

Chapitre III

Techniques de décision et de détection

I- Modèles statistiques de 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. A cause des fluctuations des surfaces équivalentes des cibles observées, celle-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 est fonction du type de fluctuation.

• Cible lentement fluctuante :

L'écho de cible ne change pas pendant l'émission des impulsions. (Par conséquent, les échantillons reçus sont les mêmes pour toutes les impulsions, il s'agit d'une seule réalisation d'une même variable aléatoire.

• Cible rapidement fluctuante :

L'écho change de valeur d'une impulsion à l'autre. Donc les échantillons reçus sont des réalisations différentes de la même variable aléatoire. Généralement, les modèles de *Swerling* sont les modèles les plus utilisés pour représenter les fluctuations des cibles.

Swerling a observé et classifié les cibles selon les fluctuations en cinq modèles statistiques appelés *Swerling 0* ou *V* (modèle non-fluctuant), *Swerling I, II, III* et *IV* (modèles fluctuants).

- **Cible du type I de Swerling** (*Swerling case I target*)

Ce modèle est défini par une cible lentement fluctuante et dont l'enveloppe du signal réfléchi suit une loi de Rayleigh dont la fonction densité de probabilité est donnée par :

$$f(q) = \frac{q}{\sigma_t^2} \exp\left(-\frac{q^2}{2\sigma_t^2}\right), \quad q > 0 \quad (3.1)$$

σ_t^2 représente la variance de la cible.

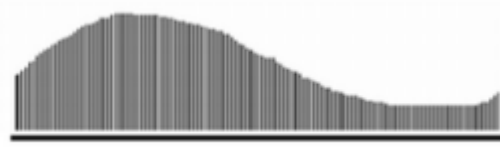


Figure III.1- Modèle de fluctuation Swerling I

- **Cible du type II de Swerling** (*Swerling case II target*)

Ce modèle est défini par une cible rapidement fluctuante et dont l'enveloppe du signal réfléchi suit la loi donnée par l'équation (3.1).

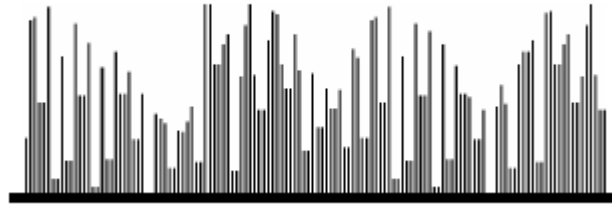


Figure III.2- Modèle de fluctuation Swerling II.

- **Cible du type III de Swerling** (*Swerling case III target*)

Ce modèle est défini par une cible lentement fluctuante et dont l'enveloppe du signal réfléchi suit une loi Rayleigh modifiée dont la fonction densité de probabilité est donnée par :

$$f(q) = \frac{9q^3}{2\sigma_t^4} \exp\left(-\frac{3q^2}{2\sigma_t^2}\right), \quad q > 0 \quad (3.2)$$



Figure III.3- Modèle de fluctuation Swerling III.

- **Cible du type IV de Swerling (Swerling case IV target)**

Ce modèle est défini par une cible rapidement fluctuante et dont l'enveloppe du signal réfléchi suit la loi donnée par l'équation (3.2).

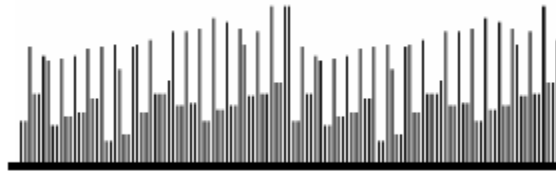


Figure III.4- Modèle de fluctuation Swerling IV.

II- Théorie de la décision

Considérons quelques hypothèses, un critère est choisi alors, sur lequel une décision doit être prise. Par exemple, lorsqu'il y a un problème de détection du signal radar, on observe le signal réfléchi (retourné) et une décision sera prise si une cible est présente ou absente. Dans un système de communication numérique, une chaîne des zéros et des uns peut être transmise dans un certain milieu. Au niveau du récepteur, les signaux utiles reçus représentant des zéros et des uns sont corrompus dans le milieu par un certain bruit additif, à savoir le bruit du récepteur lui-même, le clutter, et les cibles interférentes. Le récepteur ne connaît pas quel signal représente un «0» et quel signal représente un «1», mais il doit prendre une décision pour savoir si les signaux reçus représentent des zéros ou des uns. Le processus du récepteur va alors choisir une règle de décision inspirée de la théorie de la détection du signal. L'objectif est de trouver un algorithme de traitement de processus aléatoire observé à la sortie d'une cellule distance afin de décider la présence ou l'absence de la cible. Ce problème peut se formuler en termes de théorie de tests d'hypothèses statistiques. En effet, il ne pourrait y avoir que deux hypothèses à formuler. L'hypothèse nulle H_0 représente un « 0 » (cible absente) tandis que l'hypothèse alternative H_1 représente un « 1 » (cible présente). Nous ne pourrions donc prendre que l'une ou l'autre des deux décisions possibles qui s'excluent mutuellement. Dans ce contexte, une cellule dans l'espace de surveillance peut être considérée comme étant une source qui délivre deux types de signaux, sous l'hypothèse H_1 , le signal $S_1(t)$ qui contient le signal utile de la cible $s(t)$ et le bruit additif $n(t)$, et sous l'hypothèse H_0 , le signal $S_0(t)$ qui ne contient que le bruit additif $n(t)$, comme illustré dans la Fig. III.5.

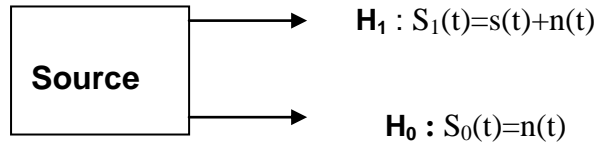


Figure III.5- Sources des deux hypothèses binaires.

Chaque hypothèse correspond à une ou plusieurs observations qui sont représentées par des variables aléatoires. En se basant sur les valeurs d'observation de ces variables aléatoires, le récepteur décide quelle hypothèse est vraie (H_0 ou bien H_1). Supposons que le récepteur doit prendre une décision basée sur une observation simple du signal reçu. La série des valeurs, que la variable aléatoire, Y , doit prendre, constitue l'espace d'observation Z . L'espace d'observation est divisé en deux régions (sous-espaces) Z_0 et Z_1 , d'où si Y se situe dans le sous-espace Z_0 , le récepteur décide alors l'hypothèse H_0 (c.à.d, prend la décision D_0); tandis que si Y se situe dans le sous-espace Z_1 , le récepteur décide l'hypothèse H_1 (c.à.d, prend la décision D_1); comme montré sur la Figure III.6.

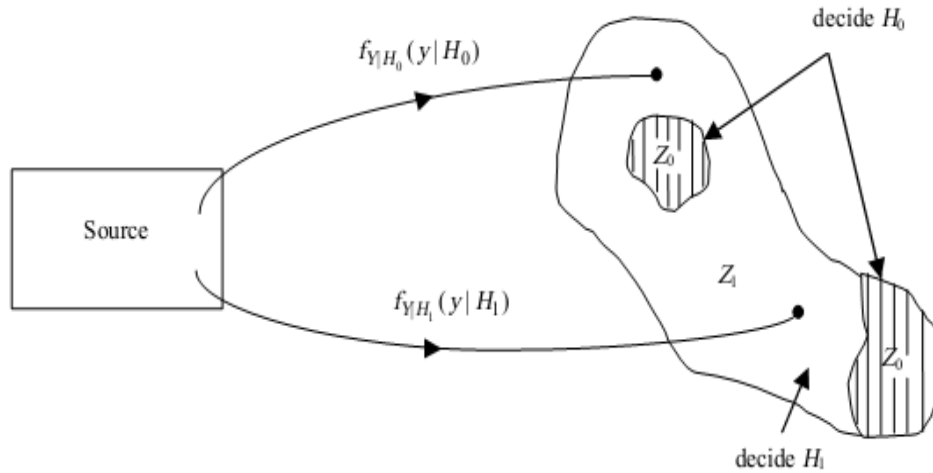


Figure III.6- Régions de décision.

L'espace d'observation Z est donc l'union des deux sous-espaces Z_0 et Z_1 c'est à dire :

$$Z = Z_0 \cup Z_1 \quad (3.3)$$

Les fonctions de densité de probabilité de Y correspondantes à chaque hypothèse sont $P_{Y/H_0}(Y/H_0)$ et $p_{Y/H_1}(Y/H_1)$, où y est une valeur particulière de la variable aléatoire « Y ».

Tout cela peut être formulé en termes de tests d'hypothèses statistiques qu'on appellera hypothèse nulle H_0 où la cible est déclarée absente, c'est-à-dire que le signal reçu ne dépasse pas le seuil, et l'hypothèse alternative H_1 où la cible est déclarée présente.

Quatre cas de décision sont possibles :

- H_0 est vraie et H_0 est décidée.
- H_0 est vraie et H_1 est décidée.
- H_1 est vraie et H_1 est décidée.
- H_1 est vraie et H_0 est décidée.

On remarque que le premier et le troisième cas représentent une bonne décision alors que les deux autres représentent une décision erronée. On définit la probabilité de détection, P_d , la probabilité de fausse alarme, P_{fa} et la probabilité de décider H_0 alors que H_1 est vraie P_m comme suit:

$$P_d = P_r(\text{décider } H_1 / H_1) \quad (3.4)$$

$$P_{fa} = P_r(\text{décider } H_1 / H_0) \quad (3.5)$$

$$P_m = P_r(\text{décider } H_0 / H_1) \quad (3.6)$$

Supposons que la décision est prise sur une observation du signal reçu x . l'ensemble des valeurs que prend la variable aléatoire constitue l'espace d'observation Z , comme il est montré sur la figure III.7, où Z_0 correspond à l'hypothèse H_0 et Z_1 à l'hypothèse H_1 .

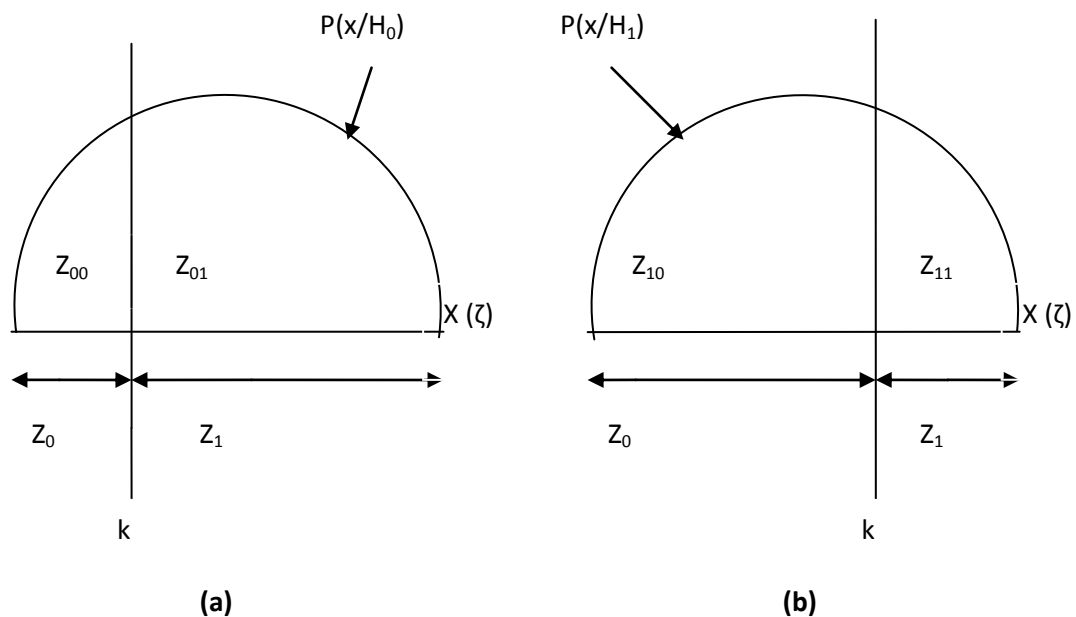


Figure III.7- Différents cas de décision lors d'une observation.

Parmi les différents critères de décision qui existent on cite :

II-1 Critère de Bayes :

Le critère de Bayes est basé sur la connaissance des probabilités à priori P_0 et P_1 des deux hypothèses H_0 et H_1 :

$$P_0 = P(H_0) \quad (3.7)$$

$$P_1 = P(H_1) \quad (3.8)$$

A chaque décision possible du système, on associe un coût C_{ij} équivalent à une pénalisation ou une récompense :

C_{ij} est le coût de décider H_i quand H_j est vraie. On obtient alors quatre cas possibles C_{00} , C_{11} , C_{01} , C_{10} . Le critère de Bayes consiste à déterminer la règle de décision qui minimise la valeur moyenne du coût définie par:

$$C_m = C_{00}P_r\{H_0, H_0\} + C_{10}P_r\{H_1, H_0\} + C_{01}P_r\{H_0, H_1\} + C_{11}P_r\{H_1, H_1\} \quad (3.9)$$

$$P_r\{H_i, H_j\} = P_r\{H_i, H_j\}P_j = P_r\{r \in R_i\}P_j = P_j \int_{R_i} p(r/H_j)dr \quad (3.10)$$

Dans le cas de tests binaires, on peut écrire :

$$\int_{R_i} p(r)dr = 1 - \int_{R_j} p(r)dr, \quad j \neq i, i, j = 0, 1 \quad (3.11)$$

$$C_m = C_{11}P_1 + C_{10}P_0 + \int_{R_0} [P_1(C_{01} - C_{11})P(r/H_1) - P_0(C_{10} - C_{00})P(r/H_0)]dr \quad (3.12)$$

Pour minimiser le coût C_m , il faut minimiser l'intégrale en choisissant la région de décision R_0 de façon que la valeur à intégrer soit négative en tout point de R_0 . Ce qui nous amène à la règle de décision suivante

$$\Omega(r) = \frac{P_r/H_1}{P_r/H_0} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \frac{P(H_0)(C_{10} - C_{00})}{P(H_1)(C_{01} - C_{11})} \quad (3.13)$$

$$\eta = \frac{P(H_0)(C_{10} - C_{00})}{P(H_1)(C_{01} - C_{11})} \quad (3.14)$$

η est appelé seuil de décision.

Le critère de Bayes revient alors à comparer le rapport de vraisemblance $\Omega(r)$ avec le seuil de décision η .

II-2 Critère de Neyman-Pearson :

Dans beaucoup de cas pratiques, les probabilités à priori P_i ne sont pas connues. Il est donc impossible d'utiliser l'approche bayésienne. Pour cela, on considère le critère de Neyman-Person qui consiste à minimiser la probabilité P_m (maximiser P_d) sachant que la probabilité de fausse alarme est fixée à une valeur déterminée ($P_{fa} = \alpha_0$). On utilise alors la fonction objective $J(\eta)$ donnée par :

$$J(\eta) = P_m + \eta(P_{fa} - \alpha_0) \quad (3.15)$$

η est déterminé de façon à vérifier la contrainte :

$$P_{fa} = \int_{\eta}^{\infty} p(\Lambda / H_0) d\Lambda = \alpha_0 \quad (3.16)$$

$$J = \int_R p(r / H_1) dr + \eta \left(\int_{R_1} p(r / H_0) dr - \alpha_0 \right) \quad (3.17)$$

Donc la règle de décision est la comparaison entre le rapport de vraisemblance et le seuil η , 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.

III- Types de bruits

III.1 Sources de Bruits

Le bruit est une énergie électromagnétique indésirable avec des paramètres aléatoires et gênants. Il peut modifier ou même détériorer la nature d'un signal portant une information ce qui interfère la capacité du radar à fonctionner dans un mode idéal et sans erreurs.

Les sources du bruit sont classées en deux catégories :

III.1.1 Sources de bruit externes

Les causes des perturbations d'origines externes sont de deux types :

- Les perturbations artificielles sont principalement dues aux parasites générés par des équipements industriels tels que ligne à haute tension, brouillage intentionnel, ...etc.
- Les perturbations naturelles sont associées à des phénomènes atmosphériques ou cosmiques.

III.1.2 Sources de bruit internes

Ces causes peuvent être aussi classées en deux types :

- Les perturbations de type essentiellement impulsionnelles engendrées par des communications de courant.
- Le bruit de fond généré dans les câbles et les composants électroniques.

III.2 Différents types de bruit

Il existe de nombreuses sources de signaux indésirables que les radars doivent pouvoir ignorer plus ou moins, afin de se focaliser uniquement sur les cibles d'intérêt. Ces signaux peuvent avoir des origines passives et actives, internes (bruit thermique) et externe (cibles interférentes et fouillis [clutter]). En général, la puissance du clutter est beaucoup plus élevée que celle du bruit thermique.

III.2.1 Bruits intérieurs (Bruit thermique)

Le bruit thermique est une source interne de variations aléatoires du signal, que tous les composants électroniques génèrent de façon inhérente à différents degrés. Il apparaît typiquement comme constitué de variations aléatoires superposées au signal d'écho reçu par le radar. Plus la puissance du signal désiré est faible, plus il est difficile de le discerner du bruit thermique (tenter d'entendre un murmure près d'une route encombrée est similaire). Ainsi, les sources du bruit thermique les plus importunes apparaissent au niveau du récepteur et beaucoup d'efforts sont faits pour minimiser ces facteurs. Le facteur de bruit est une mesure du bruit produite par un récepteur comparée à celle produite par un récepteur idéal. Ce ratio doit être minimal. Dans le cas des radars modernes, grâce aux hautes performances de leurs récepteurs, le bruit interne est inférieur ou égal au bruit de l'environnement extérieur.

III.2.2 Bruits extérieurs

1) Le clutter (Fouillis)

Nous précisons tout d'abord la signification du terme clutter. On appelle clutter le bruit provoqué par l'énergie renvoyée par des obstacles naturels (terre, mer, atmosphère) qui rend la détection de la cible utile très difficile. Le clutter est constitué soit d'échos atmosphériques soit d'échos situés à la surface de notre planète. Il s'avère particulièrement indispensable de connaître la distribution du clutter pour établir le seuil de détection. Cette distribution dépend de la nature du clutter ainsi que la résolution du RADAR.

Le clutter a pour effet de masquer les cibles, qui passent à travers des régions occupées par les échos clutter, et de générer des fausses alarmes qui peuvent diriger l'attention des cibles réelles et produire de fausses pistes pour la poursuite. Pour réduire ces effets, les radars comptent sur la réduction de la taille de la cellule de résolution spatiale pour minimiser le Clutter d'entrée, et l'application des techniques CFAR dans la circuiterie de la détection.

Dans pas mal de cas le choix propre de la fréquence de polarisation peut minimiser le clutter d'entrée au radar.

Nous distinguons généralement deux grandes familles de clutter : le clutter de surface et le clutter de volume. Le clutter de surface est celui qui provient des échos de la mer et de la terre alors que le clutter de volume est dû aux phénomènes atmosphériques.

a) Clutter de surface

- Clutter de mer

Ce type de clutter correspond à l'écho de la surface de la mer, l'évolution dynamique de la mer peut être caractérisée par deux paramètres : son état et la direction des vagues. L'état de la mer prend en compte l'amplitude et la distance entre les vagues. Ce clutter perd son aspect homogène et alors sa distribution d'amplitude présente des pics importants sur les crêtes de vagues quand la mer est agitée. Le clutter sera plus grand, ce qui entraîne de fausses alarmes et rend la détection difficile.

La mer sera également une source de clutter. Si la surface de l'eau est parfaitement calme, elle constitue un excellent miroir et les échos seront très faibles : il n'y aura pratiquement pas de clutter.

- Clutter de terre

Indépendamment de leur nature, les réflecteurs répartis sur la terre renvoient au radar des signaux dont la puissance dépend de leur distance.

Le clutter de terre est fort dépendant de la nature du terrain et des conditions locales. Les régions urbaines, les champs cultivés, les forêts, les montagnes et le désert peuvent produire différents échos radar. En outre, les dispersions radar de terre sont affectées par la pluie, la neige, les végétations, et la présence de lacs dans les terrains.

Pour évaluer les performances des radars, la modélisation du bruit est nécessaire. Le plus souvent, un modèle correspondant à un fouillis homogène est admis, du fait qu'il est représentatif de ce qu'un radar peut rencontrer et permet de calculer la probabilité de détection dans les cas habituels. Cependant, il existe des cas où ce modèle n'est pas suffisant et donc doit être complété par superposition d'une distribution d'échos ponctuels.

Il est caractérisé par un coefficient de rétro diffusion qui dépend évidemment de la nature de la terre et la longueur d'onde.

b) Clutter de volume

Il est représenté par le clutter atmosphérique :

- Clutter météorologique

Il s'agit des échos parasites renvoyés par les nuages ou la pluie. Ils sont utilisés dans les radars météorologiques et éliminés dans les autres. Une forte pluie donnera un clutter plus important qu'une pluie fine. La longueur d'onde intervient également et quand la fréquence augmente, les échos de nuages et de pluie deviennent de plus en plus importants.

Il est pratiquement impossible d'éliminer totalement les échos des nuages proches (échos saturants).

Ce clutter est caractérisé par :

- Une répartition volumétrique plus ou moins uniforme.
- Une vitesse propre (celle du vent) suffisante pour qu'il se distingue du clutter de sol.

2) Cibles interférentes

Ce cas est défini pour décrire des situations où le milieu de clutter est composé par un bruit blanc Gaussien homogène plus des cibles interférentes. Ces cibles interférentes apparaissent comme des pics dans des cellules de portée et peuvent tomber dans l'une des deux fenêtres de références ou dans les deux en même temps.

Lorsque les cibles interférentes s'étendent sur les cellules de références, de la cible en question, qui est la cible primaire, le seuil est élevé et la détection de la cible primaire se dégrade sérieusement. Ceci est connu sous le nom de l'effet de capture. Avec un seuil trop grand, certaines cibles peuvent ne pas être détectées. D'un autre côté, si le seuil n'est pas assez élevé, le nombre de fausses alarmes dues aux pics de bruits augmentent.

III.2.3 Autres types de bruit

D'autres classifications du bruit sont présentées dans la figure III.8 où le bruit ambiant est dû à la nature de l'environnement, dont les principales sources sont le bruit atmosphérique, le bruit urbain ou industriel, et le bruit cosmique (bruit solaire).

- ❖ **Bruit solaire** : Généré par le soleil. Sa contribution aux fréquences radar est négligeable.
- ❖ **Bruit atmosphérique** : Généré par les perturbations atmosphériques (orage). Il est négligeable au-dessus de 50MHz.
- ❖ **Le bruit en 1/f** : Décroît avec la fréquence et apparaît non seulement dans les semi-conducteurs, mais aussi dans les résistances au carbone et souvent dans les circuits électroniques.

- ❖ **Les anges :** Ils sont d'origine très diverses comme les oiseaux et les insectes. Ces anges donnent l'impression d'échos assez grands se déplaçant parfois à vitesses assez élevées et sont dus à des réflexions anormales des rayons radars.
- ❖ **Le brouillage :** Le brouillage radar se réfère aux fréquences radios originaires de sources extérieures au radar, émettant à la fréquence du radar et masquant donc les cibles intéressantes. Le brouillage peut être intentionnel ou non voulu. Le brouillage est considéré comme une source d'interférences actives, puisqu'il est causé par des éléments extérieurs au radar et généralement sans lien avec les signaux du radar.

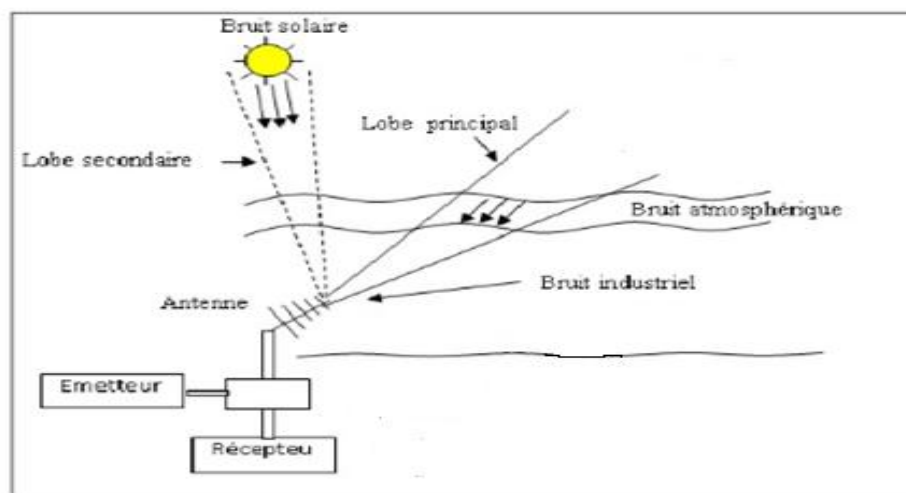


Figure III.7 : Bruits dans un système radar.

On représente sur la figure III.8 un exemple de visualisation du clutter sur l'écran d'un radar:

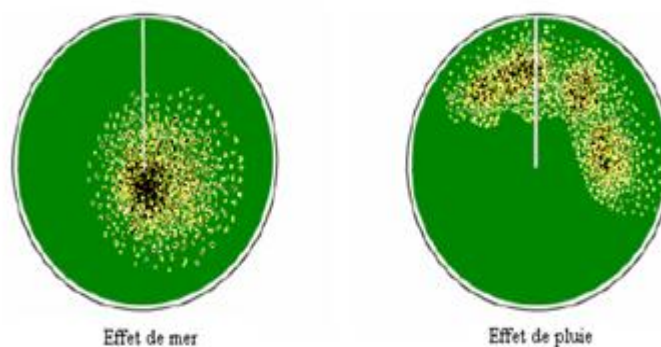


Figure III.8 : Exemple de visualisation du clutter sur écran radar.

IV- L'effet du clutter

Les clutters de surface et de volume sont tels que le rapport du signal sur clutter (Signal to Clutter Ratio, SCR) est très grand comparant au rapport signal sur bruit (Signal to Noise Ratio, SNR).

La présence des interférences induit, quant à elle, à un rapport signal sur interférences (Signal to interference Ratio, SIR) beaucoup plus grand que le SNR.

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

IV-1 Bord du clutter

Le Bord du clutter dans la détection radar, est une transition entre deux milieux de natures différentes telle que la transition d'un milieu terrestre vers un autre maritime, par exemple, ou d'une zone claire vers une autre nuageuse et inversement. Cette transition produit un changement brusque dans la puissance du clutter.

Elle pose deux types de problèmes dans la détection. Le premier se produit lorsque la cellule sous test (CST) baigne dans le bruit thermique alors qu'une partie des cellules de référence contient du clutter et du bruit thermique. Dans ce cas, le niveau du seuil de détection augmente, ce qui a pour effet de dégrader la détection. Ce phénomène est appelé effet de masque (masking effect) et il est illustré dans la figure III.9.

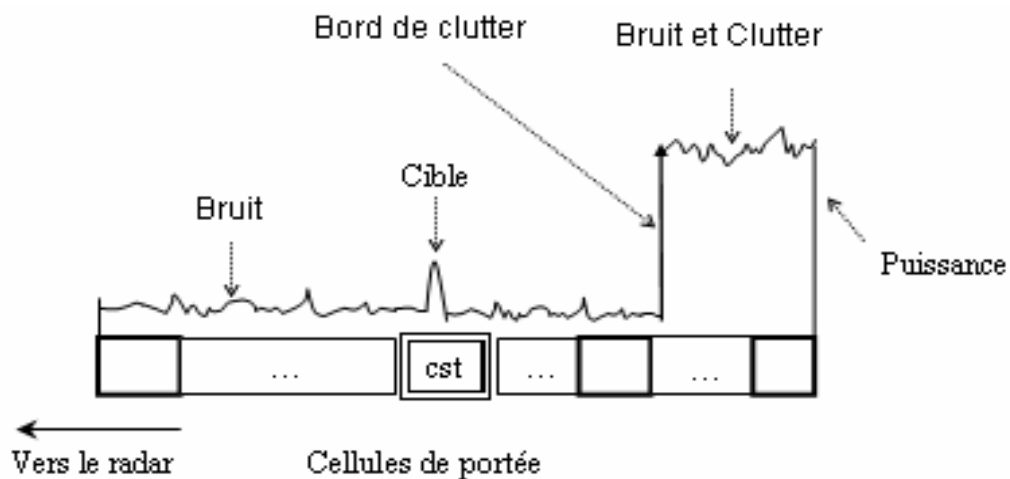


Figure III.9 : Cellule sous test dans le bruit thermique en présence d'un bord de clutter.

Le deuxième problème, quant à lui, se manifeste lorsque la cellule sous test baigne dans le bruit thermique et le clutter, alors qu'une partie des cellules de référence contient du bruit thermique uniquement. Dans ce cas, comme le montre la figure III.10, le seuil de détection diminue et le nombre de fausses alarmes devient important.

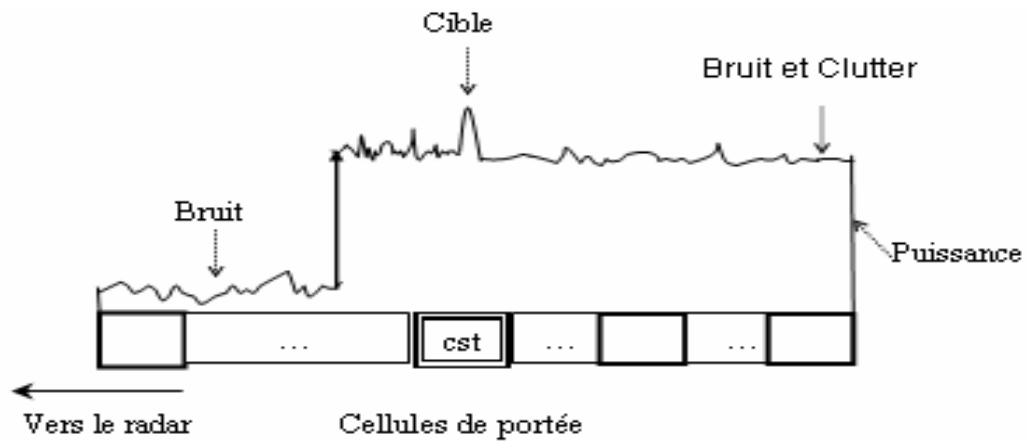


Figure III.10 : Cellule sous test dans le bruit thermique et le clutter.

Les cibles interférentes peuvent apparaître dans une ou plusieurs cellules de référence sous forme de pics. Dans ce cas, le seuil de détection augmente et par conséquent, la probabilité de détection diminue. Ce phénomène que nous avons illustré dans la figure III.11 est connu sous le nom de l'effet de capture (Capture effect).

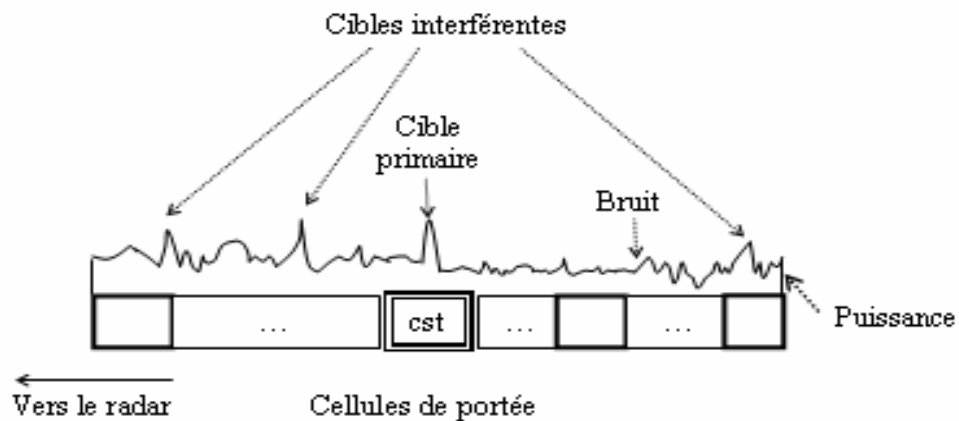


Figure III.11 : Cellule sous test dans le bruit thermique en présence des cibles interférentes.