

# Chapitre 1

## Notions radar

### Résumé

*Dans ce chapitre, nous allons présenter le principe de fonctionnement d'un radar à impulsions ainsi que les différentes opérations de traitement du signal radar. Puis, on présente les modèles statistiques des cibles selon les quatre types de Swerling en tenant compte la présentation des modèles les plus utilisés pour la modélisation du clutter de mer ou du sol sans et avec bruit.*

### Sommaire

- 1. 1 Introduction
- 1. 2 Classification du radar
  - 1. 3 Principe de fonctionnement d'un système radar
- 1. 4 Description du radar
- 1. 5 les composants d'un système radar
- 1. 6 Equation du radar en espace libre
- 1. 7 Théorie de la décision
- 1. 8 Modèles statistiques des cibles
- 1. 9 Modèles statistiques du clutter de mer
- 1. 10 Conclusion

## 1. 1 Introduction

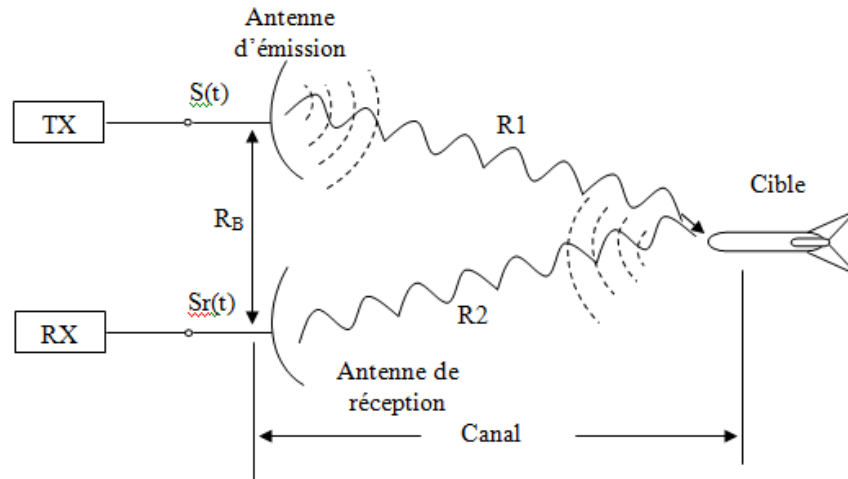
Le radar est un instrument électromagnétique utilisé pour la détection et la localisation des cibles, telles que les avions, les bateaux, et les véhicules. Il transmet des ondes radio (énergie électromagnétique) vers la cible dans une direction donnée puis il détecte cette même onde réfléchie pour déterminer la distance et/ou la vitesse des objets. Le mot “**RADAR**” lui-même est un néologisme provenant de l’acronyme anglais : **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging, que l’on peut traduire en français par « détection et estimation de la distance par ondes radio » ou plus simplement « radiorepérage ». Cet acronyme d’origine américaine a remplacé le sigle anglais précédemment utilisé “RDF” (*Radio Direction and Finding*). Plusieurs formes du système radar ont été développés dans les années 1903 jusqu’au 1925 qui sont capable de mesurer la distance des cibles appelée “Target’s range” (portée de la cible). Dans 1925 à 1926 Briet et Tuve sont les premiers qui ont appliqué les radars à impulsions pour la mesure de la portée. Tous les premiers radars utilisent les ondes radio, mais aujourd’hui quelques radars modernes sont basés sur les ondes optiques qui utilisent les lasers. En ce qui concerne son utilisation pratique, les fonctions que le radar doit accomplir et ses nouvelles techniques croissent presque jour après jour. Le radar est un instrument essentiel à la sécurité de la navigation maritime et aérienne. Constamment en alerte, il aide les forces armées dans leur tâche de détection des avions et fusées téléguidées de l’ennemi. La nuit ou lorsque le temps est mauvais, il aide les avions à atterrir, Il est utilisé sur mer pour détecter la présence de navires ennemis et sur terre pour renseigner sur les mouvements des forces adverses. La météorologie l’utilise également pour ses prévisions atmosphériques. Il permet à l’homme de science de suivre les divers objets qui sont régulièrement envoyés dans l’espace. Il est même utilisé par la police de la route dans sa chasse à l’excès de vitesse [1].

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 et l’analyse de performance de la détection CFAR dans les environnements marins.

On va établir une étude théorique des différents modèles statistiques du clutter et modèles statistiques des cibles de mer qui sont souvent appliqués dans la majorité des situations pratiques.

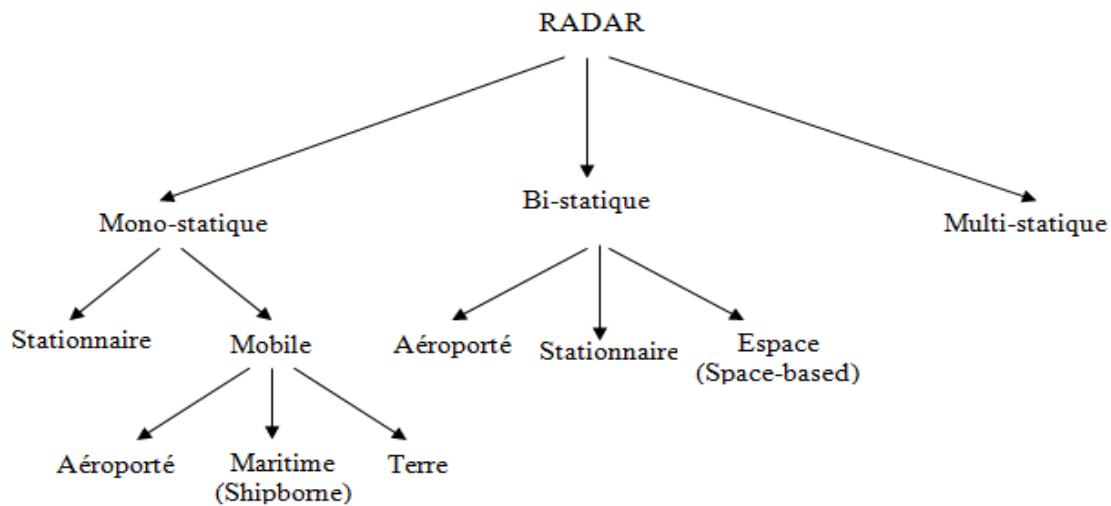
Succinctement, tout système radar comme montré dans la Fig. 1. 1 se compose d’un émetteur (TX: Transmettre) qui produit des ondes électromagnétiques de haute fréquence, lesquelles sont ensuite transmises à l’antenne émettrice. Un récepteur (RX : Receiver)

connecté à une antenne de réception amplifie les signaux réfléchies afin de permettre leur lecture [1].



**Figure 1.1** Forme général 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. Fig.1. 2 montre les différents types possibles des systèmes radar. Au point de vue de faciliter l'opération, le radar mono statique il est largement utilisé et ses performances 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 a été utilisé, ou proposé pour l'usage, dans plusieurs domaines d'application, dans les systèmes militaires et civils. En ce qui concerne son utilisation pratique, les fonctions que le radar doit accomplir et ses nouvelles techniques croissent presque jour après jour. Le radar est un instrument essentiel notamment à la sécurité de la navigation maritime et aérienne dans les mauvaises circonstances. Dans le contexte militaire constamment en alerte, il aide les forces armées dans leur tâche de détection des cibles ; il est utilisé également dans le domaine maritime pour détecter la présence de navires ennemis et sur terre pour renseigner sur les mouvements des forces adverses. En météorologie, il sert à estimer les changements atmosphériques (la vitesse du vent, le spectre des gouttes de pluie,....etc.). Il est même utilisé par la police de la route dans sa chasse à l'excès de vitesse.

**Figure 1. 2** Différent types des systèmes radar**Tableau 1.1** diverses application du système radar

Catégories	Applications
Civil	Surveillance routière Surveillance superficielle Contrôle aérien Contrôle de trafic terrestre Détection et prévision météorologique Astronomie Reconnaissance des objets Surveillance et poursuite satellitaire Navigation Contrôle de trafic (mesure de vitesse)
Militaire	Défence aérienne et maritime Guidage, et recherche des missiles Detection des personnes Collecte de données d'intelligence Détection, identification, et localisation de cible Guidage et contrôle des armes

En outre, les principales fonctions du radar incluent la recherche ; la détection des cibles ; la mesure de position de cible et la poursuite ; et la mesure des caractéristiques de cible ...etc. Communément, les applications radar les plus spectaculaires aujourd'hui sont d'ordre militaire ou spatial. Le tableau 1.1 énumère certaines applications divisées en deux grandes catégories principales.

## 1. 2 Classification du radar

Les radars peuvent être arrangés en plusieurs classes, à savoir terrestres, aéroportés, et les radars navals ou marins. Ils peuvent également être classés dans de nombreuses catégories basées sur les caractéristiques spécifiques du radar lui-même, telles que la bande de fréquence, le type d'antenne, et les formes d'ondes utilisées. Une autre classification se fonde sur l'application et/ou la fonctionnalité du radar (voir tableau 1.1). Ceci inclut: la météo, l'acquisition et la recherche, la poursuite (tracking, en track-while-scan)...etc. De point de vue de leurs fonctionnements, en fonction du signal émis, les radars peuvent en gros se classer selon les formes d'onde qu'ils emploient, ou selon leur fréquence d'opération, en deux catégories. La première inclut les radars à impulsions (pulse radars), où le radar émet une impulsion et attend le retour; et la deuxième inclut les radars à ondes continues (continuous Wave Radars), où le radar émet continuellement l'énergie électromagnétique à partir d'une antenne et reçoit à l'aide d'une seconde antenne séparée de la première. Les radars à ondes continues non modulées peuvent mesurer la vitesse radiale (effet doppler) et la position angulaire de la cible, sans pouvoir de la localiser. Ils peuvent être également utilisés pour la poursuite et le guidage des missiles. Généralement, les radars à impulsion utilisent un train d'impulsions (principalement en utilisant la modulation) et par conséquent, ils peuvent être classés, selon la fréquence de répétition d'impulsion (pulse repetition frequency, PRF), en radars à basse PRF, à moyenne PRF, et à haute PRF. Les radars à basse PRF sont essentiellement utilisés pour mesurer la distance (la portée) des cibles, d'où sa vitesse (effet doppler) n'est pas considérée. Les radars à haute PRF sont utilisés notamment pour mesurer la vitesse des cibles [2].

Nom de la bande	Gamme de fréquences	Bandes assignées par l'ITU
HF	3–30 MHz	
VHF	30–300 MHz	138–144 MHz 216–228 MHz
UHF	300–1000 MHz	420–450 MHz 890–942 MHz
L	1–2 GHz	1.215–1.4 GHz
S	2–4 GHz	2.3–2.5 GHz 2.7–3.7 GHz
C	4–8 GHz	5.250–5.925 GHz
X	8–12 GHz	8.5 – 10.68 GHz
Ku	12–18 GHz	13.4–14 GHz 15.7–17.7 GHz
K	18–27 GHz	24.05–24.25 GHz
Ka	27–40 GHz	33.4–36 GHz
V	40–75 GHz	59–64 GHz
W	75–110 GHz	76–81 GHz 92–100 GHz
Ondes millimétriques	110–300 GHz	126–142 GHz 144–149 GHz 231–235 GHz 238–248 GHz

Source: IEEE Standard for Letter Designations for Radar–Frequency Bands, New York: The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc., January 8, 2003.

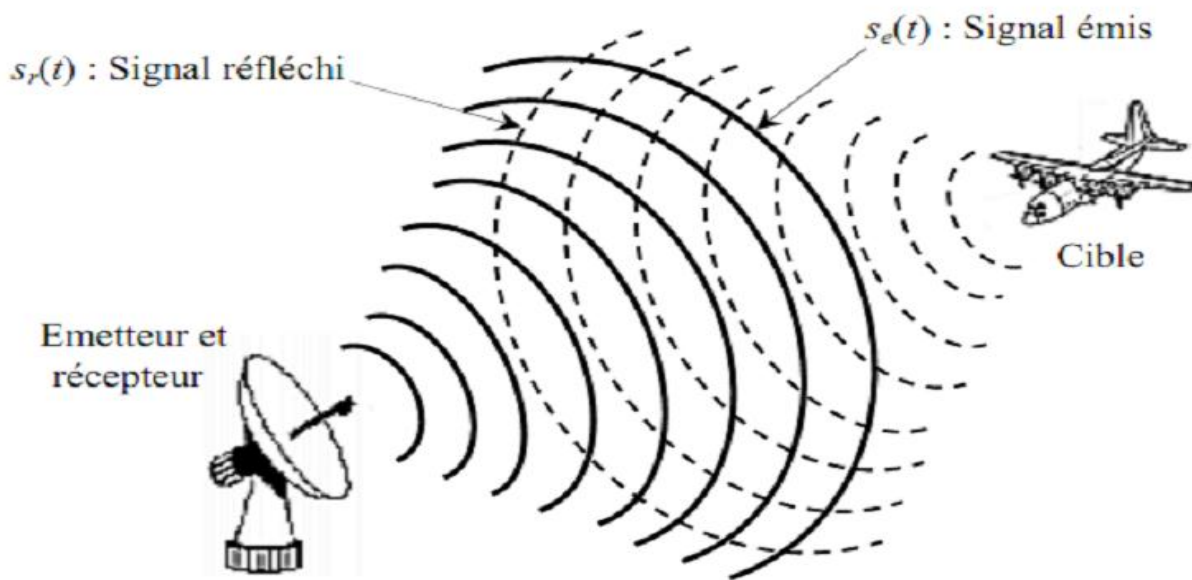
**Tableau 1. 2** Bandes de fréquence de radar [3, 4]

Le tableau 1.2, montre une classification des systèmes radar basée sur la bande de fréquences utilisée. En effet, pour garder secret de développement de ce système, les militaires ont décidé de donner à ces gammes de noms de code qui sont demeurés en usage pour plusieurs années. Ils ont été adoptés aux états-unis par "the institute of electrical and electronics engineers (IEEE)" et internationalement par <<the international telecommunication union(ITU)>>.cependant, certains utilisateurs de bandes radios,comme les télédiffuseurs et l'industrie des contre –mesures militaires, ont remplacé les vocables traditionnels par leur propre identification.

### 1. 3 Principe de fonctionnement d'un système radar

Le principe utilisé par les radars est semblable voisin à celui de la réflexion des ondes sonores (voir Figure 1.3). L'énergie rayonnée dans les limites du faisceau se propage vers l'objet à la vitesse de la lumière. Quand celle-ci frappe un obstacle, une fraction de cette énergie est réfléchi (écho radar) et captée au retour en un court laps de temps après la transmission, par un récepteur sensible de différentes manières en fonction des caractéristiques de l'onde émise et l'état physique de la cible. Ce signal échoïque, est ensuite amplifié et transformé en signal visuel sur l'écran (indicateur), qui est parfois un moniteur d'ordinateur. Sachant que les émetteurs et les récepteurs radar sont généralement situés au même endroit.

Il est nécessaire que l'impulsion soit très courte et puissante pour détecter plusieurs petits objectifs souvent rapprochés les uns des autres. Ces caractéristiques sont indiquées par le pouvoir de résolution et la sensibilité. Un radar doté d'un pouvoir de résolution élevée peut identifier séparément des objets éloignés de quelques mètres seulement les uns des autres. Le radar détermine ainsi l'éloignement de la cible en mesurant le temps écoulé entre l'émission de l'impulsion et le retour de l'écho [14].



**Figure 1.3** Principe de fonctionnement d'un RADAR

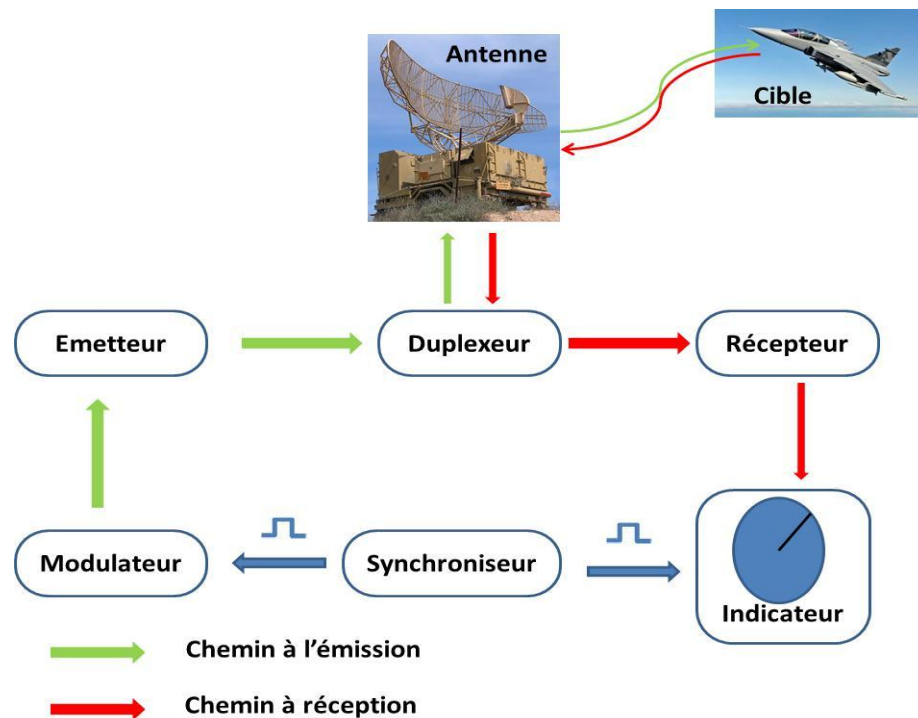
#### 1. 4 Description du radar

Le radar fait usage de l'écho produit par un obstacle situé sur la trajectoire d'une onde électromagnétique. Dans la majorité des cas, l'émetteur et le récepteur sont connectés à une antenne commune : c'est cette situation qui est considérée ici. Le temps qu'il faut à une onde électromagnétique pour aller de l'émetteur à l'obstacle, puis de l'obstacle au récepteur est mesuré et permet de calculer la distance  $R$ . La variation de fréquence du signal sert à déterminer la vitesse relative de l'obstacle par rapport à la source (effet Doppler). La direction dans laquelle se trouve l'obstacle est obtenue en pointant une antenne à faisceau étroit dans la direction donnant le plus grand signal réfléchi. Le schéma de principe d'un radar est donné par la Figure 1. 3, dans laquelle sont représentés symboliquement tous les termes qui le

caractérisent. Les systèmes de radar sont très largement traités dans des ouvrages spécialisés [15].

### 1.5 Les composants d'un système radar

Le schéma ci-dessous (Figure. 1. 4) illustre les différentes composantes d'un radar.



**Figure. 1. 4** Présentation schématique d'un radar

**Le synchroniseur :** C'est le composant le plus important dans le système radar, il contient une horloge de très grande stabilité.

**Le modulateur :** Le modulateur est un circuit électronique qui permet de fractionner le signal radio en pulsations.

**L'émetteur :** L'émetteur doit émettre des signaux de radio fréquence (RF) de grande quantité d'énergie dans un court temps.

**Le duplexeur :** Un commutateur électronique qui dirige l'onde vers l'antenne lors de l'émission et oriente 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'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 [16].

## 1. 6 Equation du radar en espace libre

L'équation du radar traduit l'influence de 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 dû 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 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 [1, 2]:

$$P_r = \frac{P_p G^2 \lambda^2 \sigma_r}{(4\pi)^3 D^4 L_t L_r} \quad (1.1)$$

où  $L_t$  et  $L_r$  représentent 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  $\lambda$  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. Sinon, 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 (1.1):

$$D_{\max} = \left[ \frac{P_p G^2 \lambda^2 \sigma_r}{(4\pi)^3 P_{\min} L_t L_r} \right]^{1/4} \quad (1.2)$$

où  $K^\circ$  est la constante de Boltzmann,  $T^\circ$  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.

## 1. 7 Theorie de decision

L'objectif des divers mécanismes de décision est de déterminer un algorithme de traitement du processus aléatoire,  $Q(t)$ , observé à la sortie d'une cellule distance afin de décider sur la présence ou l'absence d'une cible [2]. Parmi les tests de décision sont:

### i) Tests d'hypothèses

La Figure 1.5 illustre les problèmes de tests d'hypothèses pour le cas de décision entre deux alternatives possibles désignées par les hypothèses  $H_1$  et  $H_0$  dont  $H_0$  représente une cible absente et  $H_1$  représente une cible présente. Une cellule dans l'espace de surveillance peut être considérée comme étant une source qui délivre deux signaux:

- (i) Le signal,  $s_1(t)$ , sous  $H_1$  contient le signal utile de la cible,  $s(t)$ , et le bruit additif,  $n(t)$ .
- (ii) Le signal,  $s_0(t)$ , sous  $H_0$  ne contient que le bruit,  $n(t)$ .

Le système de décision est alors définie par une application de l'espace des observations dans l'ensemble des hypothèses possibles. On indique cette application par règle de décision qui détermine l'espace des observations, une partition en sous-ensembles disjoints. Chaque sous-ensemble correspondant aux observations qui sont associées à une même hypothèse.

Règle de décision  $\Leftrightarrow$  partition de l'espace d'observation en régions,  $R_i$ , associées aux différentes hypothèses:  $R_i \leftrightarrow H_i, i=0,1$

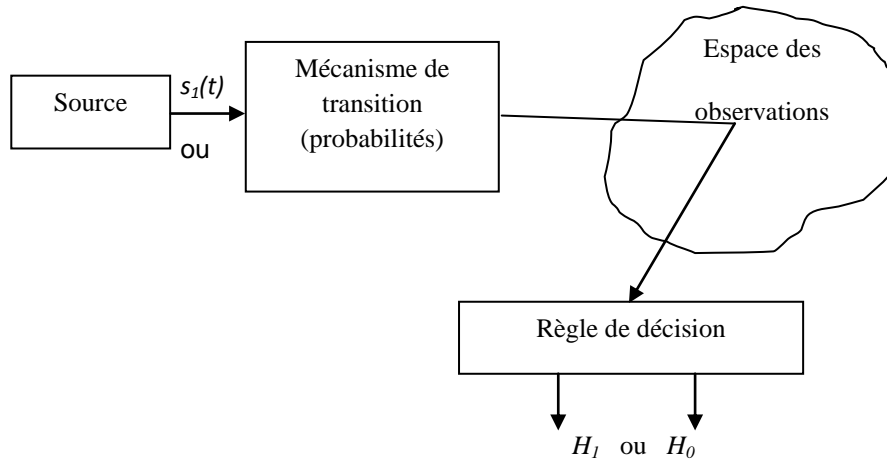
### ii) Tests de Bayes

L'approche Bayésienne est basée sur la connaissance pour chaque hypothèse,  $H_i$ , de la probabilité *a priori* pour que cette hypothèse se réalise

$$P_i = P_r(H_i) \quad i=0,1 \quad (1.3)$$

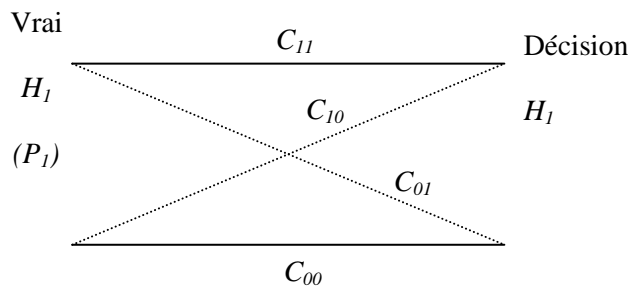
Et qui associe, à chaque comportement possible du système de décision, un coût (équivalent à une pénalisation ou une récompense)

$C_{ij}$  = coût de décider  $H_i$  quant  $H_j$  est vraie



**Figure. 1. 5** Décision entre deux hypothèses alternatives

La Figure 1.6 illustre la définition de ces quantités pour un test binaire (où on considère que seulement deux hypothèses sont possibles).



**Figure. 1. 6** Définition des quantités pour un test binaire

Les lignes interrompues représentent les situations d'erreur. Les tests de Bayes consiste à déterminer les régions de décision  $R_1$  et  $R_2$  de façon à minimiser la valeur moyenne du coût :

$$C_m = C_{00}P_r\{H_0, H_0\} + C_{10}P_r\{H_1, H_0\} + C_{01}P_r\{H_0, H_1\} + C_{11}P_r\{H_1, H_1\} \quad (1.4)$$

Chaque probabilité conjointe qui figure dans cette expression peut être écrite comme :

$$P_r\{H_i, H_j\} = P_r\{H_i / H_j\}P_j = P_r\{r \in R_i\}P_j = P_j \int_{R_i} p(r / H_j) dr \quad (1.5)$$

Dans le cas de tests binaires, les deux régions de décision sont complémentaires,  $R_i = \overline{R_j}$ , et on peut donc écrire

$$\int_{R_i} p(r) dr = 1 - \int_{R_j} p(r) dr, \quad j \neq i; i, j = 0, 1 \quad (1.6)$$

Avec ce résultat, on peut exprimer le coût de Bayes  $C_m$  en fonction d'une seule région:

$$C_m = C_{11}P_1 + C_{10}P_0 + \int_{R_0} [P_1(C_{01} - C_{11})P(r/H_1) - P_0(C_{10} - C_{00})P(r/H_0)] dr \quad (1.7)$$

Les deux premiers termes dans (1.7) ne dépendent pas des régions de décision, et constituent une pénalisation fixe. Pour minimiser  $C_m$ , il faut donc minimiser l'intégrale. Pour cela, on doit attribuer à  $R_0$  tous les points de l'espace des observations pour lesquels l'intégrand est négatif, ce qui est équivalent à la règle de décision suivante :

$$\Lambda(r) = \frac{P_{r/H_1}}{P_{r/H_0}} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \frac{p(H_0)(C_{10} - C_{00})}{p(H_1)(C_{01} - C_{11})} = \gamma \quad (1.8)$$

On voit donc que le test de Bayes conduit à comparer le rapport entre les fonctions densité de probabilité (fdp) conditionnelles (rapport de vraisemblance) à un seuil  $\gamma$ .

Puisque l'application d'une fonction monotone n'affecte pas la validité d'une inégalité, le test de Bayes est équivalent au test suivant :

$$\ln \Lambda(r) = \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \ln \gamma = \eta \quad (1.9)$$

On appelle  $\ln \Lambda(r)$  le rapport de vraisemblance logarithmique.

### iii) Statistique suffisante

On appelle statistique une application de l'espace des observations dans un autre espace, en général de dimension plus petite que celle de l'espace des observations. Pour des problèmes où les observations prennent des valeurs dans un espace de dimension élevée (ou même infini, comme c'est le cas du problème de communication binaire), il est souvent pratique de formuler le problème de décision en considérant une statistique qui est obtenue à partir des observations, au lieu de les traiter directement. La notion des statistiques suffisantes établit les conditions dans lesquelles on peut faire cette compression de données sans perte d'information. Par définition,  $m(r)$  est une statistique suffisante si on peut factoriser les densités conditionnelles pour chaque hypothèse de la façon suivante :

$$p(r/H_i) = f_i(m(r))g(r) \quad (1.10)$$

Où  $g(r)$  dépend des observations mais pas de l'hypothèse,  $i$ . Dans ce cas le rapport de vraisemblance dépend des observations,  $r$ , uniquement à travers la statistique suffisante :

$$\Lambda(r) = \frac{p_{r/H_1}}{p_{r/H_0}} = \frac{f_1(m(r))}{f_0(m(r))} \quad (1.11)$$

#### iv) Test de Neyman-Pearson (N-P)

Pour beaucoup d'applications, les probabilités *a priori*,  $P_i$  ne sont pas connues et on ne peut pas en conséquence, appliquer l'approche Bayésienne, où encore même si elles sont connues, le critère ajusté au problème n'est pas obtenu par des considérations pour tout l'ensemble de situations possibles. Les tests de N-P constituent dans ce cas une approche alternative. Au lieu de considérer l'occurrence de chaque hypothèse comme un phénomène aléatoire, et d'optimiser la performance moyenne, le test de N-P agit directement sur les mesures de performance suivantes [2]:

$$P_D = P_r(\text{décider } H_1 / H_1) \quad (1.12)$$

$$P_F = P_r(\text{décider } H_1 / H_0) \quad (1.13)$$

$$P_M = P_r(\text{décider } H_0 / H_1) \quad (1.14)$$

$P_D$  est appelée la probabilité de détection,  $P_F$  la probabilité de fausse alarme et  $P_M$  est la probabilité de non détection (Miss).

On veut usuellement avoir une valeur de  $P_D$  la plus grande possible et en même temps une valeur de  $P_F$  la plus petite possible. Cependant, ces deux contraintes ne sont pas indépendantes, et sont même contradictoire: pour augmenter  $P_D$ , on doit augmenter  $R_I$ , et pour minimiser  $P_F$ , on doit diminuer  $R_I$ . Les tests de N-P correspondent à maximiser  $P_D$  avec une contrainte fixe du  $P_F$  (max  $P_D$  sous la contrainte  $P_F = \alpha_0$ ). La solution est obtenue à travers l'utilisation des multiplicateurs de Lagrange, et est encore une fois, donnée par le rapport de vraisemblance suivant:

$$\Lambda(r) = \begin{matrix} H_1 \\ > \\ < \\ H_0 \end{matrix} \lambda \quad (1.15)$$

Où maintenant le seuil,  $\lambda$  est déterminé de façon à vérifier la contrainte

$$P_{FA} = \int_{\lambda}^{\infty} p(\Lambda / H_0) d\Lambda = \alpha_0 \quad (1.16)$$

Pour arriver à cette solution on minimise la fonction objective  $J$ , qui est obtenue en ajoutant à la fonction à minimiser  $P_M$ , le multiplicateur de Lagrange fois la contrainte.

$$\begin{aligned}
J &= P_M + \lambda(P_F - \alpha_0) \\
&= \int_{R_0} p(r/H_1)dr + \lambda \left( \int_{R_1} p(r/H_0)dr - \alpha_0 \right) \\
&= \lambda(1 - \alpha_0) + \int_{R_0} (p(r/H_1) - \lambda p(r/H_0))dr
\end{aligned} \tag{1.17}$$

Il résulte immédiatement de cette expression que la règle de décision optimale est encore la comparaison du rapport de vraisemblance avec un seuil,  $\lambda$ , qui doit être déterminé de façon à satisfaire la contrainte. Ceci est obtenu en définissant  $R_0$  comme l'ensemble des points  $r$  où la fonction intégrée est négative.

### v) Critère de Minimax:

Les tests de Minimax sont une autre façon de résoudre des problèmes de décision quand on ne connaît pas les probabilités *a priori* et correspondent à choisir le test qui a la meilleure performance dans le cas le plus défavorable [2]. Pour obtenir ce test, on commencera par analyser l'influence du choix du seuil sur le risque de Bayes. Admettons alors qu'une certaine valeur du seuil de décision est fixée, soit,  $\eta_0$ . Une fois que le seuil est fixé, la performance du test, obtenu en comparant le rapport de vraisemblance avec lui, est déterminé :

$$P_F(\eta_0) = P_r \{ \Lambda(r) > \eta_0 / H_0 \} \tag{1.18}$$

$$P_M(\eta_0) = P_r \{ \Lambda(r) < \eta_0 / H_1 \} = (1 - P_D(\eta_0)) \tag{1.19}$$

Le coût de Bayes est donc

$$C_m(\eta_0) = C_{11}P_1P_D(\eta_0) + C_{01}P_1P_M(\eta_0) + C_{00}P_0(1 - P_F(\eta_0)) + C_{10}P_0P_F(\eta_0) \tag{1.20}$$

Si on utilise dans cette équation les relations

$$P_D(\eta_0) + P_M(\eta_0) = 1 \tag{1.21}$$

Et

$$P_0 + P_1 = 1 \tag{1.22}$$

On obtient une expression qui dépend uniquement de  $P_1$

$$C_m(\eta_0) = C_{00}(1 - P_F(\eta_0)) + C_{10}P_F(\eta_0) + P_1[(C_{11} - C_{00}) + (C_{01} - C_{11})P_M(\eta_0) - (C_{10} - C_{00})P_F(\eta_0)] \tag{1.23}$$

De cette équation, on peut conclure que le coût de Bayes associé à ce test pour cette valeur fixe du seuil est une fonction linéaire de  $P_1$ .

Ce test est le test optimal si la relation suivante est vérifiée :

$$\eta_0 = \frac{P_0(C_{10} - C_{00})}{P_1(C_{01} - C_{11})} = \frac{(1 - P_1)(C_{10} - C_{00})}{P_1(C_{01} - C_{11})} \tag{1.24}$$

Les tests minimax correspondent à choisir le test optimal pour la situation où le coût est maximum, ce qui est obtenu en prenant le test qui a un coût constant pour toutes les valeurs possibles de la probabilité *a priori*. Pour obtenir ce test, on doit donc choisir un seuil qui conduit à des valeurs de  $P_M$ , et  $P_F$  tels que

$$C_{11} - C_{00} + (C_{01} - C_{11})P_M - (C_{10} - C_{00})P_F = 0 \quad (1.25)$$

## 1. 8 Modèles statistiques des cibles

La modélisation des cibles dépend du calcul du RCS de l'objet. Le moindre changement d'orientation de la cible et les vibrations qu'elle subisse provoque le phénomène des variations du RCS appelées fluctuations [13]. A cause des fluctuations des surfaces équivalentes des cibles observées, celles-ci sont réparties, conformément à la nature statistique des fluctuations de la cible. Généralement, la majorité des cibles radar sont fluctuantes car leurs dimensions sont plus importantes que la longueur d'onde. Cependant, seuls les cibles sphériques ou les coins de réflecteurs vus sous un angle constant sont non fluctuants. De plus, pour les cibles fluctuantes, le rapport signal sur bruit (SNR: Signal-to-Noise Ratio) est fonction du type de fluctuation. Swerling a observé et classifié les cibles selon les fluctuations en quatre modèles statistiques [13].

(i) **Le modèle de Swerling I (scan-to-scan independence):** Ce modèle caractérise une cible lentement fluctuante et dont l'amplitude de l'enveloppe,  $q$ , du signal réfléchi suit une loi de Rayleigh, telle que sa fonction densité de probabilité (fdp) est donnée par: [13]

$$f(q) = \frac{q}{\sigma_t^2} \exp\left(-\frac{q^2}{2\sigma_t^2}\right), q > 0 \quad b \quad (1.26)$$

Le paramètre,  $\sigma_t^2$ , représente la variance de la cible, laquelle est proportionnelle à son RCS.

(ii) **Le modèle de Swerling II (pulse-to-pulse independence) :** Ce modèle est défini par une cible rapidement fluctuante et dont l'amplitude de l'enveloppe,  $q$ , du signal réfléchi suit la loi donnée par (1.26). En pratique, les modèles de types Swerling I et II s'apparentent à des éléments réfléchissants indépendants dont aucun n'est prépondérant. De nombreuses cibles entrent dans cette catégorie, notamment les avions (Figure. 1. 7).

(iii) **Le modèle de Swerling III (scan-to-scan independance):** Ce modèle caractérise une cible lentement fluctuante dont l'amplitude de l'enveloppe,  $q$ , du signal réfléchi suit une loi Rayleigh modifiée (one dominante-plus Rayleigh), telle que sa fdp est d'écrite par: [12,13]

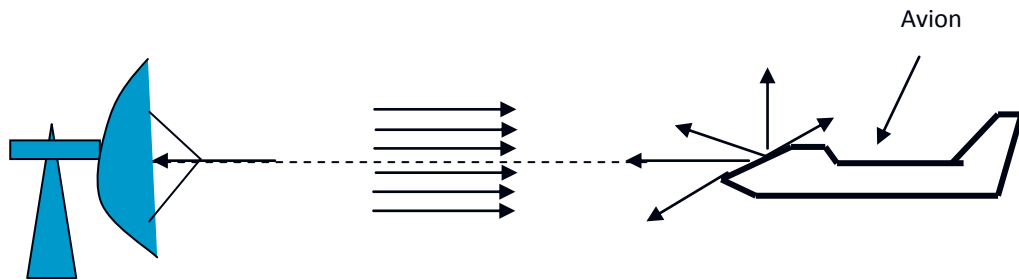


Figure. 1. 7 Conception du RCS (avions)

$$f(q) = \frac{9q^3}{2\sigma_t^4} \exp\left(-\frac{3q^2}{2\sigma_t^2}\right) \quad (1.27)$$

(iv) **Le modèle de Swerling IV (pulse-to-pulse independance)**: Ce modèle est défini par une cible rapidement fluctuante et dont l'amplitude du signal reçu,  $q$ , à la sortie du détecteur d'enveloppe suit une loi donnée par (1.27). En pratique, les modèles de types Swerling III et IV s'apparentent à un élément réfléchissant prépondérant mais non fluctuant, associé à de nombreux éléments moins importants et indépendants. Les missiles rentrent dans cette catégorie de cibles (Figure. 1. 8).

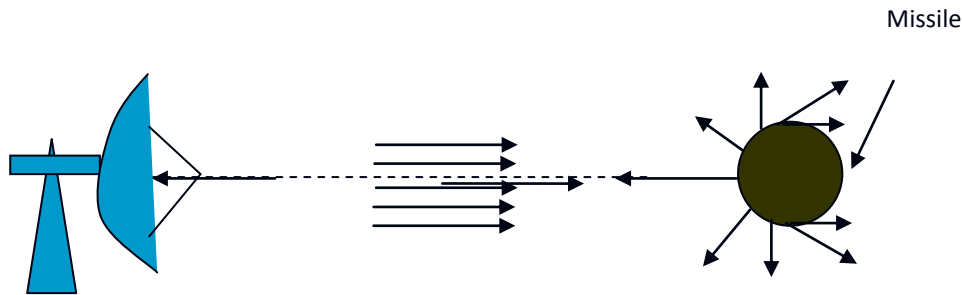


Figure. 1. 8 Conception du RCS (missiles)

## 1. 9 Modèles statistiques du clutter de mer

Un radar est généralement destiné à détecter des échos mobiles de petites dimensions se déplaçant à la surface du sol ou en altitude. Les échos sont peu nombreux mais très souvent noyés dans un contexte très puissant d'échos parasites appelé clutter. Le clutter est constitué soit d'échos atmosphériques soit d'échos situés à la surface de notre planète. La détection radar est rarement effectuée dans des environnements composés de bruit thermique



uniquement. Nous distinguons généralement deux types de clutter. Le clutter de surface (Terre, mer, ..., etc.) et le clutter de volume (précipitation, insectes, pluie, ..., etc.). La modélisation du clutter dépend de l'application radar en question. En effet, dans les radars à basse résolution, la largeur d'impulsion est supérieure à  $0.5\mu s$ . Si en plus la détection se fait à des angles d'incidence (grazing angles) supérieurs à  $3.9^\circ$ , le clutter de surface peut être modélisé par une distribution gaussienne de moyenne nulle et variance constante (clutter uniforme). En revanche, dans certains environnements, l'utilisation d'un radar à haute résolution s'avère indubitable (largeur d'impulsion inférieure à  $5\mu s$ ). Pour ce cas, les données expérimentales correspondant à ce type de clutter ont montré qu'elles suivent une distribution présentant une queue plus étalée (long tail ou heavy tail) que celle de la gaussienne. Conséquemment, pour détecter des cibles dans ce type de clutter avec un angle d'incidence inférieur à  $3.9^\circ$ , il est nécessaire de modéliser l'environnement par des distributions non-gaussiennes. Dans la littérature radar, quelques modèles peuvent représenter les statistiques du clutter de mer ou du sol tels que les fdp de Weibull, Log-normal, Gamma et K [17-21].

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.

Type de radar	Largeur d'impulsion (msec)	Terre ou mer	Bandes de fréquences	Angle d'incidence (degrés)	Modélisation du clutter
Basse Resolution	2	Montagnes rocheuses	S (2-4GHz)	$\geq 5$ $< 5$	Gaussien Weibull
Basse resolution	3	Collines boisées	L (1-2GHz)	0.5	Log-normal et Weibull
Haute resolution	0.17	Forêt	X (8-12GHz)	0.7	Log-normal et Weibull
Haute resolution	0.17	Terre cultivée	X	0.7-5	Log-normal et Weibull
Haute resolution	0.2	Mer : état 1	X	4.7	Log-normal, Weibull et K
Haute resolution	0.1	Mer : état 2	$K_u$ (12-18GHz)	1.1-30.0	Log-normal, Weibull et K

**Tableau 1. 3** Résumé de quelques cas de clutter non-Gaussien.

(i) **Le modèle Weibull** : La loi de Weibull est donnée par [18]:

$$p(x) = \frac{c}{b} \left( \frac{x}{b} \right)^{c-1} \exp \left( - \left( \frac{x}{b} \right)^c \right), \quad x > 0 \quad (1.28)$$

où  $b$  et  $c$  représentent les paramètres d'échelle et de forme respectivement et  $\Gamma(.)$  est la fonction gamma.

Le moment d'ordre  $n$  caractérisant la puissance du clutter est donné par

$$E[x^n] = b^n \cdot \Gamma\left(1 + \frac{n}{c}\right) \quad (1.29)$$

pour  $c=1$  et  $c=2$ , la distribution Weibull est identique aux distributions Exponentielle et Rayleigh respectivement.

(ii) **Le modèle Log-Normal** : La distribution Log-normal est donnée comme suit [17]:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.30)$$

où  $\mu$  est la moyenne de  $\ln(x)$  et  $\sigma^2$  est la variance de  $\ln(x)$ .

Le moment d'ordre  $n$  caractérisant la puissance du clutter est donné par

$$E[x^n] = \exp\left(n\mu + \frac{n^2}{2}\sigma^2\right) \quad (1.31)$$

(iv) **Le modèle K**: Le clutter de mer est bien modélisé par la distribution K. En effet, l'amplitude du clutter suit la distribution Rayleigh appelée speckle dont la variance de celle-ci suit la loi de Gamma. L'amplitude du clutter,  $x$ , est équivalente au produit des deux variables aléatoires suivantes [21-23]:

$$x = ys \quad (1.32)$$

où les deux composantes,  $s$  et  $y$ , représentent respectivement le speckle et le niveau moyen de la puissance du clutter appelé texture.

D'où, la fdp de l'amplitude du clutter peut être déterminé par

$$p(x) = \int_0^{\infty} p(y)p(x/y)dy \quad (1.33)$$

Pour un clutter de distribution K, nous avons

$$\begin{cases} p(x/y) = \frac{\pi x}{2y^2} \exp\left(-\frac{\pi x^2}{4y^2}\right), & x \geq 0 \\ p(y) = \frac{2b^{2\nu} y^{2\nu-1}}{\Gamma(\nu)} \exp(-b^2 y^2), & y \geq 0 \end{cases} \quad (1.34)$$

A partir de (1.34), la distribution K peut être calculée comme

$$p(x) = \frac{4a}{\Gamma(\nu)} (ax)^\nu K_{\nu-1}(2ax), x > 0 \quad (1.35)$$

Où,  $K_\nu(\cdot)$ , est la fonction de Bessel modifiée de deuxième espèce,  $a = b\sqrt{\pi/4}$  est le paramètre d'échelle et  $\nu$  est le paramètre de forme.

Les moments d'ordre  $n$  sont donnés par

$$E(x^n) = \frac{1}{a^n} \frac{\Gamma(\nu + \frac{n}{2})}{\Gamma(\nu)} \Gamma(\frac{n}{2} + 1) \quad (1.36)$$

En général, La valeur de  $\nu$  se situe entre 0 et 1 pour un clutter pointu et l'infini pour un clutter de distribution Rayleigh.

Le clutter peut être considéré comme homogène et non-homogène. La non homogénéité est causée essentiellement par l'effet de bord de clutter et/ou par la présence des cibles interférentes [2].

**(v) La distribution K avec bruit est donnée par Watts [21].**

Par ailleurs, il existe d'autres distributions qui peuvent aussi modéliser le clutter de mer telles que la distribution K avec bruit [26, 27] telles que

$$\begin{cases} p(x/y) = \frac{1}{2\sigma^2 + 4y^2/\pi} \exp\left(-\frac{\pi x}{2\sigma^2 + 4y^2}\right) \\ p(y) = \frac{2b^{2\nu} y^{2\nu-1}}{\Gamma(\nu)} \exp(-b^2 y^2) \end{cases} \quad (1.37)$$

La distribution Pareto généralisée [6, 7] et la distribution Pareto [8, 12] seront présentées dans les chapitres 2 et 3 respectivement.

## 1. 10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement d'un radar à impulsions ainsi que les différentes opérations de traitement du signal radar et les différentes composantes d'un radar. Ce type de radar est basé sur la détection d'échos obtenus par réflexion d'impulsions brèves et puissantes. A la réception, le signal superhétérodyne est traité de telle manière à ce que toute cible possédant une vitesse radiale non nulle exhibe un décalage de fréquence Doppler proportionnel à la vitesse de la cible par rapport au radar. Enfin, nous avons présenté les modèles statistiques des cibles selon les quatre types de Swerling en tenant compte aussi la présentation des distributions les plus répandues pour la modélisation du clutter de mer ou du sol. Dans le chapitre suivant, on va effectuer une étude comparative des différents estimateurs du paramètre de forme de la distribution Pareto généralisé.