Weibull.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

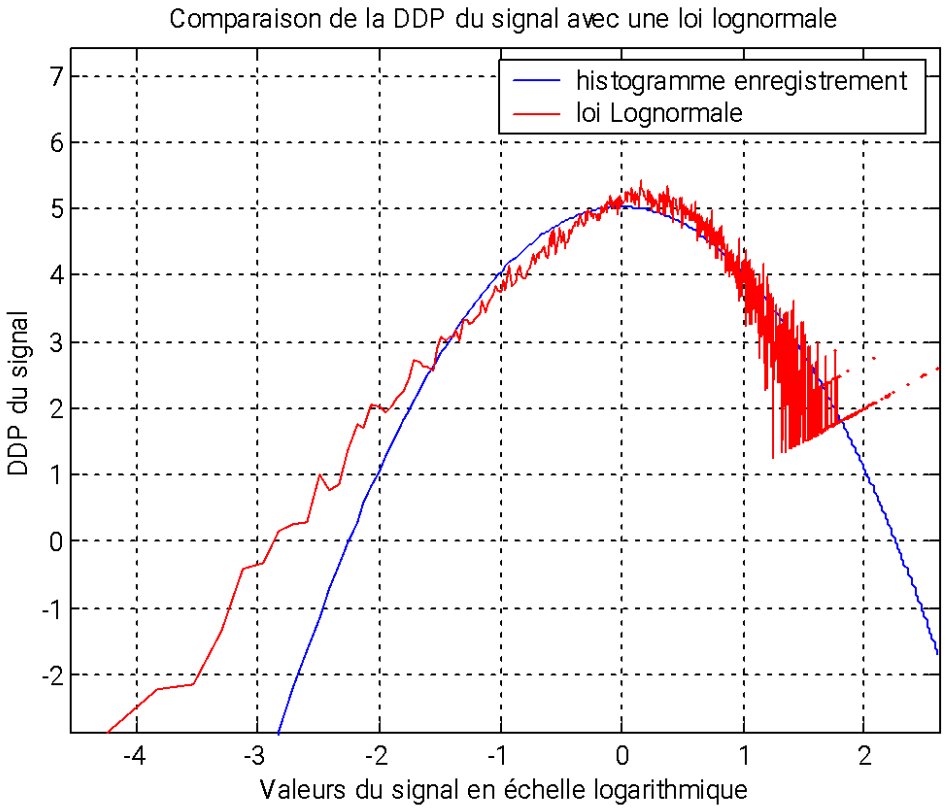
This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



Le diagramme ci-dessus représente le fit de l'histogramme des fluctuations avec une loi de Weibull de facteur d'échelle A = 0,75 et de paramètre de forme 1,92 . Le comportement de l'histogramme au voisinage du maximum semble correspondre ainsi que le comportement asymptotique.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

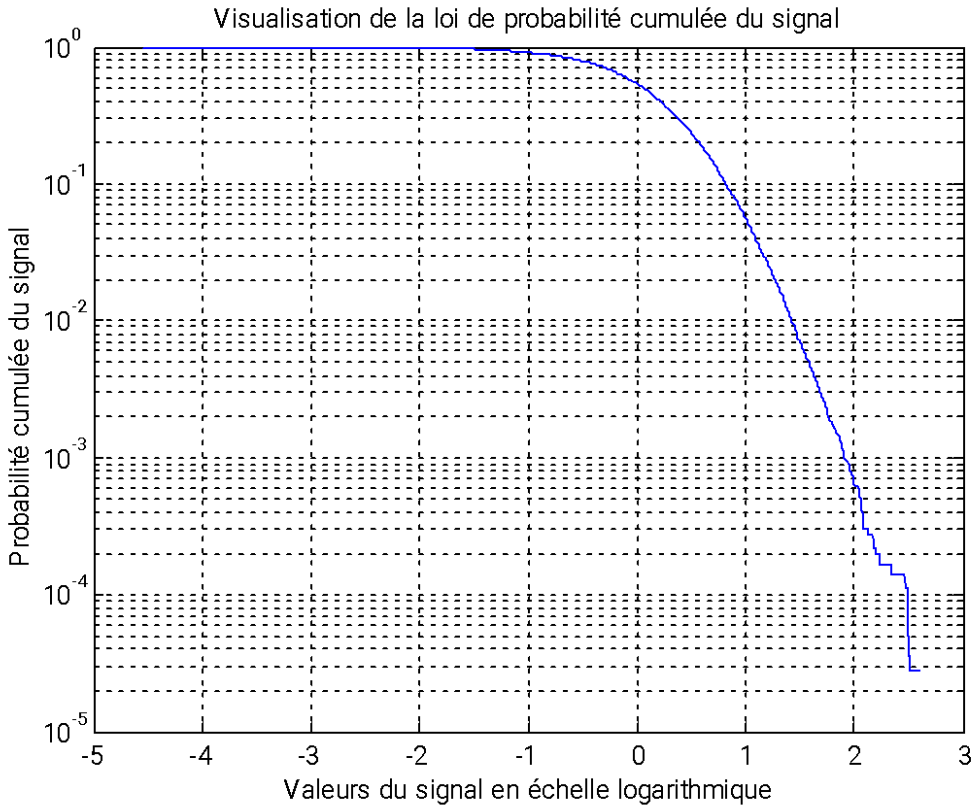
This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



Le diagramme ci-dessus représente le fit de l'histogramme des fluctuations avec une loi lognormale d'échelle A = 0 et d'écart type 0,67. L'intérêt de cette loi est de faire apparaître un comportement asymptotique lent, ce que l'on observe en exprimant la loi de probabilité cumulée du logarithme de l'amplitude de notre signal.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



Nous voyons que le comportement asymptotique de la probabilité cumulée du logarithme de la fluctuation correspond à une droite en échelle logarithmique.

Nous voyons que lorsque la mer s'agite, le comportement de la fluctuation de fouillis passe d'un comportement asymptotiquement rapide à un comportement asymptotique lent.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

Le tableau suivant donne les résultats pour les différents fichiers. le paramètre de forme pour la loi Log normale correspond à l'écart type du logarithme de la fluctuation.

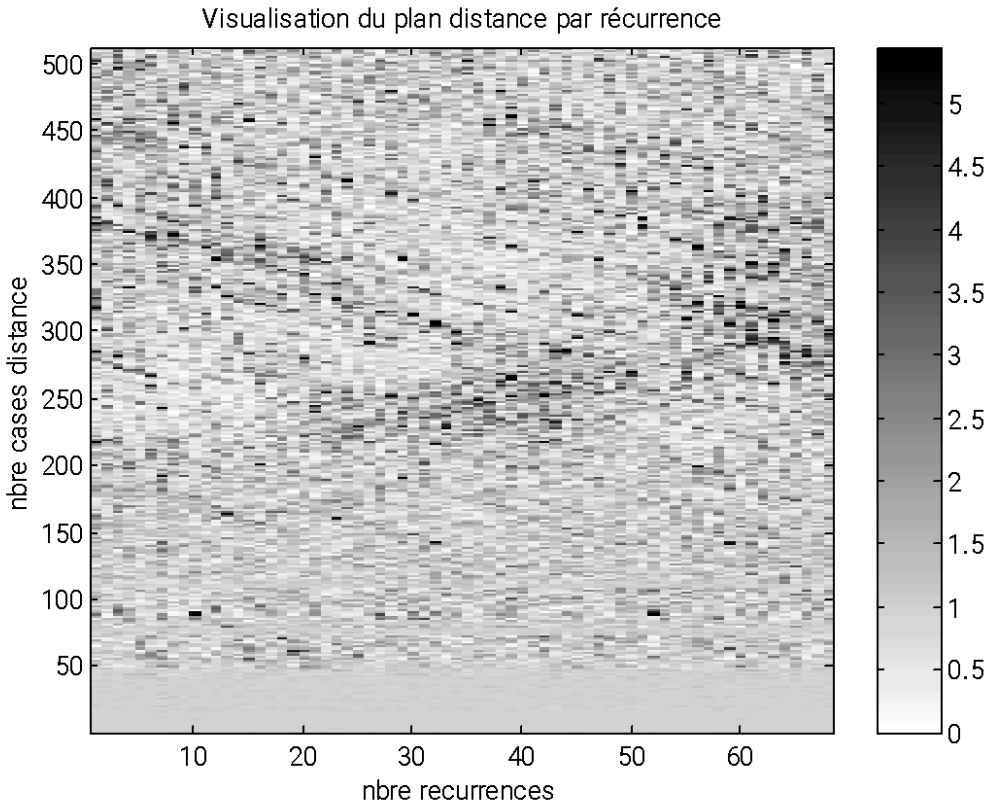
Site	Polarisation	Type de loi	Paramètre d' échelle	Paramètre de forme
0°	HH	Weibull	0,83	2,79
	VV	Weibull	0,78	2,28
2,5°	HH	Log normale	-0,003	0,51
	VV	Lognormale	-0,001	0,78
5°	HH	Log normale	-0,0033	0,63
	VV	Log normale	-0,001	0,70
7,5°	HH	Log normale	-0.004	0,66
	VV	Log normale	-0.002	0,71
10°	HH	Log normale	-0.003	0,62
	VV	Log normale	-0,002	0,67

En première approximation, le paramètre de forme de la loi ne semble dépendre ni de la polarisation, ni de l'angle d'incidence

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

14. Annexe 5: Dépouillement des fichiers 2308F4R01

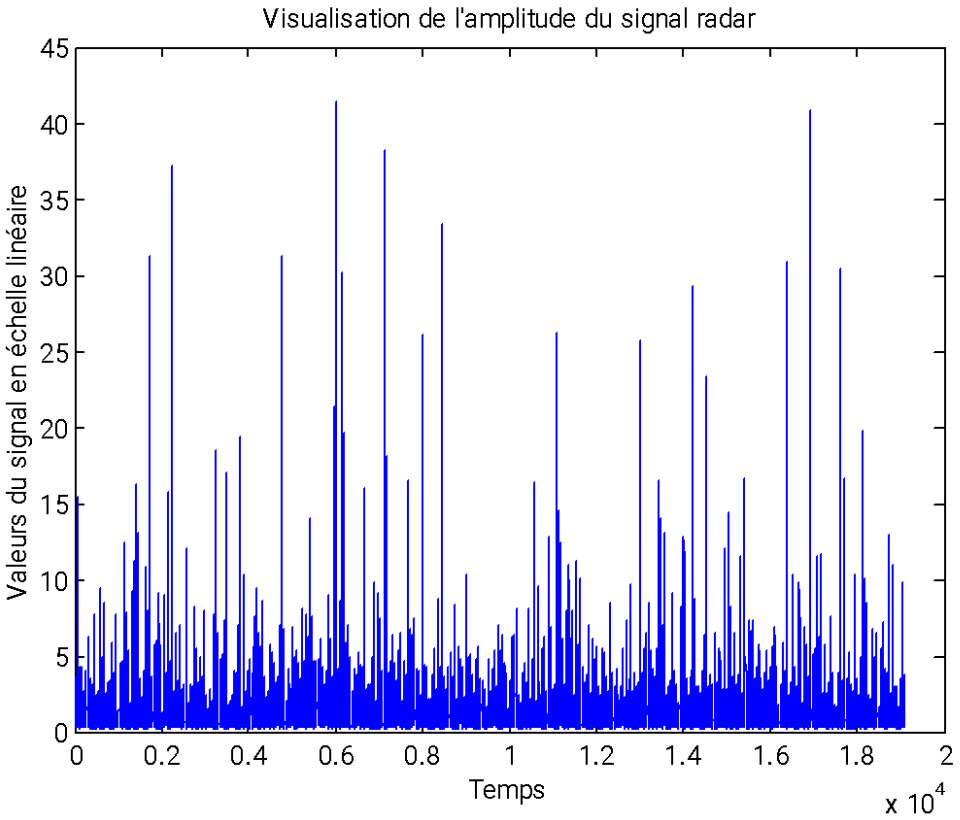


Le diagramme ci-dessus représente l'image vidéo de la fluctuation du signal radar. La résolution du radar est élevée (0,1 m). On observe sur cette image, des stries obliques qui peuvent s'interpréter comme le déplacement des structures de vagues avec la vitesse du vent. La mer est légèrement agitée.

A titre d'exemple nous présentons les résultats du dépouillement du fichier à site 0° en polarisation horizontale.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

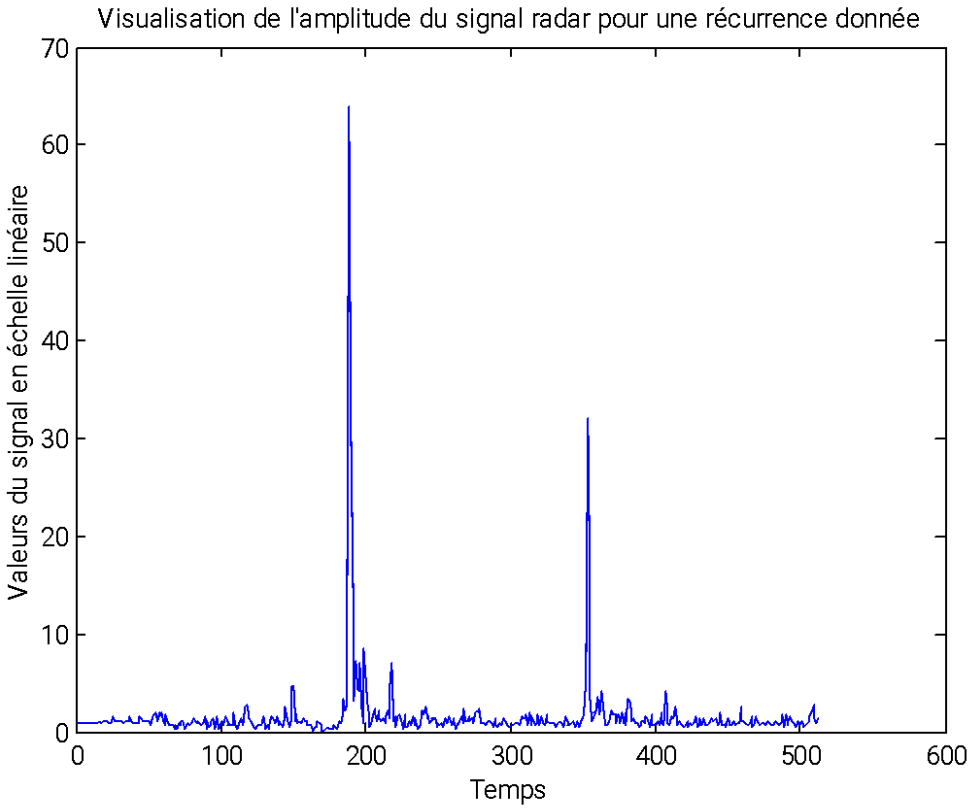


L

Cette planche représente le signal de fluctuation. On peut observer un grand nombre de valeurs de niveau élevé au dessu de quelques écarts types. lorsque la mer s'agite sous l'effet du vent, on peut observer des spikes: réflxion au sommet des petites vagues qui se sont formées.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

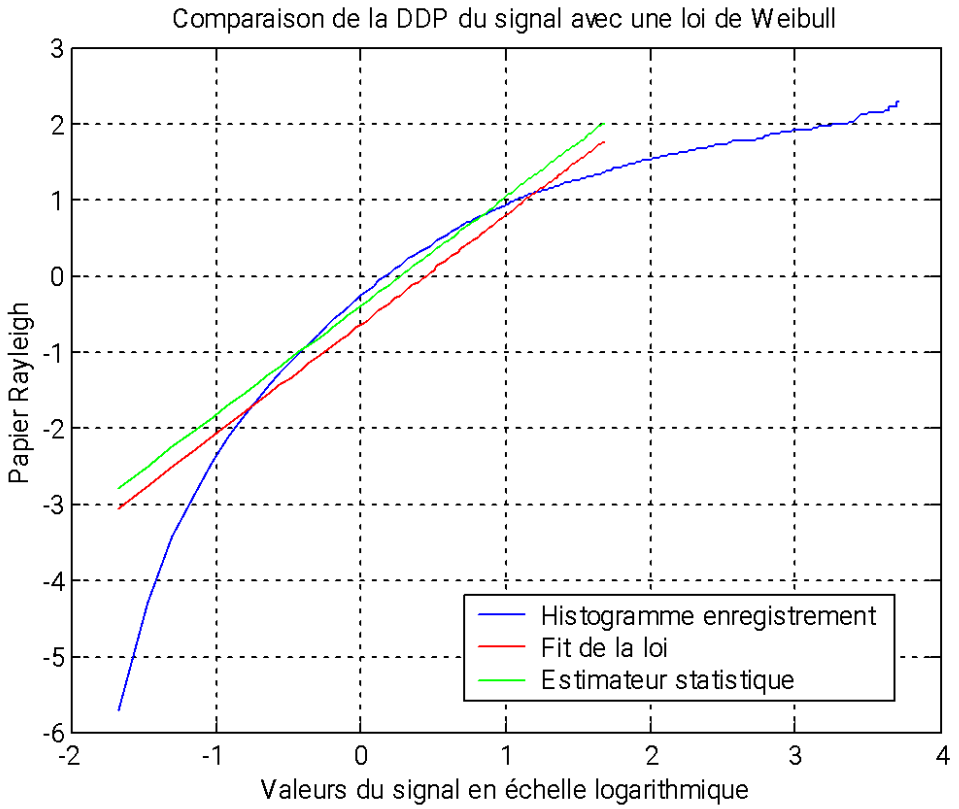
This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



Le diagramme ci-dessus représente deux spikes obtenus à deux endroits différents.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



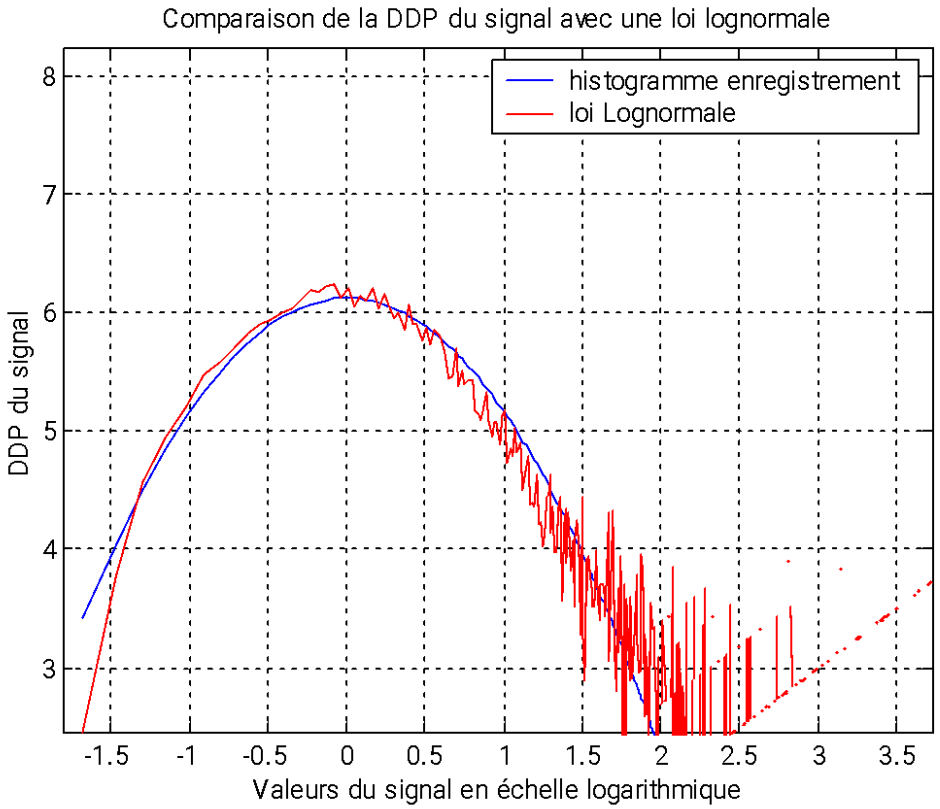
.

Le diagramme ci dessus représente l'analyse statistique de la probabilité cumulée des fluctuations du signal vidéo, exprimée sur une échelle de rayleigh. Sur une telle représentation les répartitions obéissant à une loi de Weibull ou de Rayleigh apparaissent sous forme d'un nuage de points alignés sur une droite dont la pente correspond au facteur de forme .

Nous observons que dans notre situation les modèles de Weibull et de rayleigh ne sont plus acceptables.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

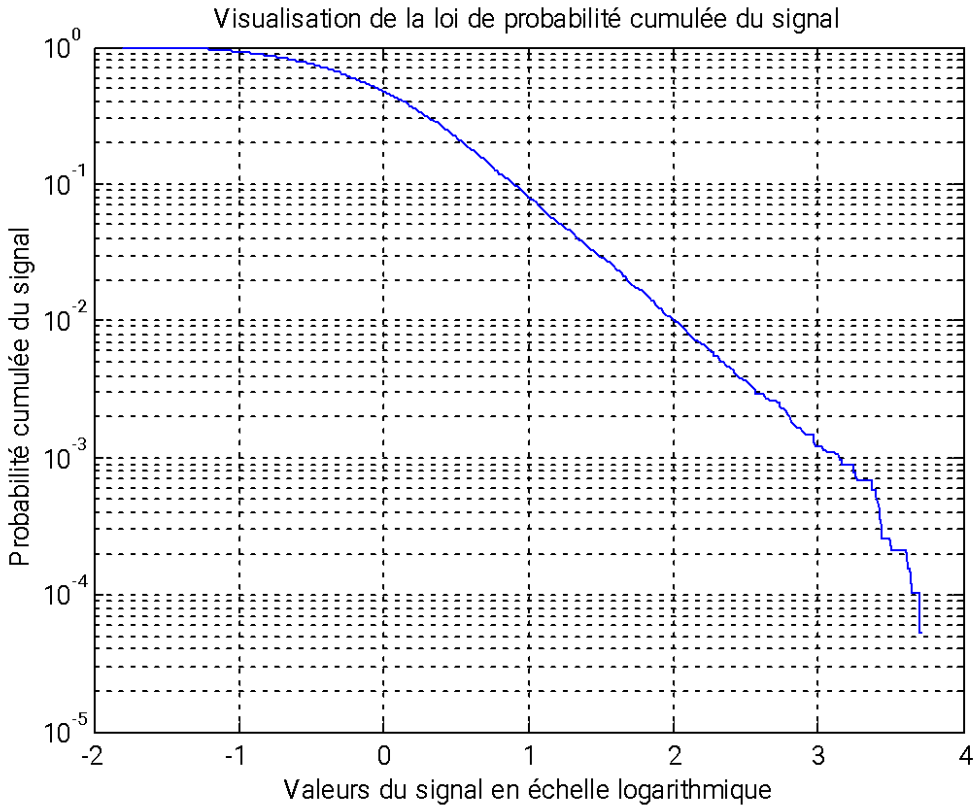
This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



Le diagramme ci-dessus représente le fit de l'histogramme des fluctuations avec une loi lognormale d'échelle A = 0 et d'écart type 0,67. L'intérêt de cette loi est de faire apparaître un comportement asymptotique lent, ce que l'on observe en exprimant la loi de probabilité cumulée du logarithme de l'amplitude de notre signal

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



Nous voyons que le comportement asymptotique de la probabilité cumulée du logarithme de la fluctuation correspond à une droite en échelle logarithmique.

Nous voyons que lorsque la mer est agitée, le comportement de la fluctuation de fouillis est mieux modélisé par une loi de probabilité avec un comportement asymptotique lent.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

Le tableau suivant donne les résultats pour chaque fichier. Le paramètre de forme pour la loi log normale correspond à l'écart type du logarithme de la fluctuation.

Site	Polarisation	Type de loi	Paramètre d' échelle	Paramètre de forme
0°	HH	Weibull	0,82	2,96
	VV	Weibull	0,80	2,61
2,5°	HH	Présence d'un écho parasite (brouillage du radar)		
	VV			
5°	HH	Log normale	-0,0033	0,72
	VV	Log normale	-0,001	0,77
7,5°	HH	Log normale	-0.004	0,55
	VV	Log normale	-0.002	0,75
10°	HH	Log normale	-0.003	0,55
	VV	Log normale	-0,002	0,63

En première approximation, le paramètre de forme de la loi ne semble dépendre ni de la polarisation, ni de l'angle d'incidence

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

15. Annexe 6: Eléments mathématiques sur les lois de Lévy

15.1 Généralités

Dans le cas symétrique, une loi de répartition de Lévy prend la forme suivante:

$$p(x) = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty} \exp\left[-(m\times u)^D\right]\times\cos(u\times x)du$$

Le paramètre D est le paramètre de forme de la loi appelé dimension fractale à cause des applications de ce type de loi à la description mathématique d'objets physiques difficiles à modéliser avec des concepts classiques: géométrie classique, loi gaussiennes …

Ce paramètre D peut prendre n'importe quelle valeur réelle comprise entre 1 (loi de cauchy) et 2 (loi Gaussienne).

Le paramètre m correspond au paramètre d'échelle de la loi.

15.2 Comportement asymptotique des lois de Lévy

Les lois de Lévy sont décrites par Benoit Mendelbrot en référence [12]. Ce sont des lois qui décrivent des variables aléatoires dont le comportement asymptotique est lent soit tel que::

$$\Pr ob(X > x) = \left(\frac{\zeta}{x}\right)^D$$

Elle est caractérisée par deux paramètres:

- un paramètre d'échelle ξ qui, comme l'écart type d'une loi normale traduit l'ensemble des valeurs de x les plus probables
- Un paramètre de forme D (appelé dimension fractale, car ces lois décrivent les phénomènes non linéaires) qui traduit le comportement asymptotique de la loi, i.e. la probabilité d'occurrence des grandes valeurs de x. D est un nombre réel compris entre 1 et 2.

Ce type de loi de probabilité est applicable aux codeurs I et Q en entrée de la chaîne de traitement du signal d'un radar. Nous supposerons I et Q variables aléatoires de Lévy de dimension D décorrélées. Il s'agit de donner le comportement asymptotique de l'amplitude A des codeurs.

$$I = r\cos(\varphi)$$

Posons $Q = r\sin(\varphi)$

où ϕ est une phase aléatoire uniformément répartie entre 0 et 2π.
Si p est la loi de probabilité de I et Q et q la loi de probabilité de r, on al'équation suivante:

$$p(x)\times p(y)dxdy = \frac{q(r)}{2\pi}drd\varphi$$

Le Jacobien de la transformation polaire permet d'écrire:

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

$$q(r) = 2\pi r \int_0^{2\pi} p(r\cos(\varphi)) \times p(r\sin(\varphi)) d\varphi$$

En considérant que r devient grand et en prenant les valeurs moyennes des fonctions sinus et cosinus sur l'intervalle d'intégration, on peut donner un équivalent au voisinage de r grand:

$$q(r) \approx 2\pi r p^2(\frac{r}{2})$$

Ceci conduit à dire que l'amplitude a un comportement tel que:

$$\Pr ob(A > r) = \left(\frac{A_{\grave{a}}}{r} \right)^D$$

Afin d'évaluer le comportement asymptotique du logarithme de l'amplitude, nous faisons dans l'équation précédente le changement de variable $r = \exp(s)$
Ceci permet d'écrire:

$$\Pr ob(\log(A) > s) = \left(\frac{A_{\grave{a}}}{\exp(s)} \right)^D = B \exp\left[- D \times s \right]$$

Ce qui suggère que le comportement asymptotique du logarithme de l'amplitude serait équivalent à une loi de Laplace de paramètre $s_0 = \frac{1}{D}$.
La fonction logarithme permet de transformer un loi de Lévy en une loi de probabilité pour laquelle:

- Moyenne et écart type ont un sens et sont calculables grâce au théorème central limite (estimateurs usuels)
- Les seuils seront faciles à évaluer pour une pfa donnée. $Seuil = m + K \times s_0$

Le tableau suivant récapitule les propriétés que nous venons de mettre en évidence:

I et Q	Module	Logarithme du module
$\left(\frac{\varsigma}{I} \right)^D$	$\left(\frac{\varsigma}{r} \right)^D$	$\exp(-D \times s)$

15.3 Simulation de bruits de Lévy

Ce paragraphe a pour objet de montrer qu'une loi de Lévy permet de faire la synthèse entre les cas de mer calme (Loi de Weibull) et les cas de mer agitée (loi Lognormale)

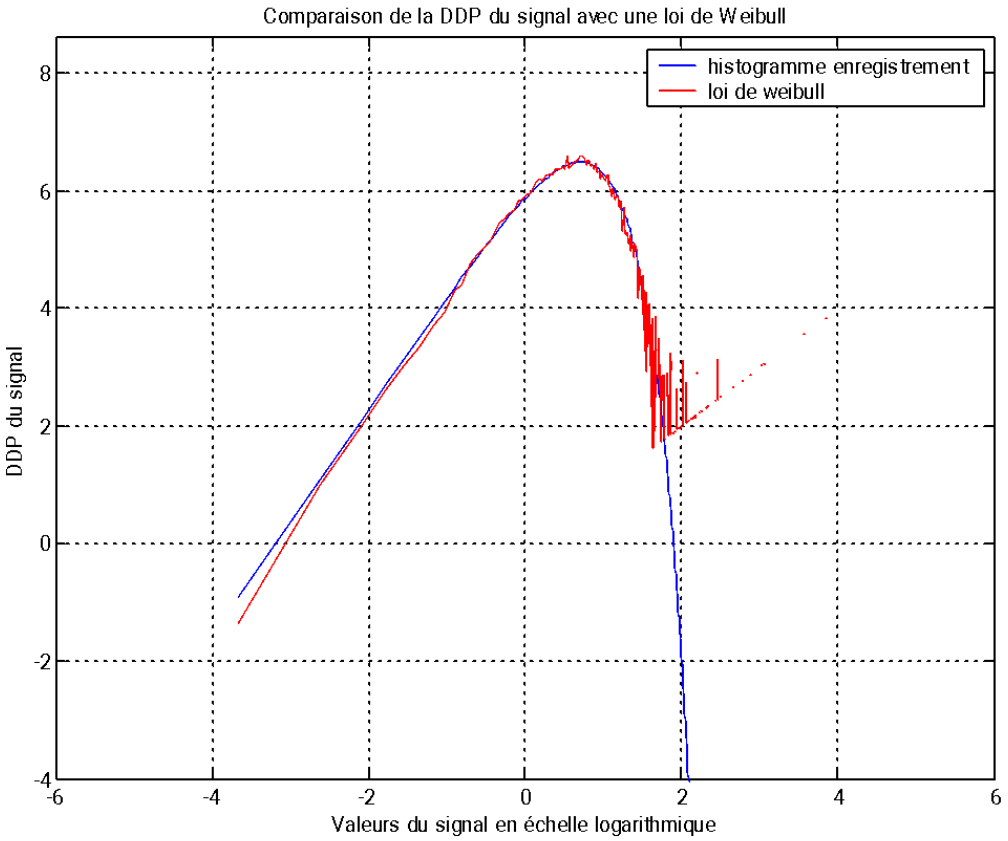
15.3.1 Simulation d'une mer force 1: D=1,95

A partir des formules de simulation des bruits de Lévy donnés en référence (12], nous avons reproduit un signal de dimension fractale D=1,95, ce qui correspondrait à une mer force 1 par exemple. Nous avons fitté l'histogramme de l'amplitude du signal avecv une répartition de Weibull de paramètre de forme de valeur 1,92. La différence avec les paramètres de

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

forme mer calme trouvés expérimentalement peut s'expliquer par le fait que nous n'avons pas rajouté la composante liée au diffus.

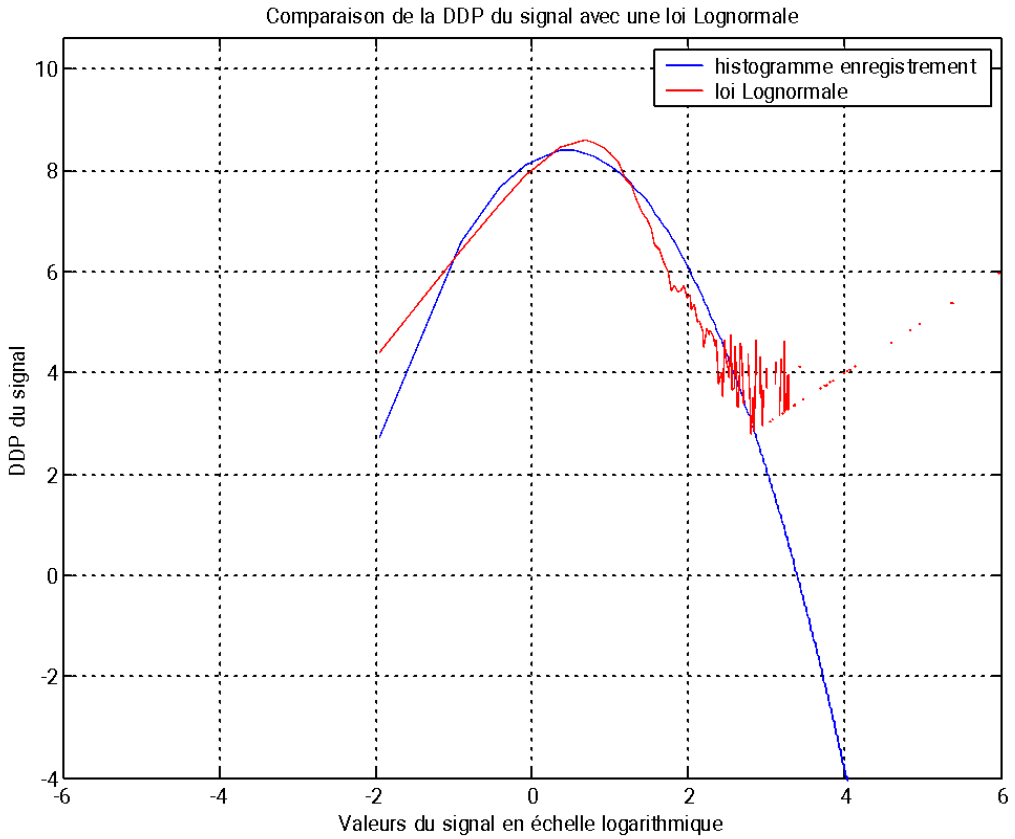


15.3.2 Simulation d'une mer force 3: D=1,8

A partir des formules de simulation des bruits de Lévy donnés en référence (12], nous avons reproduit un signal de dimension fractale D=1,8, ce qui correspondrait à une mer force 3 par exemple. Nous avons fitté l'histogramme de l'amplitude du signal avecv une répartition lognormale de paramètre de forme de valeur 0,7 (Ecart type du logarithme de l'amplitude du signal)., valeur proche des résultats expérimentaux

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.



Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.

Ce document et les informations qu'il contient sont confidentiels et sont la propriété exclusive de THALES. Ils ne doivent être communiqués qu'aux personnes ayant à en connaître et ne peuvent être reproduits ni divulgués à toute autre personne sans l'autorisation préalable écrite de THALES.

This document and the information it contains are property of THALES and confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those having a need to know them, without prior written consent of THALES.