

CHAPITRE I



Notions radar

Résumé

Dans ce chapitre, nous décrivons brièvement le principe de fonctionnement, les différents types, les composantes et les classifications des systèmes radars. Ensuite, nous expliquons les caractéristiques du clutter de mer, en particulier, nous présentons la modélisation de ses statistiques utilisant les modèles Gaussiens composés. La présentation d'une introduction générale sur l'estimation des paramètres des distributions du clutter de mer est aussi introduite dans ce chapitre.

sommaire

- I.1 Introduction*
- I.2 Principe de fonctionnement du radar*
- I.3 Classification des radars*
- I.4 Les composantes d'un système radar*
- I.5 Equation du radar en espace libre*
- I.6 Clutter de mer*
- I.7 Modélisation statistique du clutter de mer*
- I.8 Distributions du clutter de mer*
- I.9 Estimation des paramètres*
- I.10 Critères des performances d'estimation*
- I.11 Conclusion*

I.1 Introduction

Le "RADAR" est par définition un appareil de "**RA**dio **D**étection **A**nd **R**anging" que l'on peut traduire par "détection et estimation de la distance par onde radio". Tout a commencé en 1886, quand le physicien allemand "Hertz" a réalisé les premières expériences sur les ondes électromagnétiques et a montré que les ondes "Radio" pouvait être réfléchies par les corps métalliques et diélectriques. En 1904, l'allemand "Hulsmeyer" "dépose un brevet sur " un détecteur d'obstacles à ondes radio-continues" à la suite de réflexions constatées sur des navires croisant sur le Rhin [1]. L'évolution de ce domaine a permis en 1935 d'utiliser le premier réseau de radars par "Robert Watson".

De nos jours, le radar est devenu un instrument essentiel à la sécurité de la navigation maritime et aérienne. La détection du signal radar est une tâche très complexe qui requiert un matériel spécial et un énorme calcul de traitement du signal. Pour un système de détection donné, tous les objets détectables ne présentent pas la même importance et un objet digne d'intérêt pour un système peut être considéré sans intérêt et même gênant pour un autre. Dans les systèmes radar le signal de la cible est séparé du clutter inutile qui provient de la réflexion d'objets indésirables tels que le sol, les arbres et la mer etc.

Le radar est un dispositif opérationnel d'émission et de réception d'ondes électromagnétiques qui présente de nos jours un grand nombre d'applications. Après la deuxième guerre mondiale, les applications du radar ont complètement changés, car au début il était utilisé comme un appareil de guerre; mais de nos jours il est aussi utilisé en civil qu'en militaire. Dans le domaine civil on peut prendre l'exemple de la météorologie, dans laquelle le radar est utilisé pour le contrôle du trafic aérien, pour la surveillance du trafic routier etc.

Au cours de ce chapitre, on va discuter brièvement les principes fondamentaux du système radar pour pouvoir entamer clairement les problèmes traités dans ce mémoire à savoir le problème d'estimation. On va établir une étude théorique des différents modèles statistiques du clutter de mer qui est souvent appliqués dans la majorité des situations pratiques.

Succinctement, tout système radar comme montré dans la Figure I.1 se compose d'un émetteur (TX: Transmitter) qui produit des ondes électromagnétiques de haute fréquence, lesquelles sont ensuite transmises à l'antenne émettrice. Un récepteur (RX : Receiver) connecté à une antenne de réception amplifie les signaux réfléchis afin de permettre leur lecture [2].

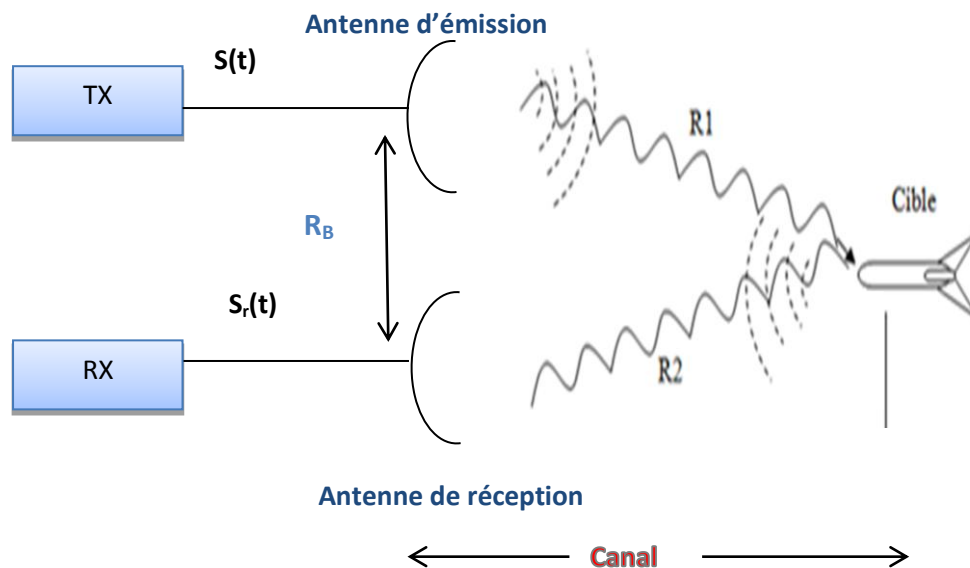


Figure I.1 : Forme générale d'un radar

Le radar mono statique ($R_B=0$) se rapporte comme un système radar qui a un émetteur et un récepteur situés dans le même site. Figure I.2 montre les différents types possibles des systèmes radar. Au point de vue de faciliter l'opération, le radar mono statique est largement utilisé et ses performances sont souvent supérieures mais pas toujours que les radars bi-statiques ($R_B \neq 0$).

Généralement, le radar bi-statique aéroporté consiste en deux radars aéroportés l'un sert à l'émission et l'autre sert à la réception. Le radar multistatique utilise un réseau de multiples antennes émettrices et réceptrices appelé radar MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) [2].

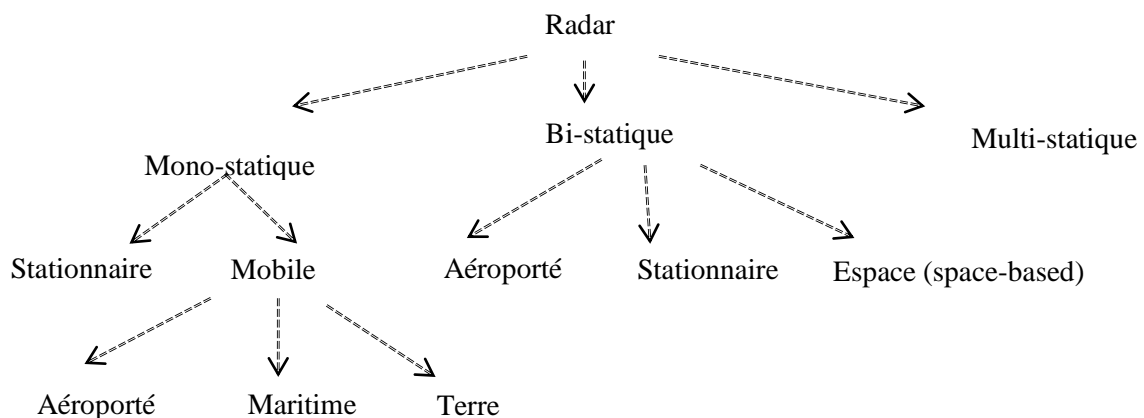


Figure I.2: Différents types des systèmes radar

I.2 Principe de fonctionnement

Le principe du radar consiste à émettre une onde électromagnétique dans une direction donnée et à détecter en retour l'onde réfléchie par un obstacle à l'intérieur de son volume de couverture (Figure I.3) [2]. Le but principal du radar est bien de révéler la présence des objets (cibles) qui ne peuvent pas être observés visuellement. En plus, le radar sert à délivrer des informations additionnelles comprenant; la distance par une mesure exacte du temps écoulé entre la transmission et la réception du signal en retour et la direction par l'utilisation de modes d'antennes directives. Dans les premières séries de radars, deux antennes étaient utilisées pour comparer l'intensité de l'énergie réfléchie avec celle émise et pour déterminer ainsi la direction de l'écho. La classification de cibles est également effectuée, par l'analyse des échos et leurs variations dans le temps.

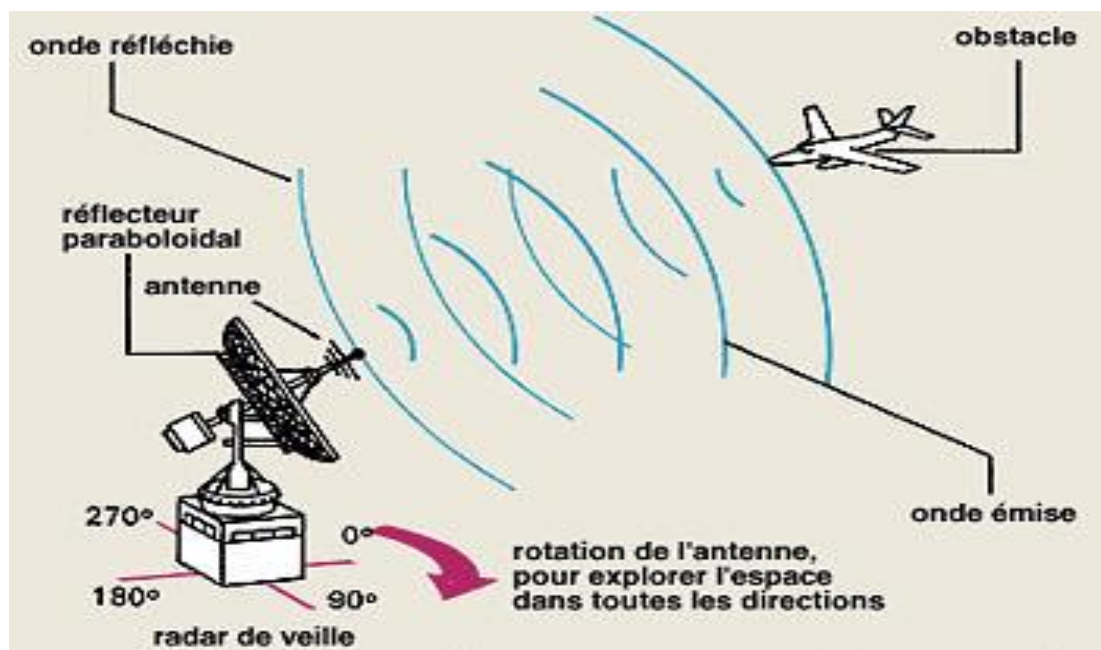


Figure I.3: Principe de fonctionnement d'un radar [9]

I.3 Classification des radars

En fonction des informations qu'elles doivent fournir, les équipements radars utilisent des technologies différentes. Ceci se traduit par une première classification des systèmes radars [4] comme montré dans la Figure I.4.

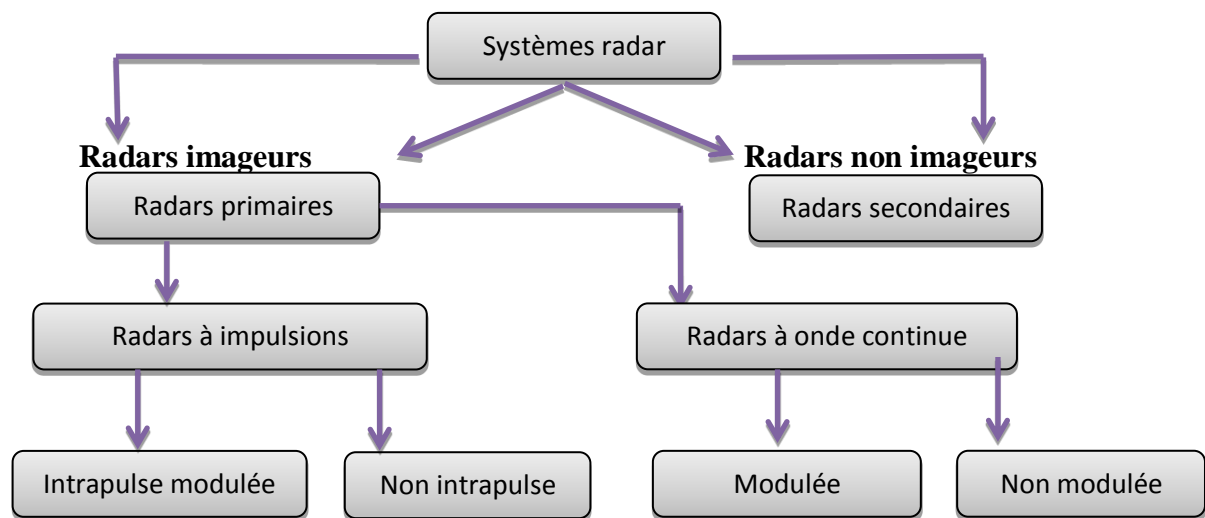


Figure 1.4 : Classification des systèmes radar [4]

I.3.1 Radars imageurs / Radars non imageurs

Un radar imageur permet de présenter une image de l'objet (ou de la zone) observé. Les radars imageurs sont utilisés pour cartographier la terre, les autres planètes, les astéroïdes, etc. Ils offrent aux systèmes militaires une capacité de classification des cibles. Des exemples typiques de radar non imageur sont les cinémomètres radars (sur le bord de la route etc.) et les radios altimètres. Ce type de radar est également appelé diffus-mètres puisqu'il mesure les propriétés de réflexion de la région ou de l'objet observé [4].

I.3.2 Radars primaires

Un radar primaire (primary surveillance radar ou PSR) émet des impulsions hyperfréquences à l'aide d'une antenne, les impulsions sont partiellement réfléchies par l'objet volant et reviennent à l'antenne. Un récepteur mesure le temps entre l'émission et le retour des impulsions. Cette durée et la direction de l'impulsion permettent de calculer la position de l'objet volant. Il existe aujourd'hui des radars primaires avec déterminations de la position en deux dimensions (2D) (distance et azimuth) ou en trois dimensions (3D) (distance, azimuth, altitude). Les radars primaires permettent de détecter et de suivre dans l'espace aérien surveillé tous les objets qui réfléchissent suffisamment les ondes radars (y compris les phénomènes météorologiques, les vols d'oiseaux, les échos du sol, etc.) [4].

I.3.3 Radars à impulsions

Les radars à impulsions émettent des impulsions du signal hyperfréquence à forte puissance, puis il attend l'écho du signal transmis pendant un certain temps avant qu'elle ne transmette une nouvelle impulsion. Le radar à impulsions est généralement utilisé lorsque cela est nécessaire pour détecter des cibles au sein d'un certain volume de l'espace et de déterminer la distance et le relèvement. Dans certains cas, il détermine la vitesse de chaque cible. Le système radar pulsé nécessite généralement l'émission des ondes de grandes puissances et peut-être très complexe et coûteux [4].

I.3.4 Radars à onde continue

Un radar à onde continue (CW) ou à ondes entretenues est un type de radar caractérisé par l'émission d'ondes en continu, modulées en fréquence ou non. Les radars à ondes entretenues émettent sans interruption un signal hyperfréquence. L'écho est donc reçu et traité continuellement. Pour empêcher l'énergie émise directement dans le récepteur et de contaminer celle revenant de la cible, ce type de radar émet et reçoit :

- Soit avec deux antennes différentes (radar bistatique).
- Soit par la mesure de l'écart de fréquence entre les deux signaux en utilisant la même antenne [4].

I.3.5 Radars secondaires

Le radar secondaire fonctionne selon un principe différent: la cible qu'il éclaire génère (de façon active) les signaux de réponse. Le radar secondaire transmet des impulsions hyperfréquences (appelées interrogations). Celles-ci n'ont pas pour but d'être réfléchies, la cible étant équipée d'un transpondeur qui les reçoit et les traite. Ensuite, le transpondeur met en forme et émet un message de réponse qui peut être reçu et décodé par un radar secondaire. Dans le cas des radars secondaires, la coopération nécessaire de la cible (utilisation d'un transpondeur) permet une très forte réduction de la puissance émise (par rapport à un radar primaire offrant une portée de détection identique) [4].

I.4 Les composants d'un système radar

Le schéma de la Figure I.5 illustre les différentes composantes d'un radar. L'antenne du radar illumine la cible avec des micro-ondes, qui sont alors réfléchies puis interceptées grâce à un récepteur.

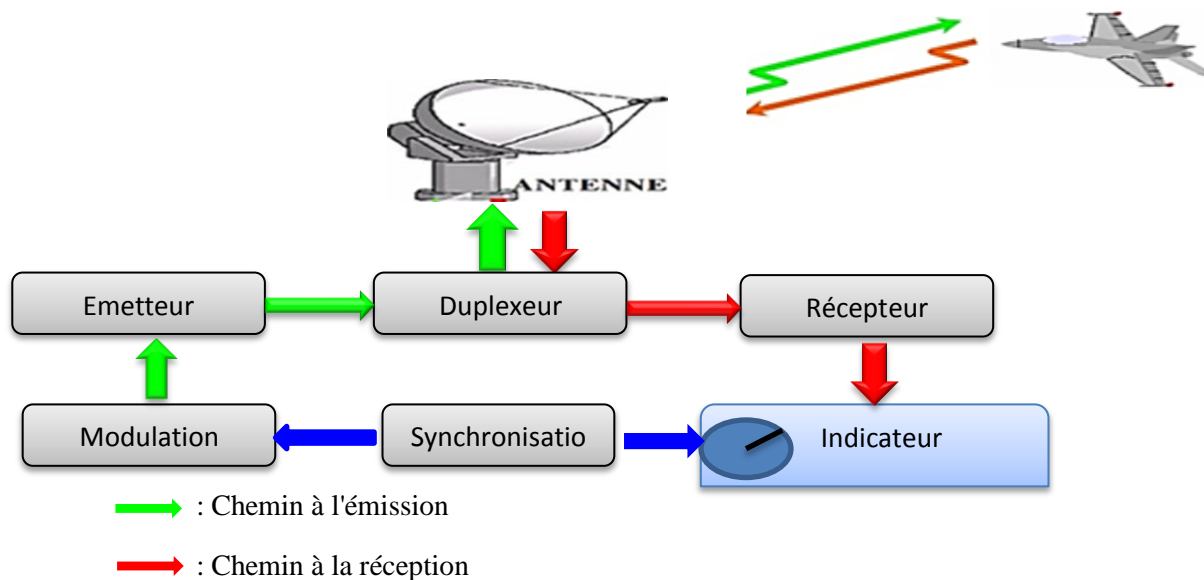


Figure I.5: Les composants d'un système radar [4]

Le synchroniseur :

C'est le composant le plus important dans le système radar, il contient une horloge de très grande stabilité à partir duquel sont produits les signaux de synchronisation.

Le modulateur : Le modulateur est un circuit électronique qui permet de fractionner le signal radio en pulsations. Ce dispositif constitue la partie active de l'émetteur qui sert à stocker l'énergie pendant le temps entre deux impulsions successives.

L'émetteur : L'émetteur doit émettre des signaux de radio fréquence (RF) de grande quantité d'énergie dans un court temps. La fréquence doit être extrêmement haute pour obtenir beaucoup des cycles dans une courte impulsion.

Le duplexeur : Un commutateur électronique, dirige l'onde vers l'antenne lors de l'émission, ou le signal de retour depuis l'antenne vers le récepteur avec une perte minimale.

Le récepteur : Un préamplificateur est généralement installé près de l'antenne pour amplifier les signaux et réduire ainsi la perte du signal sur le câble menant au récepteur.

L'antenne : L'antenne radar est conçue de façon à concentrer l'énergie des pulsations émises en un faisceau horizontal étroit. L'antenne diffuse l'énergie de l'émetteur dans l'espace dans un volume déterminé et avec l'efficacité voulue. Le processus est identique à la réception, l'antenne captant alors l'énergie diffuse dans un volume d'espace donné et selon son efficacité.

On note aussi le joint tournant qui est un dispositif permettant de transférer l'énergie RF entre la partie fixe et la partie tournante du système.

L'indicateur : L'indicateur doit en permanence mettre à la disposition de l'utilisateur une représentation graphique facilement interprétable de la position relative des cibles détectées par le radar [5].

I.5 Equation du radar en espace libre

L'équation du radar traduit l'influence des phénomènes physiques sur la puissance rayonnée, la propagation de l'onde, et jusqu'à la réception du signal réfléchi. L'équation du radar permet de réaliser une estimation des performances d'un système radar. La relation qui lie la distance radar-cible, D , aux paramètres caractéristiques du radar est dite équation du radar. Celle-ci prend différentes formes qui dépendent chacune du milieu dans lequel s'effectue la détection. Les quatre types d'environnements les plus connus dans la détection radar sont le bruit thermique due au récepteur dont la puissance est constante (effet de l'agitation électronique dans les conducteurs du récepteur) ou variable (bruit capté par l'antenne), le clutter de surface (mer, terre, nuage, arbres, etc.), le clutter de volume (précipitations, insectes, etc.) et les interférences (avions, etc.). Dans ce qui suit, nous donnons uniquement l'équation du radar dans le cas du bruit thermique qui est connue sous le nom de l'équation radar en espace libre. Elle détermine la relation mathématique qui permet d'écrire la puissance de l'écho reçu, P_r , issu d'une impulsion en fonction de la puissance de pointe de l'impulsion transmise, P_p , tel que [6, 7]:

$$P_r = \frac{P_p G^2 \lambda^2 \sigma_r}{(4\pi)^3 D^4 L_t L_r} \quad (\text{I.1})$$

Où L_t et L_r désignent les pertes totales en transmission et en réception, $G = \frac{4\pi S}{\lambda^2}$ représente le gain de l'antenne supposé le même en transmission et en réception, S est la surface équivalente de l'antenne et λ est la longueur d'onde du signal RF émis. D'autre part, $\sigma_r = \lim_{D \rightarrow \infty} 4\pi D^2 |E_r / E_i|$, est définie comme étant la surface équivalente radar (RCS : Radar Cross Section). E_i et E_r sont les amplitudes respectives des champs électromagnétiques incident et réfléchi. Le RCS varie avec la fréquence et son calcul exact n'est possible que pour des cas simples. Autrement, il existe des formules empiriques qui le calculent. Dans le cas de la détection d'une cible de type MDS (Minimum Discernable Signal), c'est-à-dire un objet

pour lequel l'écho reçu a une puissance minimale telle que $P_r = P_{min} = K^\circ T^\circ B \bar{S}$, la portée maximale s'écrit, en utilisant (I.1):

$$D_{\max} = \left[\frac{P_p G^2 \lambda^2 \sigma_r}{(4\pi)^3 P_{\min} L_t L_r} \right]^{1/4} \quad (\text{I.2})$$

Où K° est la constante de Boltzmann, T° est la température due au bruit du système, B est la bande passante du bruit au niveau du récepteur et \bar{S} est le rapport signal sur bruit (SNR : Signal-to-Noise Ratio,) moyen correspondant à une impulsion à la sortie du détecteur linéaire ou quadratique.

I.6 Clutter de mer

Dans le domaine des clutters de mer, la difficulté majeure réside dans la détection des petites cibles (en termes de SER - Surface Équivalente du Radar) dans des états de la mer de plus en plus élevés. Le clutter auquel on est confronté est fortement impulsif ou pointu (présence de nombreux échos élémentaires de fortes amplitudes ou "*spikes*"). Ce phénomène se produit, lorsqu'un radar à fort pouvoir de résolution est utilisé, ou bien que l'angle d'incidence du radar est faible. Dans telles situations, les statistiques du clutter de mer ne s'apparentent plus à une Gaussienne et les détecteurs utilisés dans les environnements Gaussiens ne sont alors plus adaptés. Le clutter de la mer devient donc de nature statistique non-Gaussienne et son caractère impulsif engendre une augmentation significative du taux de fausses alarmes, TFA. Dans ce cas-ci, le radar doit alors adapter son seuil de détection pour réduire ce niveau de fausses alarmes, mais les performances de détection sont par conséquent fortement dégradées. Pour remédier à ce problème et afin de se rapprocher des situations plus réalistes, une modélisation non Gaussienne du clutter est fortement souhaitée et a fait l'objet de nombreuses études expérimentales. Par conséquent, cette modélisation a conduit, parfois, à la mise en place de quelques détecteurs associés à certains modèles non Gaussiens. En environnement maritime, la puissance du clutter de mer peut subir des variations aléatoires spatiales trop sévères ce qui nécessite de considérer le processus de clutter de mer comme Gaussien composé. Cela est due au fait que ces modèles sont bien adaptés aux environnements de clutter impulsif et hétérogène [8-10].

L'évolution dynamique de la mer peut être caractérisée par deux paramètres, son état et sa direction des vagues. L'état de la mer prend en compte l'amplitude et la distance entre

les vagues. Deux types de vagues apparaissent à la surface de la mer ; les vagues de capillarité et les vagues de gravité (la houle) [11]. Les premières, de faible taille mais nombreuses, représentent l'effet du vent et sont superposées aux vagues plus larges, de gravité. Le speckle est la conséquence des premières (capillarité) et présente des temps de corrélation d'environ 10 ms à fréquence fixe et est décorrélé par l'agilité de fréquence. La texture, qui est la conséquence des vagues de gravité, présente des longueurs de corrélation beaucoup plus longues [11] et n'est pas décorrélé par l'agilité de fréquence. L'état de la mer est défini par ce dernier type de vagues et a une influence déterminante, tout comme les paramètres du signal radar, sur les propriétés statistiques et de corrélation du clutter. Le mécanisme de réflexion du signal radar à la surface de la mer, est illustré sur la Figure I.6 [12].

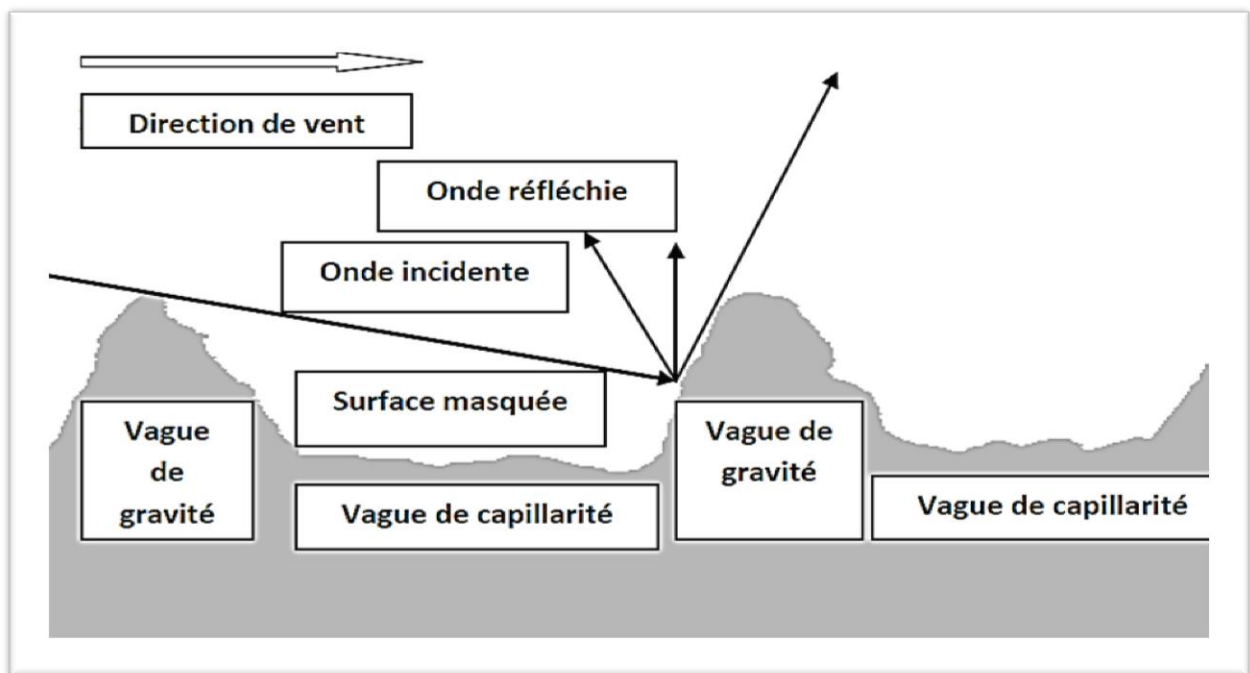


Figure I.6: Mécanismes d'interaction du signal radar (surface de mer) [12]

I.7 Modélisation statistique du clutter de la mer

Historiquement, la problématique du traitement du signal radar a principalement fondé sur la théorie des probabilités. Cette dernière discipline représente le cadre naturel de la modélisation statistique du clutter, i.e., l'estimation des paramètres et la détection des objets. Dans cette section, nous allons discuter en particulier sur la modélisation statistique du clutter de mer et ainsi l'estimation des paramètres des modèles. Une grande partie du traitement de signal appliqué consiste, d'une certaine façon, à faire de la modélisation (i.e., à définir un ou

plusieurs modèles, de nature mathématique, permettant de rendre compte, d'une manière suffisamment générale, d'un phénomène donné, qu'il soit physique, économique ou autre). De façon un peu schématique, on peut distinguer la modélisation déterministe ou physique et la modélisation statistique. Quel que soit le type de la modélisation suivi, le modèle considéré doit bien évidemment être mis face à la réalité. La modélisation statistique, que nous adoptons dans ce travail, a pour but essentiel de préciser des lois de probabilité rendant compte des variations aléatoires de certains phénomènes, variations dues à des causes soit inconnues, soit impossible à mesurer. De même, elle consiste essentiellement à définir des outils appropriés pour modéliser des données observées, en tenant compte de leur nature aléatoire [8]. La modélisation statistique restera l'outil le plus privilégié pour dimensionner et prédire les performances de la prochaine génération de matériel [8, 10]. Dans le domaine des radars, et afin de tenir compte de la nature aléatoire du clutter de mer et de tirer parti des résultats obtenus dans le cadre de la théorie statistique de la décision, les radaristes ont opté pour une modélisation statistique du clutter.

Au début des radars, le clutter de la mer a tout d'abord été modélisé par une simple loi de Gauss sur chacun des deux canaux en phase et en quadrature de phase du récepteur. Les deux composantes en phase (I) et en quadrature (Q) étant supposées indépendantes et de même variance sur chaque canal. Ainsi, l'amplitude du clutter à la sortie du récepteur était modélisée par une distribution de Rayleigh (L'intensité du clutter étant le carré de l'amplitude, elle est donc modélisée par une distribution Exponentielle). Le modèle Gaussien était principalement justifié par une application du théorème de la limite centrale. Cependant, dans les systèmes radar modernes de haute résolution éclairant l'horizon à de faibles angles d'incidence (i.e., *low grazing angle*), les statistiques du clutter de mer s'écartent très vite du modèle Gaussien. Dans ce cas-ci, de forts échos se détachant du niveau moyen du clutter apparaissent ce qui traduit un allongement de la queue de distribution de l'amplitude du clutter et donc un écart par rapport aux statistiques Gaussiennes. Ceci va engendrer une augmentation considérable du taux de fausses alarmes lorsqu'on adopte l'hypothèse Gaussien. Pour contourner ce problème, le radar doit adopter son seuil de détection pour réduire le niveau de fausses alarmes, mais les performances de détection se dégradent significativement. C'est pourquoi de nombreux travaux de recherche ont été effectués et le sont encore actuellement pour modéliser le clutter le plus précisément possible [8]. Ceci s'explique bien aussi par le fait que les performances qui sont demandées aux radars modernes sont de plus en plus élevées et ainsi de nouveaux modes de fonctionnement apparaissent comme les

configurations multistatistiques. Ainsi, des modèles statistiques non-Gaussiens ont été apparus dès les années soixante pour modéliser l'amplitude du clutter de mer. Ces modèles ont contribué à s'affranchir, dans une certaine mesure, de la méconnaissance statistique du clutter. En 1966, la loi Log-normale a été considérée pour modéliser l'évolution de l'amplitude du clutter de mer. La distribution du clutter semble néanmoins plutôt être en général intermédiaire entre une loi de Rayleigh et une loi Log-normale. C'est pourquoi la distribution de Weibull a été introduite ensuite pour modéliser l'amplitude d'un clutter non-Gaussien. Ces deux distributions ne s'appuient pas sur un modèle physique ou sur le mécanisme de la rétrodiffusion, elles ne correspondent qu'à des ajustements sur des données réelles enregistrées par des radars de haute résolution. C'est pourquoi la distribution K -composée, qui reflète ce qu'il se passe à la surface de la mer, a été introduite pour modéliser l'amplitude du clutter de mer. D'ailleurs, comme cette distribution composée possède une interprétation physique, elle est actuellement le modèle le plus répandu parmi les radaristes. Elle est de même tout à fait adaptée pour décrire la répartition des réflecteurs à la surface de la mer: des amas de réflecteurs associés aux vagues de capillarité, portés par les vagues de gravité [8, 10].

Le modèle de la distribution K est donc compatible avec un modèle de rétrodiffusion à deux échelles, comme celui présenté dans, où le signal rétrodiffusé par une surface s'exprime sous la forme du produit de deux composantes statistiquement indépendantes, l'une reliée aux propriétés intrinsèques à la surface (les vagues de capillarité), l'autre à son inclinaison moyenne (correspondant aux vagues de gravité). Dans le cas de la distribution K , ces deux composantes sont le speckle, qui est une composante à fluctuations rapides associée aux vagues de capillarité, d'amplitude distribuée selon une loi de Rayleigh, et la texture, qui est une composante à fluctuations lentes, associée aux vagues de gravité, dont l'intensité suit une loi gamma. Cette représentation à deux composantes de la loi K est appelée modèle K -composé [10]. Quelques années plus tard, cette modélisation composée a été étendue avec succès pour inclure le bruit thermique. C'était donc la naissance de la distribution composée du K -clutter-plus-bruit, qu'on note $K+B$. Cependant, cette loi modifiée reste incapable de prédire néanmoins les effets liés à la présence de forts échos, en particulier pour le cas des radars ultra-haute résolution. Dans un passé récent, Eltoft a proposé une nouvelle distribution statistique, appelée la distribution *RiIG* (*Rician Inverse Gaussian distribution*), pour modéliser l'amplitude du clutter non-Rayleigh (ou non Gaussien) [13]. Le modèle de la distribution *RiIG* a été examiné pour ajuster les données linéaires ultrasoniques médicales et

les données issues d'une simple impulsion dans le cas d'un radar d'imagerie (ou SAR). Les performances d'ajustement à l'aide du modèle *RiIG* ont été comparées à celles de la loi K , et les résultats présentés ont montré la primauté du premier dans la plupart des cas analysés. Cependant, cette modélisation se révèle insuffisante lorsque le bruit thermique entre en jeu. Carretero *et al* ont présenté une analyse statistique complète d'une base de données du clutter de mer de haute résolution [14]. D'ailleurs, un bon ajustement à la pdf empirique des données réelles a été réalisé à l'aide d'un modèle dont la texture suit une loi Log-normale. En outre, l'applicabilité de ce modèle composé, noté *CLN* (*Compound Log-Normal model*), a été également examinée et vérifiée sur des données à ultra-haute résolution. Récemment, Weinberg a analysé les capacités de la distribution de Pareto pour modéliser le clutter de mer collecté par un radar de haute résolution éclairant à des grands angles d'incidence [15]. Ollila *et al* ont proposé le modèle Gaussien composé avec une texture distribuée selon la loi Gaussienne Inverse (*Compound Gaussian model with Inverse Gaussian texture, CG-IG*) pour modéliser les statistiques du clutter de mer [15]. Pour mieux caractériser le clutter de mer, le modèle de Pareto composé a été également proposé avec une possibilité d'inclure toute addition du bruit thermique [16, 17]. Ce modèle s'avère utile comparativement aux modèles existants puisqu'il est capable de modéliser raisonnablement les longues queues caractérisant souvent la distribution empirique du clutter de mer. Dans un contexte plus général, d'autres modèles statistiques, plus au moins efficaces, ont été également développés, surtout depuis l'apparition de la loi K .

La modélisation statistique du clutter de mer a été l'objet de développements continus depuis l'apparition des radars jusqu'à ce jour, notamment pour y inclure de nombreux effets inhérents tels que le bruit thermique et le bruit de la composante Rayleigh (voir la figure I.7). Pour cela, les modèles du clutter qui servent à dimensionner les systèmes radars et à prédire leurs performances, valides pour le besoin d'hier doivent constamment être améliorés au regard de l'accroissement des performances et des fonctionnalités nouvelles demandées aujourd'hui, et encore plus demain.

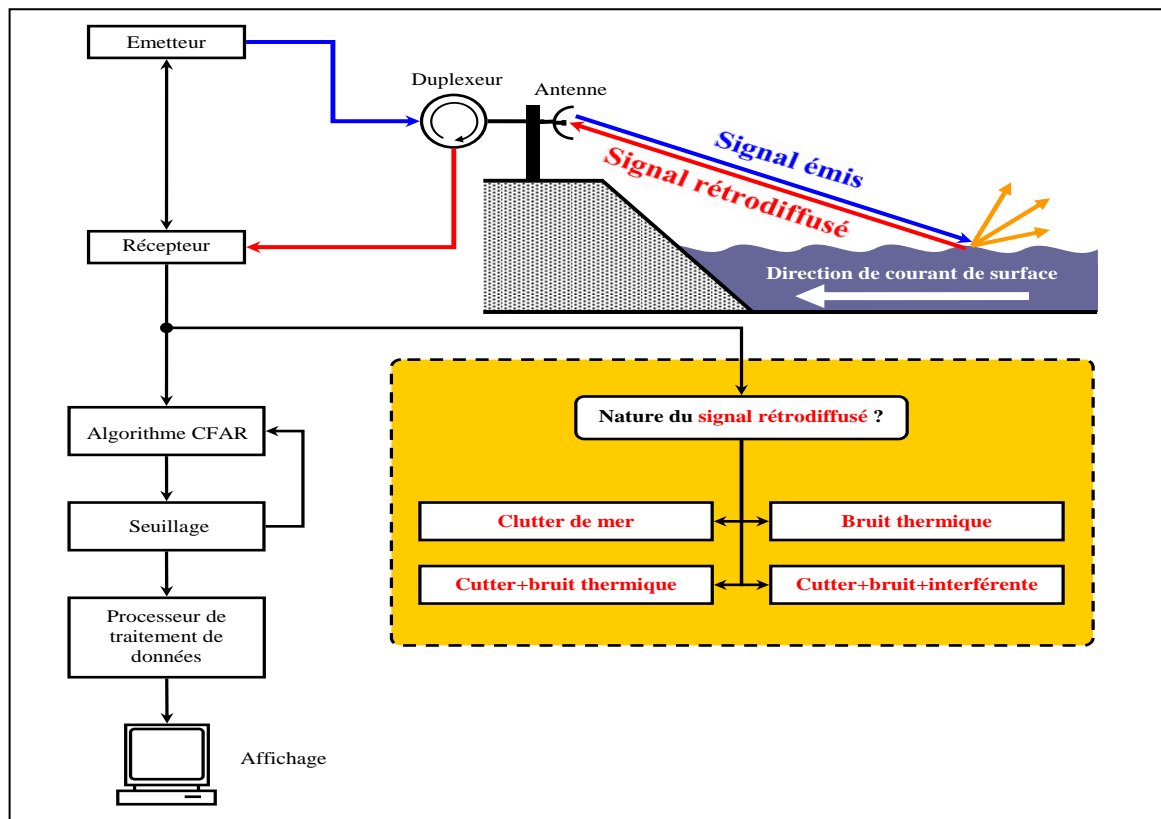


Figure I.7: Modélisation du clutter de mer

I.8 Distributions du clutter de mer

Il est évident que le modèle Gaussien anciennement proposé ne permettait plus de modéliser correctement l'amplitude du clutter, X , en faibles angle incidences et/ou à haute résolution. Dans ces conditions, de forts échos (*spikes*) se détachant du niveau moyen de clutter apparaissent, traduisant un allongement de la queue de la distribution de l'amplitude du clutter et donc un écart par rapport aux statistiques Gaussiennes. Ainsi, des modèles statistiques non-Gaussiens furent proposés dès les années soixante pour modéliser l'amplitude du clutter. Par la suite, on donne un bref rappel sur les distributions associées aux modèles statistiques les plus utilisés dans la littérature de détection des cibles radar [10].

Le clutter peut être considéré comme homogène et non-homogène. Le non homogénéité est causé essentiellement par l'effet de bord de clutter et/ou par la présence des cibles interférentes.

I.8.1 Distribution de Rayleigh (Exponentielle)

En probabilités et en statistiques, la loi de Rayleigh apparaît comme la norme d'un vecteur Gaussien bi-dimensionnel dont les coordonnées sont indépendantes, centrées et

de même variance. Cette loi de probabilité est baptisée d'après Lord Rayleigh. Typiquement, cette loi est fréquemment utilisée pour décrire l'enveloppe d'un processus de Gauss à bande étroite. D'où la fdp de $X = \sqrt{I^2 + Q^2}$ est donnée par [7].

$$p(x) = \frac{2x}{b} \exp\left(-\frac{x^2}{b}\right), \quad x > 0 \quad (\text{I.3})$$

Où I et Q représentent respectivement la composante en phase et en quadrature de phase de l'enveloppe du signal radar reçu. Ces variables aléatoires, I et Q suivent la loi de Gauss de moyenne nulle et d'écart type σ , i.e., $I \rightarrow N(0, \sigma)$ et $Q \rightarrow N(0, \sigma)$. Etant donné N échantillons, x_i , $i=1, \dots, N$, l'estimation ML (maximum likelihood) de la puissance $b = 2\sigma^2$ est

$$\hat{b} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (\text{I.4})$$

Ainsi, la distribution Exponentielle est simplement obtenue si la puissance du clutter à la sortie du détecteur quadratique vaut, $X = I^2 + Q^2$. D'où la fdp de X est

$$p(x) = \frac{x}{b} \exp\left(-\frac{x}{b}\right), \quad x > 0 \quad (\text{I.5})$$

Le paramètre d'échelle $b = 2\sigma^2$ désigne la puissance du clutter estimé par la méthode ML donnée par

$$\hat{b} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{I.6})$$

Généralement, les distributions de Rayleigh ou Exponentielle sont considérées pour la détection des avions noyés dans un milieu atmosphérique.

I.8.2 Distribution de Weibull

Cette distribution est due au mathématicien suédois Waloddi Weibull. Elle est une loi de probabilité qui dépend de deux paramètres c et b qui sont respectivement le paramètre de forme et le paramètre d'échelle. La distribution de Weibull a été introduite par Scheler pour modéliser l'amplitude d'un clutter non-Gaussien donnée par [18].

$$p(x) = \frac{c}{b} \left(\frac{x}{b} \right)^{c-1} \exp \left(- \left(\frac{x}{b} \right)^c \right) \quad (\text{I.7})$$

Pour $c=2$ et $c=1$, cette distribution devient exactement la loi de Rayleigh et la loi Exponentielle respectivement. L'approche ML est aussi utilisée pour estimer c et b par

$$\begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N x_i^{\hat{c}} \ln x_i}{\sum_{i=1}^N x_i^{\hat{c}}} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln x_i = \frac{1}{\hat{c}} \\ \hat{b} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^{\hat{c}} \right)^{1/\hat{c}} \end{cases} \quad (\text{I.8})$$

La loi de Weibull a été largement utilisée pour représenter le clutter de mer et du sol.

I.8.3 Distribution Log-normale

La distribution Log-normale est une loi de probabilité à deux paramètres μ et σ qui sont respectivement la moyenne et l'écart type. Cette loi s'écrit comme [19].

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp \left(- \frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2} \right), x > 0 \quad (\text{I.9})$$

Pour estimer les paramètres μ et σ à partir des données réelles, l'estimateur ML est utilisé comme

$$\begin{cases} \hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log(x_i) \\ \hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\log(x_i)]^2 - \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log(x_i) \right]^2} \end{cases} \quad (\text{I.10})$$

La distribution Log-normale fut considérée dès les années soixante pour modéliser l'amplitude du clutter de la mer et du sol.

I.8.4 Distribution K

La loi K est une distribution Gaussienne composée formée à partir de deux composantes appelées speckle et texture. En comparant avec les modèles de Weibull et Log-

normal, le modèle K s'adapte mieux aux données réelles du radar à haute résolution [10]. Pour obtenir l'expression analytique de la distribution K , on considère l'intégrale suivante

$$p(x) = \int_0^{\infty} p(x|y)p(y)dy \quad (\text{I.11})$$

Où $p(x/y)$ et $p(y)$ suivent la distribution Exponentielle et la distribution gamma respectivement données par

$$\begin{cases} p(x|y) = \frac{1}{y} \exp\left(-\frac{x}{y}\right) \\ p(y) = \frac{b^\nu y^{\nu-1}}{\Gamma(\nu)} \exp(-by) \end{cases} \quad (\text{I.12})$$

En substituant (I.12) dans (I.11), on obtient [10]

$$p(x) = \frac{2b^\nu}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{x}{b}\right)^{\frac{\nu-1}{2}} K_{\nu-1}(2\sqrt{bx}) \quad , x > 0 \quad (\text{I.13})$$

Avec b est le paramètre d'échelle, ν est le paramètre de forme et $K(.)$ est la fonction de Bessel modifiée de deuxième espèce d'ordre $\nu-1$. Plusieurs méthodes d'estimation ont été proposées pour l'estimation du paramètre de forme ν . Parmi ces méthodes on cite la méthode des moments d'ordre supérieurs (HOME) [10], la méthode des moments d'ordre fractionnaire (FOME) [21], la méthode [zlog(z)] [22], la méthode MLE numérique [16], etc.

I.8.5 Distribution de Pareto généralisée (GP)

La distribution GP est définie par un paramètre de forme α et un facteur d'échelle c . De même que pour la loi K composée, cette distribution est obtenue en moyennant la composante speckle sur toutes les valeurs possibles de la composante texture. Les deux composantes sont [17, 18].

$$\begin{cases} p(x|y) = \frac{1}{y} \exp\left(-\frac{x}{y}\right) \\ p(y) = \frac{c^\alpha y^{-\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-c/y) \end{cases} \quad (\text{I.14})$$

Le modèle globale GP est obtenu analytiquement après la substitution de (I.14) dans (I.11)

$$p(x) = \frac{\alpha c^\alpha}{(x+c)^{\alpha+1}}, x > 0 \quad (\text{I.15})$$

Cette distribution ajuste mieux les échos de la mer provenant du radar à haute résolution. Les méthodes d'estimation CMLE [17], [zlog(z)] [24] et FOME [23] peuvent aussi être utilisées pour affiner les estimés des paramètres de la distribution GP.

I.8.6 Distribution de Pareto

La distribution de Pareto (ou de première espèce) a été validée récemment comme un modèle statistique pour les échos (retours du clutter) de la mer à haute résolution. Elle est définie par deux paramètres: un paramètre de forme α et un facteur d'échelle β . La pdf correspondante est donnée par [15].

$$p(x) = \frac{\alpha \beta^\alpha}{x^{\alpha+1}}, x > 0 \quad (\text{I.16})$$

Les estimateurs MLE et UE (*Unbiased Estimator*) peuvent être retenus comme estimateurs efficaces des paramètres de cette distribution. En outre, une autre approche basée sur les statistiques d'ordre et la régression linéaire a été récemment proposée dans [25].

I.8.7 Distribution Log-normale composée (CLN)

Comme n'importe quelle loi composée, la distribution Log-normale composée, que l'on note *CLN* (*Compound Log-Normal distribution*), est donnée sous la forme (I.17). Dans cette modélisation statistique, la texture obéit à la loi Log-normale définie par (I.9), tandis que le speckle est distribué selon (I.12). Si ce dernier est pris en considération, la PDF globale de la distribution *CLN* du signal reçu est donnée sous la forme suivante [14].

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^\infty \frac{1}{y^2} \exp\left(-\frac{(\ln(y)-\mu)^2}{2\sigma^2} - \frac{x}{y}\right) dy, x > 0 \quad (\text{I.17})$$

Cette PDF n'a pas d'expression analytique compacte dont les méthodes numériques peuvent être utilisées pour évaluer (I.17). La méthode PCFE (curve fitting estimation method) a été utilisée pour estimer les paramètres μ et σ [26].

I.8.8 Distribution Gaussienne composée Inverse (CIG)

Le modèle CIG a été proposé dans [14, 27] où la composante texture suit la loi Gaussienne inverse (IG) définie par un paramètre de forme λ et une moyenne μ [28-30].

$$p(y) = \frac{\lambda^{1/2}}{\sqrt{2\pi} y^{3/2}} \exp\left(-\lambda \frac{(y-\mu)^2}{2\mu^2 y}\right) \quad (\text{I.18})$$

La composante du speckle suit la loi Exponentielle donnée par

$$p(x|y) = \frac{1}{y} \exp\left(-\frac{x}{y}\right) \quad (\text{I.19})$$

Substituant (I.18) et (I.19) dans (1.9), le modèle CIG devient

$$p(x) = \left(\frac{\sqrt{\lambda}}{(\lambda + 2x)^{3/2}} + \frac{\lambda}{\mu(\lambda + 2x)} \right) \exp\left(\frac{\lambda}{\mu} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{2x}{\lambda}} \right) \right) \quad (\text{I.20})$$

I.8.9 Distribution généralisée composée (GC)

Dans le but de regrouper plusieurs modèles statistiques tels que les distributions de Rayleigh, Weibull, Log-normal, K , K généralisée, gamma généralisée, gamma et hypergéométriques, le modèle GC a été proposé et validé sur plusieurs bases de données radar à haute résolution [31]. Subséquemment, les distributions des composantes speckle et texture sont représentées respectivement par deux distributions gamma généralisée données par

$$\begin{cases} p(x|y) = \frac{b_1}{y\Gamma(\nu_1)} \left(\frac{x}{y}\right)^{b_1\nu_1-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{y}\right)^{b_1}\right) \\ p(y) = \frac{b_2}{y\Gamma(\nu_2)} \left(\frac{y}{a}\right)^{b_2\nu_2-1} \exp\left(-\left(\frac{y}{a}\right)^{b_2}\right) \end{cases} \quad (\text{I.21})$$

Où a est le paramètre d'échelle, $\nu_{1,2}$ sont les paramètres de formes et $b_{1,2}$ sont les paramètres de puissances de la distribution gamma généralisée ($G\Gamma$). La PDF totale de x est obtenue à partir de (1.9) comme

$$\begin{aligned}
p(x) &= \int_0^{\infty} p(x|y)p(y)dy \\
&= \frac{b_1 b_2}{\Gamma(\nu_1)\Gamma(\nu_2)} \frac{x^{b_1 \nu_1 - 1}}{a^{b_2 \nu_2}} \int_0^{\infty} y^{b_2 \nu_2 - b_1 \nu_1 - 1} \exp\left(-\left(\frac{x}{y}\right)^{b_1} - \left(\frac{y}{a}\right)^{b_2}\right) dy
\end{aligned} \tag{I.22}$$

A partir de cette distribution, on peut obtenir plusieurs modèles statistiques en jouant sur les valeurs des paramètres de formes et de puissances. A titre d'exemples, on peut acquérir les distributions statistiques suivantes:

(i) La distribution K généralisée (GK) est obtenue à partir du modèle GC en prenant $b_1 = b_2 = b$.

Alors, les paramètres du modèle GK sont ν_1, ν_2, b et a .

(ii) La distribution K est obtenue à partir de la distribution GK en mettant $b_1 = b_2 = b = 2$ et $\nu_1 = 1$.

Alors, les paramètres du modèle K sont ν_2 et a .

(iii) La distribution Weibull est obtenue à partir de la distribution GK si $b_1 = b_2 = b, \nu_1 = 1$,

$\nu_2 = 1/2$. Alors, les paramètres du modèle de Weibull sont b et a .

(iv) La distribution de Rayleigh est obtenue à partir de la distribution de Weibull si $b = 2$.

Alors, nous avons un seul paramètre, a du modèle de Rayleigh.

(v) La distribution Weibull-speckle-Gamma-Mean (WG) est obtenue à partir de la composante speckle définie par le modèle de Weibull ($b_1 = b$ et $\nu_1 = 1$) et la composante texture définie par le modèle gamma ($b_2 = 2$ et $\nu_2 = \nu$). Alors, le modèle WG contient trois paramètres qui sont b, ν et a .

(vi) Les distributions hypergéométriques (HG) sont obtenues si les paramètres b_1 et b_2 prennent des valeurs entières.

La Figure I.7 récapitule les différentes distributions ci-dessus comme des cas particuliers du modèle GC en commençant par le modèle le plus général GC jusqu'à le modèle de Rayleigh (Gaussien). L'estimation des différents paramètres doivent être effectuée afin de savoir le modèle le plus adapté aux échos provenant du radar.

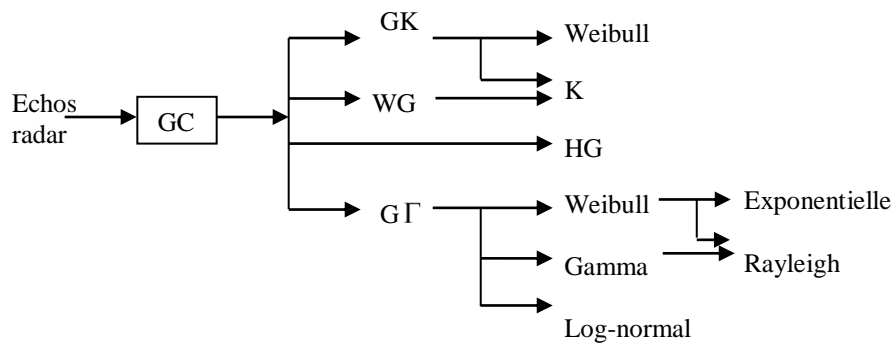


Figure I.8 : Modèle GC et ses distributions dérivées les plus utilisées en détection radar

I.9 Estimation des paramètres

Dans les sections précédentes, nous avons mis en évidence la relation très étroite entre la modélisation du clutter, l'estimation des paramètres du modèle statistique du clutter et la détection des cibles en présence de clutter. Nous avons également montré que le clutter est la principale source d'erreurs de détection. De plus, il a été montré que la théorie statistique de la détection radar s'appuie sur une modélisation statistique du clutter pour développer les tests de détection dont on a besoin. Ces tests sont souvent liés aux paramètres du modèle de clutter adopté. Dans des scénarios réalistes, les vraies valeurs de ces paramètres ne sont jamais connues au préalable, cependant elles doivent être remplacées par leurs estimateurs. Ces estimateurs doivent être donc calculés de manière optimale, ou tout du moins s'approchés de leurs valeurs théoriques, pour pouvoir aider ensuite à l'optimisation des performances de détection des cibles. En pratique, lorsque ces estimateurs sont inexacts, les détecteurs basés sur ces tests peuvent subir de grandes difficultés pour pouvoir isoler le signal de la cible utile. Pour pallier ce problème, on recourt à l'usage des estimateurs plus efficaces pour lesquels les tests issus des différentes stratégies de détection sont robustes. Il est alors clair que l'estimation des paramètres d'un modèle statistique du clutter doit faire l'objet de toutes les attentions afin d'améliorer les performances des radars. En particulier, l'estimation des paramètres caractérisant un modèle statistique du clutter de mer est l'une des questions théoriques les plus importantes en télédétection et surveillance maritime [8, 10, 15].

L'estimation a pour objectif essentiel de déterminer les valeurs inconnues des paramètres d'un modèle statistique à partir des données observées. Ainsi, comme les données observées ne peuvent donner qu'une information partielle sur la réalité, les estimations que l'on obtiendra seront inévitablement entachées d'erreurs qu'il s'agit d'évaluer et de minimiser

autant que possible. En résumé, estimer un paramètre inconnu, c'est en donner une valeur approchée à partir des résultats obtenus sur un échantillon aléatoire des données observées.

En général, il y a deux types de l'estimation des paramètres d'un modèle statistique : l'estimation ponctuelle et l'estimation par intervalle de confiance. L'estimation ponctuelle est une estimation donnée par valeur scalaire issue des données observées et n'apporte aucune information sur la précision des résultats. Pour évaluer la confiance que l'on peut avoir en une valeur estimée, il est nécessaire de déterminer un intervalle contenant, avec une certaine probabilité fixée au préalable, la vraie valeur du paramètre : c'est l'estimation par intervalle de confiance. D'ailleurs, la connaissance des lois de probabilités de ces estimateurs est nécessaire pour réaliser une estimation par intervalle de confiance [8].

Ainsi, comme il est fortement difficile de connaître exactement les lois de probabilités qui régissent les estimateurs par intervalle de confiance, nous nous intéressons donc à l'estimation ponctuelle. Dans ce cas-ci, le but de la théorie de l'estimation est de choisir, parmi toutes les statistiques possibles, le meilleur estimateur convergeant, i.e., celui qui donnera une estimation ponctuelle la plus proche possible du vrai paramètre et ceci, quelques soit l'échantillon observé. Dans ce mémoire, la propriété la plus désirable pour un estimateur donnée est d'avoir une faible erreur quadratique moyenne (*Mean Square Error, MSE*), ce qui n'exige pas forcément d'être sans biais [8].

I.10 Critères des performances d'estimation

Il existe bien plusieurs critères (tests) et nous étudierons en particulier l'erreur quadratique moyenne (MSE) qui est très répandus, on parle également de test de biais relatif et l'écart type normalisé.

Le critère MSE : Le critère quantitatif adopté (i.e., la MSE) est réalisés en découpant les données en intervalles pour obtenir des classes comme on le ferait pour un histogramme. Ainsi, pour n classes, la MSE est définie comme suit

$$MSE = \langle (\hat{\lambda} - \lambda)^2 \rangle \quad (I.23)$$

Le biais relatif : L'erreur de biais relative est utilisé pour évaluer les estimateurs et peut être défini comme :

$$b_r = \frac{\langle \hat{\lambda} \rangle}{\lambda} - 1 \quad (\text{I.24})$$

L'écart type normalisé : ce test peut être défini comme :

$$\sigma_{\lambda} = \sqrt{\left[\hat{\lambda}^2 \right] + \left[\hat{\lambda} \right]^2} \quad (\text{I.25})$$

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté au premier temps le principe de fonctionnement, les classifications et les différents composants d'un radar. La problématique de la modélisation et l'estimation des paramètres du clutter de mer sont discutées où une série de modèles statistiques du clutter est également présentée. Puis, les critères des performances d'estimation ont été donnés. Dans le chapitre qui se suit, on va introduire une nouvelle technique de seuillage dans le but de résoudre le problème de l'estimation des paramètres de la distribution $K+B$ en particulier dans le cas d'une transmission d'une seule impulsion.