

Étude des futurs systèmes de surveillance

Elaboré par

Khamassi Seif eddine

Chebbi Aymen

RAPPORT DU PROJET DE FIN D'ETUDE

Encadré par : Mr Halleb ridha

Université Virtuelle de Tunis (UVT)

Année Universitaire : 2010/2011



PROJET DE
FIN D'ETUDE

Sujet :

ETUDE THEORIQUE DES RADARS DE
CONTROLE AERIEN

Elabré par

**KHAMSI SEIF
CHEBI AYMEN**

Encadré par :

**KIDIA HALLER (Directeur Central des D'éveloppements à l'Office
de l'Aviation Civile et des Aéroports)**

Année Universitaire : 2010/2011

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos remerciements, notre profonde gratitude et reconnaissance à Monsieur Le directeur d'étude Chérif Adnen qui n'a jamais cessé de nous garantir les bonnes conditions d'étude durant toute l'année universitaire.

Nous tenons à remercier aussi notre responsables d'encadrement Mr Halleb ridha, qui n'a jamais cessé de nous' orienter et nous' encourager durant la période du projet.

Nos remerciements s'adressent aussi au :

- ✓ tous les membres du département des études universitaires.
- ✓ Tous les membres du centre de contrôle régional

Introduction	7
CHAPITRE 1	8
Introduction A la surveillance.....	8
1.1 Généralités sur la surveillance.....	9
1.1.1 Définition	9
1.1.2 Les besoins	9
1.1.3 Les cibles.....	9
1.1.4 Les informations cherchés reliés à l'avion	9
1.1.5 La classification de la surveillance.....	10
1.1.6 Selon la fonction.....	10
1.2 Normes et exigences.....	11
1.2.1 Définitions	11
1.2.2 BESOINS OPERATIONNELS.....	12
1.2.3 Données de surveillance radar requises.....	13
1.2.4 Disponibilité des données radar de surveillance requise	14
1.2.5 Installations d'enregistrement et de reproduction	15
2 CHAPITRE 2 RADAR PRIMAIRE	17
2.1 Radar primaire classique	18
2.1.1 Généralité :.....	18
2.1.2 Détection des cibles en radar primaire :	19
2.1.3 Diagramme azimut :	30
2.1.4 Volume exploré par un radar panoramique et diagramme de couverture radar :.....	34
2.1.5 Architecture du radar :	36
2.2 Radar solid state :.....	39
2.2.1 Présentation :	39
2.2.2 Concept élémentaire :.....	39
2.2.3 Configuration standard :.....	44
2.2.4 Génération de l'impulsion	52
2.2.5 Principe de la réception :.....	53
3 Chapitre 3 LE RADAR SECONDAIRE.....	55
3.1 Radar SSR classique:	56
3.1.1 LE FONCTIONNEMENT.....	56
3.1.2 L'INTERROGATION.....	57
3.1.3 LE TRANSPONDEUR	58

3.1.4	LE BILAN DE PUISSANCE	59
3.2	LES PHÉNOMÈNES PARASITES	62
3.2.1	LES PROBLÈMES	62
3.2.2	DES SOLUTIONS	67
3.3	LE RADAR SECONDAIRE MONO-IMPULSION	75
3.3.1	LE PRINCIPE DU MONOPULSE	75
3.3.2	LE SIGNAL REÇU EN MONOPULSE	77
3.3.3	L'ANTENNE MONOPULSE	78
3.4	Le radar secondaire Mode S :	81
3.4.1	Les limites du SSR	81
3.4.2	Les Objectifs du mode S	81
3.4.3	Les mécanismes d'interrogation du radar mode S	82
3.4.4	Les interrogations	85
3.4.5	Réponse Mode S :	87
3.4.6	Fréquence de répétition et durées :	88
3.4.7	Problèmes liés au verrouillage et solutions :	89
	Conclusion	93

LISTES DES FIGURES

Figure 1: Station Radar Sidi Zid.....	18
Figure 2:principe doppler	19
Figure 3:Forme de signal émis	20
Figure 4:réponse radar.....	22
Figure 5:phénomène du signal avec bruit.....	23
Figure 6:probabilité de la détection.....	23
Figure 7:seuil d'ébasage.....	25
Figure 8:positionnement de la cible	26
Figure 9:distance du plot	26
Figure 10:portée théorique max.....	27
Figure 11:réponses en seconde récurrence	28
Figure 12:résolution en distance.....	29
Figure 13: résolution angulaire.....	30
Figure 14 : schéma du diagramme radar	31
Figure 15: diagramme du lobe secondaire.....	31
Figure 16: explication du phénomène du lobe secondaire	32
Figure 17: loi d'illumination	33
Figure 18: volume a surveiller.....	34
Figure 19: diagramme de couverture correspondant	35
Figure 20: diagramme réelle.....	36
Figure 21: Antenne Radar.....	36
Figure 22: Architecture Radar	37
Figure 23: Forme d'un rafale	40
Figure 24: séquence CPIS	40
Figure 25: Formes d'onde courte et longue	41
Figure 26: forme de signal d'émission.....	44
Figure 27: Architecture radar solid stat	46
Figure 28: codeurs	48
Figure 29: récepteur Radar	50
Figure 30: Traitement Radar	52
Figure 31: schéma émetteur	53
Figure 32: architecture de récepteur	54
Figure 33:principe du radar secondaire	56
Figure 34:interrogations SSR.....	57
Figure 35:forme de la réponse.....	58
Figure 36:synoptique transpondeur	59
Figure 37:liaison montante.....	60

Figure 38:liaison descendante	61
Figure 39:lobes secondaires	62
Figure 40:principe du transpondeur.....	63
Figure 42:les réflecteurs	64
Figure 41:réponse en deuxième récurrence	64
Figure 43:Garbling	65
Figure 44:réponse garblées.....	66
Figure 45:principe de l'ISLS.....	67
Figure 46:Diagrammes Ω et Σ autour de l'axe antenne	68
Figure 47:réponses asynchrones.....	69
Figure 48:principe de wobulation.....	69
Figure 49:schéma de l'RSLs	70
Figure 50:principe de l'RSLs ajustable.....	71
Figure 51:comparaison des lois evt	72
Figure 52:Principe d'IISLS	74
Figure 53:Principe de la sectorisation	75
Figure 54:La technique d'écartométrie	75
Figure 55:schéma des lobes somme et delta.....	76
Figure 56:signaux reçus par la station radar.....	77
Figure 57:centre de phase.....	79
Figure 58:écartométrie si l'avion est à droite de l'axe.....	79
Figure 59:l'avion à gauche de l'axe.....	80
Figure 60:schéma de distribution d'antenne	80
Figure 61:structure de l'interrogation mode S	82
Figure 62:structure des signaux selon le type du radar secondaire	85
Figure 63:interrogation roll-call	86
Figure 64:structure de modulation de P6.....	87
Figure 65:structure de réponse mode s.....	88
Figure 66:exemple de perte de détection.....	89
Figure 67:la solution lockout override	90
Figure 68: La solution Cluster en mode S	91

Introduction

Pour faire face à l'évolution rapide du trafic aérien et la demande rapide et croissante de données, une vision futuriste n'est certes pas encore une réalité opérationnelle mais fait l'objet de nombreuses études. Quelques systèmes fonctionnant déjà et d'autres sont en projet ou en cours de mise en œuvre. Ces modules futurs sont ceux qui permettront au système d'évoluer vers un système complet et efficace.

Dans le but de développer ce sujet, on présentera dans le premier chapitre une introduction sur la surveillance en termes de normes, classification et l'évolution chronologique de ces systèmes

Dans le deuxième chapitre nous allons présenter le radar primaire son architecture ainsi que ces problèmes

Dans le troisième chapitre nous allons présenter le différent type de radar secondaire classique passant par le monopulse et le mode S

CHAPITRE 1

Introduction A la surveillance

1.1 Généralités sur la surveillance

1.1.1 Définition

La surveillance est une technique de détection instantanée des cibles et la détermination de leur position (si possible l'acquisition des informations supplémentaires reliés à ces cibles) et la livraison de ces informations dans le but d'un contrôle de trafic aérien sécurisé.

1.1.2 Les besoins

- La position des avions à un instant donné et leur intention.
- L'aptitude de contrôler les trajectoires des avions via les instructions données aux pilotes

1.1.3 Les cibles

- Les avions
- Les véhicules au sol

1.1.4 Les informations cherchés reliés à l'avion

- Mode A
- L'adresse Mode S
- Call sign
- Le numéro de vol
- Les paramètres de vol :
 - ✓ Le cap
 - ✓ La vitesse horizontale (au sol, en air)
 - ✓ La vitesse verticale

1.1.5 La classification de la surveillance

Selon le type d'exploitation

On distingue deux types d'exploitations fonctionnellement très différentes : la surveillance non coopérative et coopérative.

- **La surveillance indépendante** : la position est calculé par le récepteur au sol .elle est indépendante de celle calculé à bord, fournie par l'avion. On distingue :
- ✓ **La surveillance non coopérative** : elle est assurée sans intervention de la cible à sa détection. C'est la propriété de la réflexion d'une onde électromagnétique sur la surface physique de la cible qui est utilisée. La détection se fait par reconnaissance de la présence d'un signal réfléchi, la mesure de distance par mesure du temps de propagation radar – cible – radar. La mesure d'azimut par utilisation d'une antenne directive tournante. Les équipements correspondants sont caractérisés comme « **radars primaires** ».
- ✓ **La surveillance coopérative** : elle est assurée grâce à la participation active de la cible à sa détection. La cible est équipée d'un répondeur (ou transpondeur). Ce transpondeur reçoit des interrogations du radar et répond. Les mesures de distance et d'azimut utilisent les mêmes principes qu'en radar primaire. L'originalité de l'exploitation coopérative est que le signal reçu est renseigné en identification ou altitude en fonction de l'interrogation du radar. Les équipements correspondants sont caractérisés comme « **radars secondaires** ».
- **La surveillance dépendante** la cible informe la station au sol ou les cibles qui les entourent de sa position calculé à bord.

1.1.6 Selon la fonction

- Les systèmes au sol pour la surveillance aérienne (PSR, SSR)
- Les systèmes au sol pour la surveillance de surface des aéroports (A_SMGCS...)
- Les systèmes de surveillance embarqués (TCAS...)

1.2 Normes et exigences

Pour faire face à l'accroissement du trafic aérien, et satisfaire la contrainte primordiale de la sécurité de la navigation aérienne, des normes sont mises en œuvre à fin de garantir une homogénéité de performances techniques des systèmes de surveillance et garantir un niveau minimum de rendement requis

1.2.1 Définitions

Pour les besoins de la présente Norme Eurocontrol les définitions suivantes s'appliquent:

Double couverture SSR

Il y a double couverture SSR lorsque pour un point donné de l'espace, les données radar utilisées par un organisme ATS pour la fonction de surveillance proviennent d'au moins deux sources radar secondaire de surveillance (SSR) indépendantes, fonctionnant simultanément.

Espace aérien en route

L'espace aérien en route est le volume d'espace aérien situé en dehors des régions terminales, dans lequel se déroulent les phases de montée, de croisière et de descente des vols et où sont fournis différents types de services de la circulation aérienne.

Grande région terminale

Une grande région terminale est le volume d'espace aérien entourant un ou plusieurs aéroports importants. Son extension latérale varie en fonction de la disposition des aéroports situés à l'intérieur ou aux alentours de la région considérée. Ses dimensions verticales varient selon la manière dont l'espace aérien et les procédures de traitement des courants de trafic aérien sont organisés.

1.2.2 BESOINS OPERATIONNELS

Couverture requise

Généralités

- ✚ Une couverture radar continue et complète, de qualité et de fiabilité élevées, permettant d'assurer des séparations radar de 3NM, 5NM et 10 NM, doit être disponible en permanence.
- ✚ Les stations radar doivent être situées de telle manière que leur cône de silence soit inclus dans la couverture d'un radar adjacent, ou ne réduise pas l'efficacité opérationnelle du service radar.

Grandes régions terminales

- ✚ Les grandes régions terminales doivent disposer d'une couverture radar secondaire double et d'une couverture radar primaire simple. Cette combinaison garantit la disponibilité permanente d'informations de position radar et permet la fourniture de services de la circulation aérienne aux aéronefs incapables de répondre à des interrogations SSR.
- ✚ La couverture des grandes régions terminales doit commencer aux altitudes les plus basses des segments d'approche intermédiaire des principaux aérodromes concernés. Ailleurs, la couverture s'étendra des niveaux minimum auxquels les services radar doivent être fournis jusqu'à la limite supérieure de la région terminale.
- ✚ La continuité de la couverture radar doit être assurée dans les régions d'interface avec l'espace en route.

Espace aérien en route

- ✚ Dans l'espace aérien en route, la couverture SSR double doit s'étendre des niveaux minimum de croisière jusqu'aux niveaux maximum de croisière IFR ainsi que là où la fourniture de services radar est obligatoire.
- ✚ La couverture horizontale doit s'étendre sur 30 NM au moins au-delà de la région relevant du Centre de contrôle régional (CCR) correspondant, à moins que cela ne soit impossible pour des raisons géographiques.

Utilisation en commun de données radar

- ✚ Les données de surveillance radar provenant d'équipements radar existants ou nouveaux doivent être utilisées en commun partout où une telle solution s'avère possible et avantageuse, en particulier de part et d'autre des limites des régions
- ✚ Certains organismes ATS peuvent avoir accès à des systèmes de traitement de données plus performants que les organismes civils ou militaires auxiliaires voisins. Lorsqu'une telle situation se présente, il convient d'envisager des solutions pour transmettre les données traitées de l'organisme principal vers les organismes auxiliaires.

1.2.3 Données de surveillance radar requises

- ✚ Le système de surveillance radar doit fournir au moins les données suivantes pour présentation aux contrôleurs de la circulation aérienne :
 - historique du vol et position de l'aéronef dans le plan horizontal
 - *identification de l'aéronef*
 - *position de l'aéronef dans le plan vertical*
 - *indication spécifique des codes Mode A spéciaux (à savoir 7500, 7600, 7700)*
 - vitesse - sol
 - *statut de la piste (primaire, secondaire, combinée ou extrapolée).*
- ✚ Le délai d'actualisation des données affichées ne doit pas être supérieur à 5 secondes (s) pour les grandes régions terminales et à 8 secondes pour l'espace aérien en route. Un maximum de 2 actualisations successives par extrapolation est acceptable pour les données de position.
- ✚ L'infrastructure de surveillance radar doit permettre de satisfaire les besoins définis paragraphe 1.2. Ceci peut être assuré de différentes manières :
 - capteurs à haute performance
 - combinaison d'informations provenant de capteurs co-implantés (comptes rendus de cible associés SSR et PSR)
 - association d'informations provenant de capteurs situés à différents endroits indépendamment des fonctionnalités "région terminale" ou "espace aérien en route" par le traitement d'entrées radar multiples

- dispositif de poursuite multi-radar à haute performance.

1.2.4 Disponibilité des données radar de surveillance requise

Aux fins de la spécification des critères de disponibilité des données, on distingue les deux catégories de données suivantes :

Les données complètes

- l'historique et la position de l'aéronef dans le plan horizontal
- l'identification de l'aéronef
- la position de l'aéronef dans le plan vertical
- l'indication spécifique des codes Mode A spéciaux (à savoir 7500, 7600, 7700)
- la vitesse - sol
- le statut de la piste (primaire, secondaire, combinée ou extrapolée)

Les données indispensables

- l'historique et la position de l'aéronef dans le plan horizontal;
- l'identification de l'aéronef ou le code Mode A ;
- la position de l'aéronef dans le plan vertical

Les critères de disponibilité des données de surveillance radar

Les critères de disponibilité des données de surveillance radar sont les suivantes :

- la disponibilité des données complètes ne doit pas être inférieure à 0.995, à l'exclusion des périodes d'entretien programmée.
- la disponibilité des données indispensables ne doit pas être inférieure à 0.99999.
- la disponibilité des données PSR pour les grandes régions terminales ne doit pas être inférieure à 0.995.

La performance du système d'affichage

La performance du système d'affichage doit être telle qu'elle ne dégrade pas la qualité des données de surveillance au point d'avoir une incidence sur la fourniture d'un service radar.

Les défaillances significatives de la chaîne radar

Les défaillances significatives de la chaîne radar, susceptibles d'avoir une incidence sur la sécurité des vols et la fourniture des services de la circulation aérienne, doivent être notifiées aux postes de contrôle concernés.

Les campagnes d'entretien

Les campagnes d'entretien à date fixe qui affectent la fourniture des services de la circulation aérienne doivent être définis et coordonnées entre les personnels techniques et opérationnels des organismes ATS et le cas échéant, entre les organismes ATS adjacents.

L'infrastructure de surveillance

L'infrastructure de surveillance radar doit permettre de satisfaire les exigences de disponibilité spécifiées dans le tableau ci-dessus

Ceci peut être assuré de différentes manières :

- doublement des capteurs
- commutation automatique de passage à une station radar autonome (de secours)
- mise en place de stations radar supplémentaires
- installations de "secours"
- canaux radar à accès direct
- utilisation de données radar traitées provenant d'une autre source (un serveur central, par exemple).

L'architecture du système

L'architecture du système doit être telle que toute défaillance d'un élément de la chaîne radar ne réduise pas sérieusement la capacité du système ATC.

1.2.5 Installations d'enregistrement et de reproduction

✚ Les données transmises au système d'affichage doivent faire l'objet d'un enregistrement permanent. Les installations d'enregistrement et de reproduction sont nécessaires à l'appui

des enquêtes sur les incidents et les accidents, des activités de recherches et de sauvetage, de la réduction du bruit, de la formation, des analyses techniques et des statistiques.

- ✚ Il est recommandé que le support et le mécanisme d'enregistrement permettent une reconstitution complète, sur l'écran du contrôleur de la présentation des données de surveillance ainsi que des paramètres et sélections d'affichage.
- ✚ Des procédures administratives doivent être arrêtées pour les modalités de conservation et d'utilisation de ces enregistrements à des fins d'analyse.
- ✚ Il convient de conserver les enregistrements de données radar pendant 30 jours au moins.

CHAPITRE 2
RADAR PRIMAIRE

2.1 Radar primaire classique

2.1.1 Généralité :

Le radar primaire possède 2 propriétés fondamentales :

- Celle de détecter une cible,
- Celle de localiser cette cible.

Nous dirons simplement que le radar primaire permet de répondre aux questions suivantes :

- Existe-t-il une cible ?
- A quelle distance se situe-t-elle du radar et quel en est l'azimut ?
- Cette cible est-elle fixe ou mobile ?



Figure 1: Station Radar Sidi Zid

- La mesure de la distance : s'effectue a partir de la mesure du temps qui sépare l'émission d'un signal impulsionnel très bref d'un signal image réfléchi détecté en retour dans un récepteur.
- La localisation en gisement par rapport au nord magnétique conventionnel s'obtient grâce a l'utilisation d'un system d'aérien directif tournant.
- La nature de cible est déterminé grâce a l'utilisation du théorie doppler
- (Quand une onde se réfléchit sur une cible, la fréquence de l'écho se décale d'une valeur proportionnelle à la vitesse radiale de la cible par rapport à l'émetteur. La vitesse radiale correspond à la composante du vecteur vitesse parallèle à la direction de propagation de l'onde.

$$\Delta f_d = 2V_r / \lambda.$$

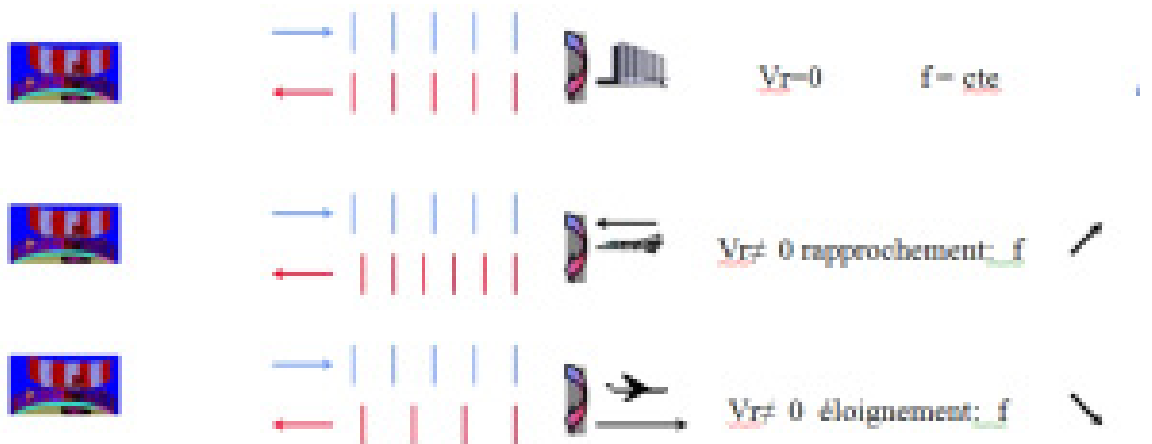


Figure 2: principe doppler

- L'exploitation de l'information reçue détecter peut être présentée en coordonnées polaires a partir d'une visualisation panoramique.

2.1.2 Détection des cibles en radar primaire :

2.1.2.1 Choix de la fréquence :

La détection d'une cible est réalisée a partir de l'émission d'un onde électromagnétique brève (signa impulsionnel) sur une fréquence telle que l'image puisse être

réfléchi et détecté dans des conditions favorables, ces conditions sont liées logiquement à la détection radar au comportement des cibles réelles en fonction de la fréquence.

Le choix de la fréquence est important et intervient dans l'équation générale du radar et sur de nombreuses caractéristiques des équipements.

Le choix de la fréquence est aussi, pour une fonction bien définie, le résultat de compromis techniques. Nous verrons par exemple pour les radars de veille de l'aviation civile que le choix de la longueur d'onde $\lambda = 23$ cm est un compromis dans lequel intervient notamment l'envergure et le gain de l'aérien, l'atténuation atmosphérique, la stabilité des générateurs liées aux performances des systèmes d'élimination des échos fixes ou enfin, la protection contre les échos de pluie.

Nous retrouverons pour les radars météorologiques, au contraire, un choix logique orienté vers une bonne détection d'échos atmosphériques (nuages et pluie).

2.1.2.2 *Forme du signal émis :*

La forme du signal émis sur une longueur d'onde λ choisie est, un simple signal impulsionnel composé d'impulsions brèves (au maximum quelques μs) de durée τ répétées à une fréquence de récurrence $FR = 1/TR$

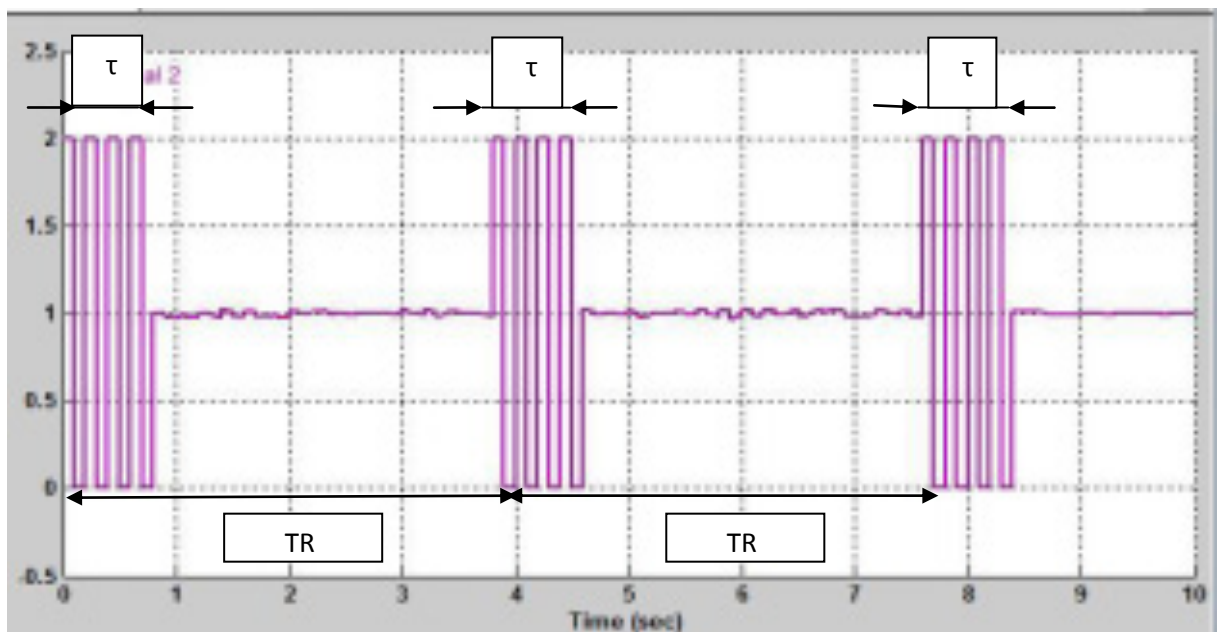


Figure 3: Forme de signal émis

2.1.2.3 *Nature de la cible :*

On appelle « cible » tout obstacle se présentant sur la trajectoire de l'onde électromagnétique, et donnant lieu à une onde réfléchie.

Ainsi dans le faisceau radar, une cible peut être le mobile de l'objet que l'on veut détecter (avion, bateaux, etc...) mais également tout autre chose qui donnera lieu à une onde réfléchie par exemple bâtiments et forêts

Nous voyons donc apparaître les notions de cibles utiles donnant lieu à des échos utiles et des cibles indésirables donnant lieu à des échos parasites.

Le problème consiste généralement à faire la discrimination entre les 2 types de réponse de façon :

- A visualiser les échos utiles
- A interdire l'exploitation des autres.

Le système de détection devra nécessairement dans ce cas, être associée à un système d'interdiction ou d'élimination des échos parasites naturels.

2.1.2.4 *Nature de la réponse :*

En réception au niveau de l'antenne, le signal réfléchi par la cible mobile se présente, du point de vue énergétique, comme une infime partie de ce qu'il était au moment de l'émission. Cette partie d'énergie est due à 2 facteurs essentiels :

- Atténuation atmosphériques lors de la propagation du signal
- Dispersion d'énergie au niveau de la cible au moment de la réflexion : une cible avion n'absorbe qu'en partie l'énergie qu'elle rayonne dans toutes les directions.

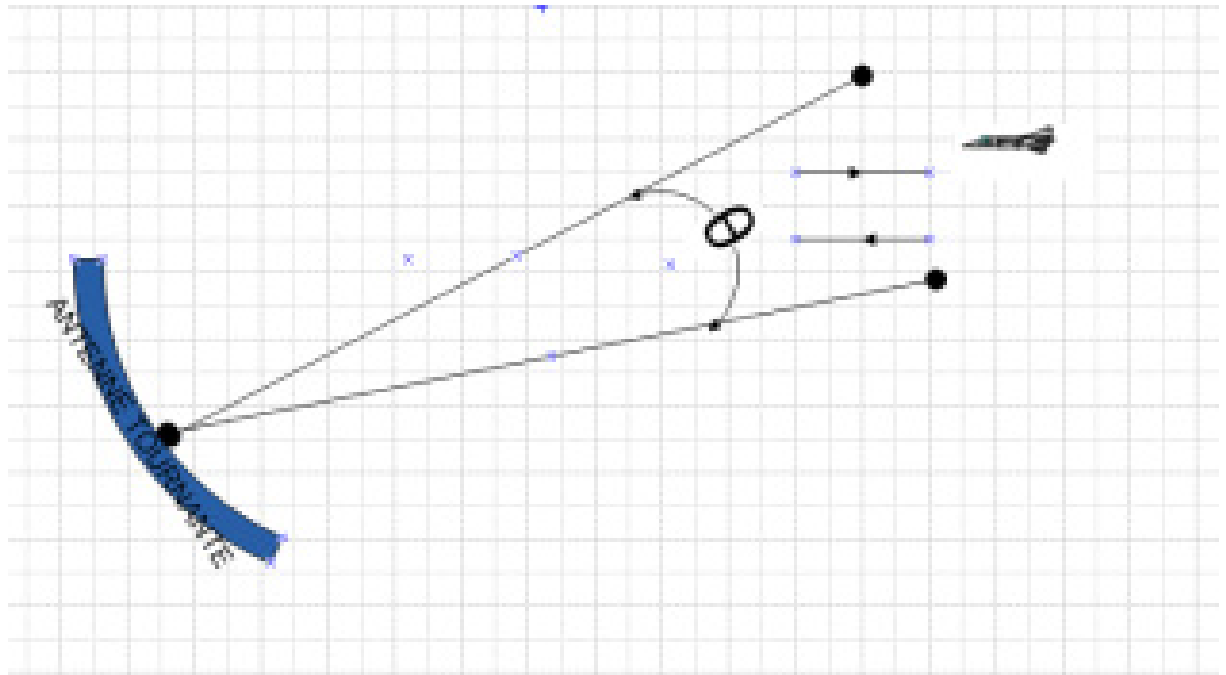


Figure 4:réponse radar

Si nous ajoutons que la cible est représentée de point de vue énergétique par une surface équivalente qui peut fluctuer considérablement d'un tour d'antenne au suivant en fonction de la présentation de l'aéronef dans le faisceau radar, nous comprenons que les faibles puissances d'échos réuseront de surcroît variables.

2.1.2.5 Réception du signal dans le bruit :

Le problème de réception d'un signal « écho radar », même très petit, ne serait toutefois pas difficile en soi ; il suffirait, en effet, de l'amplifier suffisamment et nous verrons à la fin de notre propos que nous savons réaliser des récepteurs à grande sensibilité, capable de recevoir et d'amplifier des puissance inférieures au pico watt (10^{-12} W).

Le drame est que le signal est toujours accompagné d'un phénomène gênant et aléatoire qui dénature l'information utile : le bruit. Le bruit de fond qui accompagne le signal peut être d'origines diverses. Le bruit préconisant est celui qui prend naissance dans le récepteur lui-même. Ce bruit propre qui limite la sensibilité du récepteur est d'origine thermique ; il est lié à l'agitation des électrons et on ne sait le réduire à zéro.

Les bruits extérieurs, entrant par l'antenne, bruits atmosphériques, cosmiques, ou parasites accidentels d'origine industrielle, ou de brouillages divers en Provence d'un autre

radar par exemple, sont généralement d'importance bien moindre ou supprimés. on ne peut dans tout les cas que très difficilement et dans la conditions particulières, en chiffrer les incidences en détection.

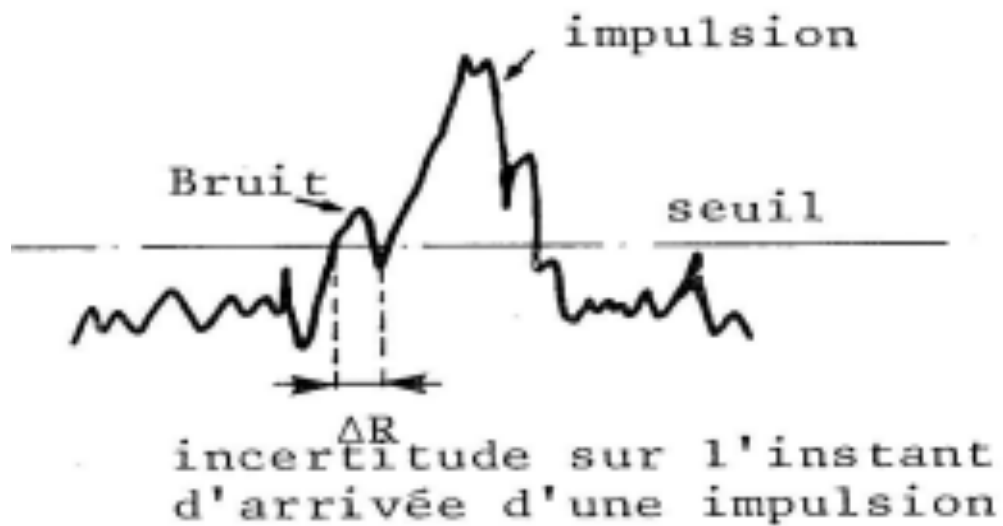


Figure 5:phénomène du signal avec bruit

2.1.2.6 Notions de probabilité de détection et de fausse alarme

Supposons le récepteur filtre réalisé et qu'un signal écho radar filtré existe en sortie a un certain endroit t_1 dans une distribution de probabilité représentant un bruit important.

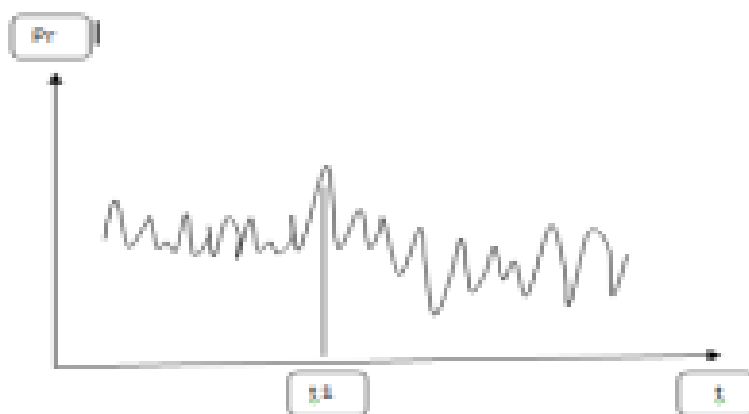


Figure 6:probabilité de la détection

Pour que cet écho soit visible, il faut que le signal détecté lui est la somme du signal utile que l'on aurait en l'absence de bruit et du bruit seul a l'instant considéré, soit supérieur a la puissance du bruit environnant.

Le signal minimum détectable représente en effet, par définition, la valeur de la puissance utile que l'on doit recevoir a l'entrée pour que la puissance utile disponible a la sortie du récepteur soit au moins égale a celle de bruit.

En fait, un écho dont la puissance est égale a la puissance moyenne du bruit en sortie, serait très difficilement perceptible au milieu de celui -ci. la probabilité de détection d'un tel signal serait pratiquement nulle.

D'autre part il se peut que des « pic » ou pointes ou pointes de bruit atteignent des niveaux de puissance se traduisant sur un indicateur par une tache analogue a un signal utile, écho d'une cible réelle ; on dit alors qu'il y a « fausse alarme »

- Seuil débasage :

Pour mieux concrétiser les notions de probabilité de détection et de fausse alarme, nous placerons, comme on a coutume de la faire, un seuil d'ebasage

Si nous fixons ce seuil en k_1 pour qu'en l'absence de signal utile le signal bruit parasite ait une probabilité très faible de le dépasser, nous obtiendrons certes un très bon taux de fausse alarme (pfa faible)

Mais comme nous l'avons dit, le signal détecté superposé au bruit fluctue et si nous supposons, par exemple, qu'il passe une fois sur 2 entre 2 niveaux extrêmes n_1 et n_2 , pour le seuil k_1 la probabilité de détection sera limité a 50%.

Par contre, un seuil ramené en k_2 nous donnerait une probabilité en 100% mais bien illusoire, le signal se trouverait « noyé dans de nombreuses pointe de bruit constituant autant de fausses alarmes.

En pratique, nous fixerons le seuil d'ébasage pour obtenir une probabilité de fausse alarme tolérable avec considération d'exploitation.

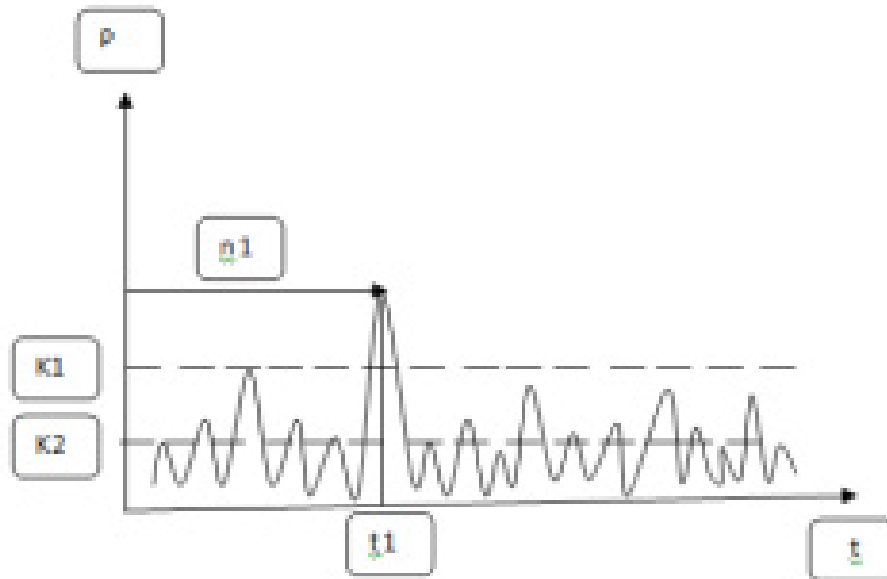


Figure 7: seuil d'ébasage

2.1.2.7 Localisations de la cible :

Pour une présentation panoramique classique, la localisation de la cible s'effectue logiquement grâce à la connaissance de ses coordonnées polaire. Pour cela, il s'agit :

- De mesurer la distance radar cible,
- De mesurer le gisement dans lequel se trouve la cible au moment de la détection de l'écho réponse.

Par convention, le gisement θ correspondant au calage azimutal de l'aérien s'évalue angulairement par rapport au nord géographique.

Le gisement θ est logiquement défini par rapport à l'axe du faisceau ou diagramme azimut. Est donc l'analyse de ce diagramme qui nous permettra à la suite de notre propos, de concrétiser et d'évaluer la présence de la mesure du gisement.

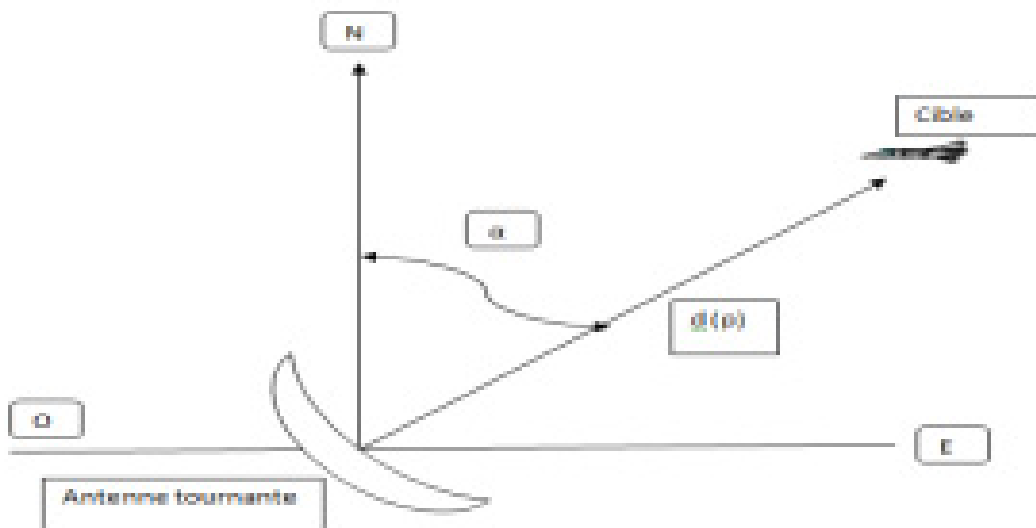


Figure 8: positionnement de la cible

2.1.2.8 *Mesure de la distance :*

La mesure de la distance se ramène en fait à la mesure d'un temps en effet, à chaque période de récurrence, ou interrogations l'on peut déterminer avec précision l'instant t_0 de l'émission de l'impulsion et l'instant t_1 de la réception du signal après réflexion sur la cible, on pourra connaître la distance d en mesurant le temps $t = t_1 - t_0$

Nous écrirons simplement en appelant c la vitesse de propagation de l'onde ($C = 300\,000$ Km/s) et en tenant compte du trajet aller et retour.

$$2d = ct \text{ ou } d = ct / 2$$

Le diagramme en fonction du temps étant alors le suivant :

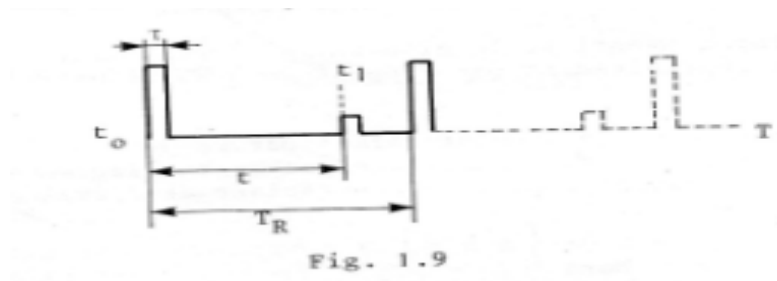


Figure 9: distance du plot

2.1.2.9 Portée théorique maximale utilisable :

Nous supposons que t était inférieur à TR , période de récurrence de l'émission. Il faut en effet que le signal écho radar puisse revenir à l'antenne avant l'émission d'une autre impulsion de référence pour la mesure de t .

La portée max utilisable sera donc limitée à :

$P_{th \max} = c \cdot TR / 2$ d'où le choix de la période de récurrence TR dépend donc la portée maximale théorique.

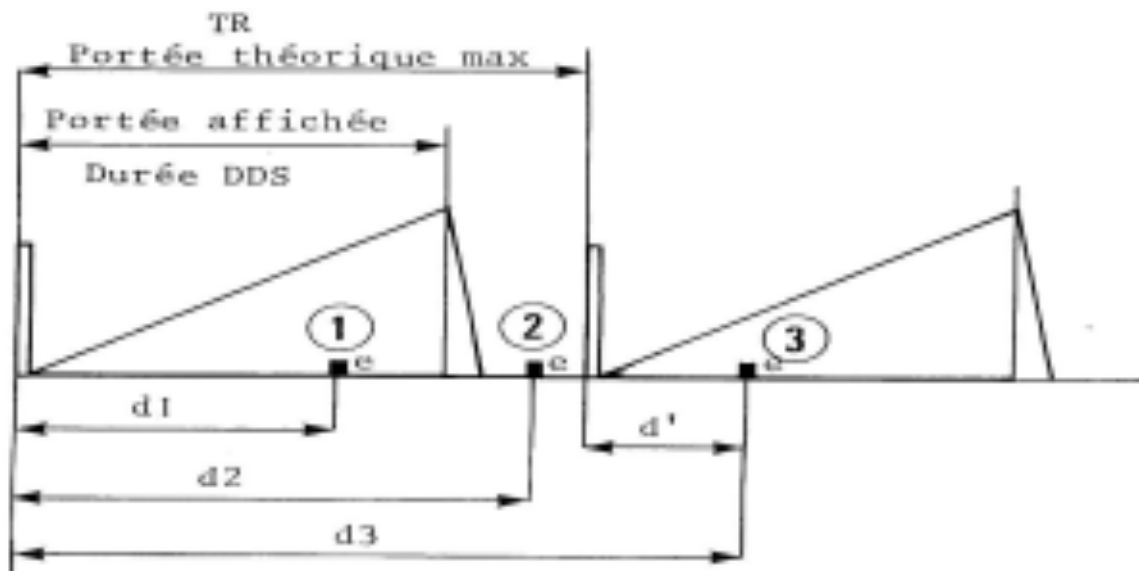


Figure 10: portée théorique max

2.1.2.10 Réponse en seconde récurrence :

Il n'est pas impossible de détecter des échos de cibles importantes situés à une distance supérieure à $c \cdot TR / 2$, la portée utile d'un radar est calculé en effet à partir d'une équation généralisée dans laquelle intervient, entre autre paramètres, la surface équivalente de la cible. Cette portée pourrait donc être pour certains cibles importantes supérieures à la portée théorique max. Nous pourrions également avoir des conditions de propagations ou de réflexions particulières.

Il est intéressant de connaître ce qu'il advient d'un écho situé en seconde récurrence, c'est à dire à une distance correspondant à un temps $t = TR + t'$

La distance erronée calculée d'correspondant à la distance affichée serait

$$d' = c.t'/2 = d - P_{th \max}$$

La puissance du signal reçu décroissant en fonction de la distance, les réponses en nième récurrence arrivent donc de fait de leur éloignement avec un niveau très faible .Le choix d'une longue période TR serait une solution si ce choix n'était pas par ailleurs lié à d'autres impératifs.

Il suffit généralement pour l'équipement , de disposer d'une commande de sensibilité ou de gain variable dans le temps (GVT) dans la chaîne d'amplification du récepteur , pour supprimer les réponses indésirables gênantes ou visibles essentiellement en début de portée sur l'indicateur panoramique . Nous verrons également que le traitement du signal préconise parfois un fonctionnement

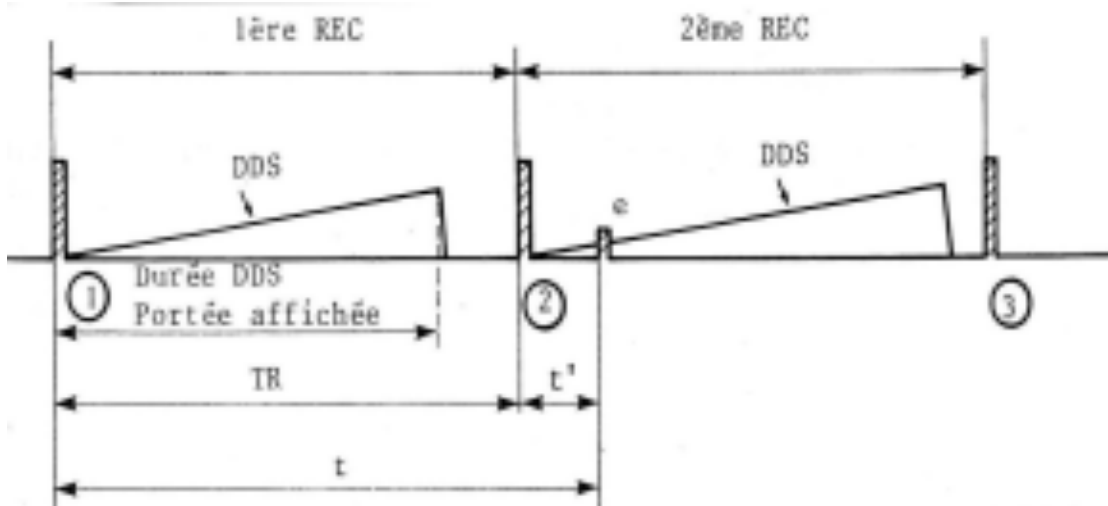


Figure 11:réponses en seconde récurrence

2.1.2.11 Pouvoir discriminateur en distance :

C'est la largeur de l'impulsion τ représentant la durée du signal émis qui définit l'écart minimum en distance pour que deux cibles puissent être visualisées séparément en radar.

De même que nous avons défini la portée théorique max, la résolution en distance définissant la portée minimale utilisable ou le pouvoir séparateur dans l'axe s'écrira :

$$S=c.\tau/2$$

Ainsi, pour une largeur d'impulsion $\tau=4 \mu\text{s}$ dans un même azimut leur avions qui se suit radialement ne serait différencié sur un indicateur que s'ils sont à plus de 600 m l'un de l'autre.

Une grande résolution en distance ne pourra donc être obtenue que pour des faibles valeurs de τ . Un radar de piste ou de contrôle des mouvements au sol nécessitera, par exemple, pour une résolution suffisante, des largeurs d'impulsions de l'ordre de $0.03 \mu\text{s}$.

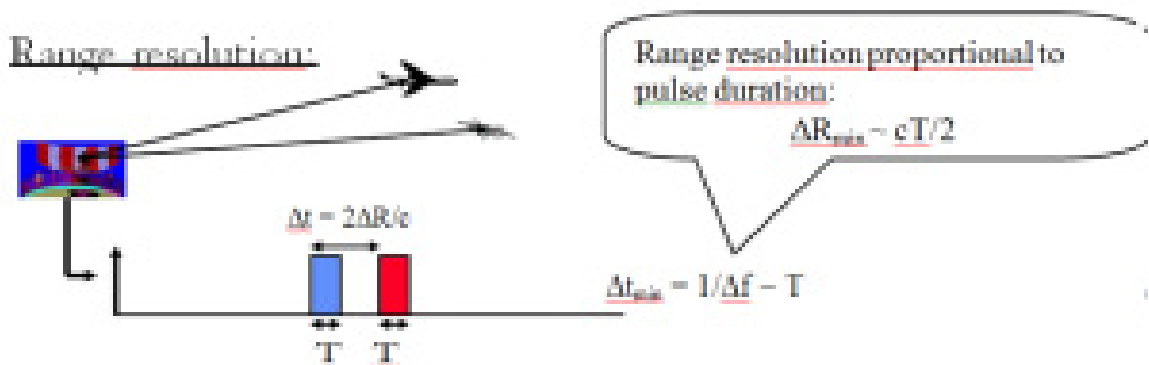


Figure 12: résolution en distance

2.1.2.12 pouvoir séparation angulaire :

Nous avons défini, précédemment le pouvoir séparateur axial en fonction de la durée τ du signal émis ; l'angle d'ouverture en azimut du faisceau (θ) nous permet d'évaluer la séparation latérale minimale de 2 cibles en fonction de la distance R.

La séparation latérale est : $S = \theta R$ (θ étant exprimé en radians). pratiquement θ s'exprime en degré ; nous écrivons donc :

$$S = 2\pi/360 \theta^\circ R.$$

Exemple:

Pour un diagramme azimut ayant une ouverture de 3° a 180NM, la distance de séparation latérale serait:

$$S = 2\pi/360 .3.180 = 10\text{NM}$$

=> la directivité et le pouvoir séparative militent donc en faveur d'une faible valeur de θ . une ouverture de 1° , par exemple, réduirait la séparation latérale a 3.15NM environ

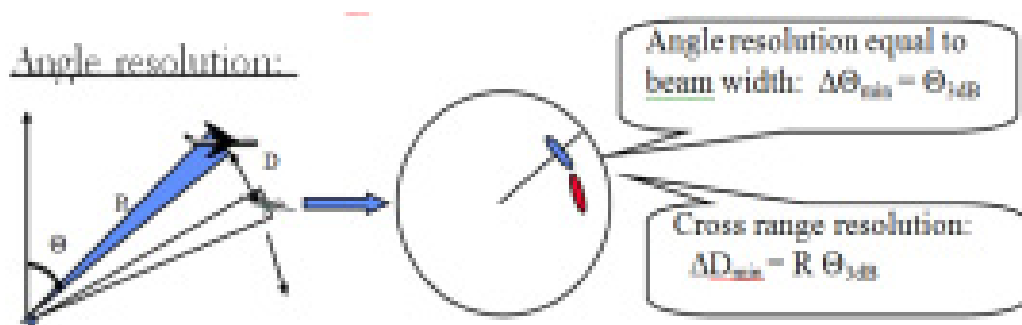


Figure 13: résolution angulaire

2.1.3 Diagramme azimut :

2.1.3.1 principe :

Le diagramme azimut représente la variation du gain de l'antenne en fonction de l'angle azimut : $G = f(\theta_{az})$

Figure page 26 (1 + 2)

L'axe de rayonnement principal traduit le gain max G_0 choisi logiquement comme référence 0 dB.

Les gains de part et d'autre de l'axe de rayonnement traduiront donc des affaiblissements et seront négatifs.

Louverture azimutal θ est définie par convention a - 3db

L'antenne sera bien entendu d'autant plus directive que θ sera petit.

Nous avons figuré sur la figure suivante pour concrétiser l'influence de rayonnement secondaire, 2 positions de l'antenne dans l'espace :

- Le lobe principale face a la cible C
- Le premier lobe secondaire gauche face a la cible

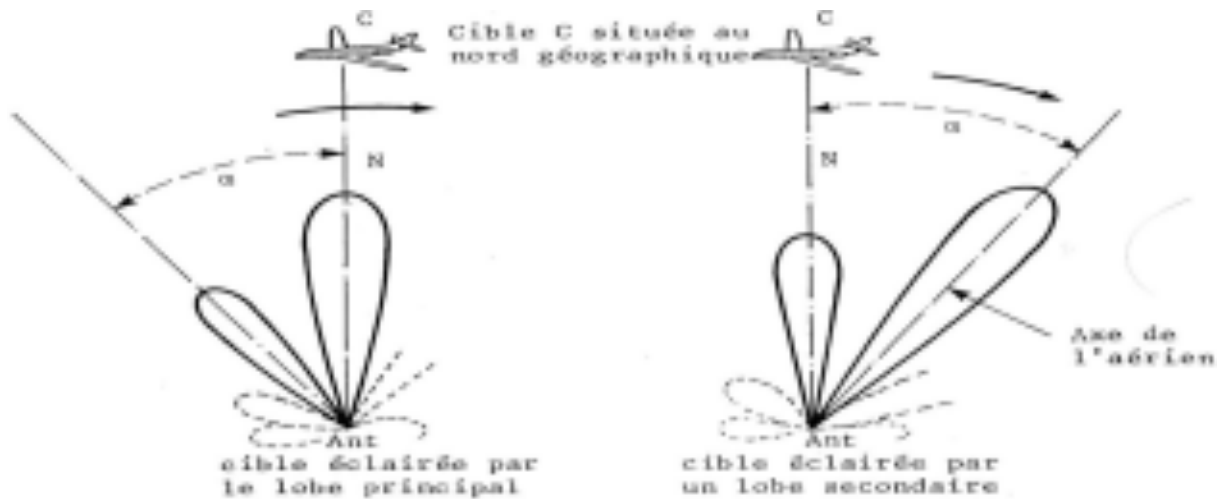


Figure 16: explication du phénomène du lobe secondaire

Du fait de la rémanence du tube cathodique, l'observateur voit 2 plots C1 et C2.

C2 traduit une réponse sur lobe secondaire et est positionné une distance exacte mais dans un azimut erroné.

Nous risquons donc de détecter la même cible autant de fois qu'il y a de lobes secondaires importants et de voir une couronne au centre de l'écran.

2.1.3.3 Atténuation des lobes secondaires :

- Au niveau de l'aérien :

En l'absence de toute autre considération d'ordre technique ou écologique nous dirons que le lobe principal est élaboré à partir du centre du réflecteur, alors que les lobes secondaires sont essentiellement produits par les bords du réflecteur.

Les champs rayonnés par une partie élémentaire du réflecteur dépend de la « loi d'illumination » du réflecteur

D'autre part, la directivité de l'ensemble est proportionnelle au rapport λ/d ; d étant la dimension du réflecteur dans le plan considéré et λ longueur d'onde

On a : $\theta = k. \lambda/d$

Le coefficient k dépend de la loi d'illumination du réflecteur

D'après les remarques précédentes :

- Si on veut réduire le nombre de lobes secondaires, on est amené à diminuer la dimension d de l'aérien dans le plan « azimut » considéré, mais alors, on a une directivité moins bonne :
- Pour une directivité donnée « d fixé », on peut réduire le niveau de lobes secondaires en adoptant une loi d'illumination du réflecteur telle que les bords soient beaucoup moins « éclairés » que le centre.
- Généralement, on adopte une loi sinusoïdale ou parabolique ou encore, en courbe de gauss (celle dépend de l'utilisation et du cahier de charge).

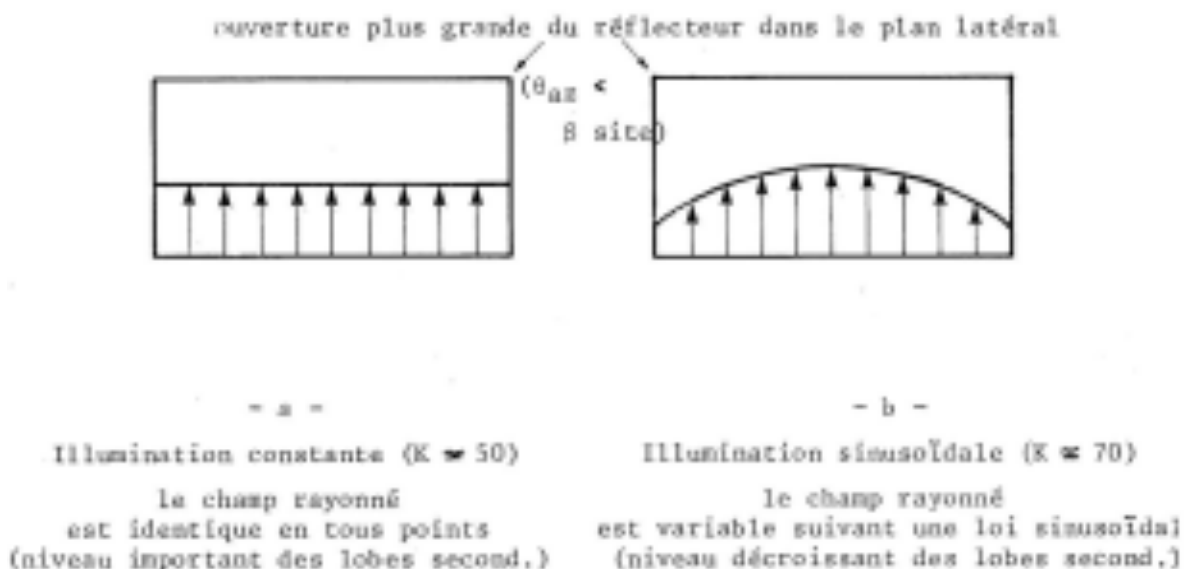


Figure 17: loi d'illumination

- Au niveau de récepteur :

On atténue ou on neutralise généralement l'influence des lobes secondaires en même temps que le clutter de sol inévitable en zone proche, par l'application en réception d'une loi de gain variable avec la distance ou le temps (GVT).

- Pouvoir séparative angulaire
- L'angle d'ouverture en azimut de faisceau θ nous permet d'évaluer la séparation latérale minimale de 2 cibles en fonction de la distance R

$$S = 2\pi/360 \theta R$$

2.1.4 Volume exploré par un radar panoramique et diagramme de couverture radar :

2.1.4.1 description :

Le volume à surveiller pour un radar de veille devrait théoriquement être symbolisé par un cylindre dont l'hauteur correspondante est une altitude maximale h_0 et le rayon de base définirait la distance maximale R_0

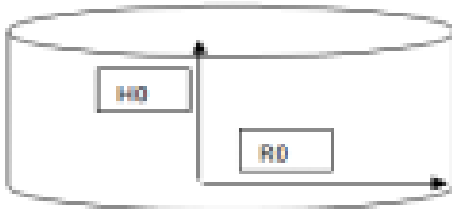


Figure 18: volume à surveiller

Le rectangle obtenu à partir d'une coupe dans le plan vertical sur lequel seront associées à l'altitude et la distance en fonction des angles de site symboliserait un diagramme de couverture idéal

En faite, la surveillance, en altitude ou en site, d'une zone correspondant a la partie hachurée de la figure suivante n'est guère souhaitable et pratiquement irréalisable sur le plan technique : aussi sera-t-on amené a faire les remarques importantes suivantes :

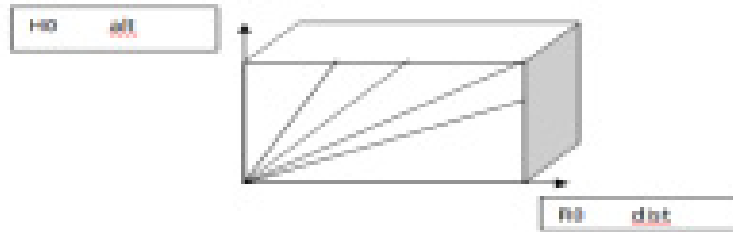


Figure 19: diagramme de couverture correspondant

2.1.4.2 sites faibles :

On n'a pas intérêt a disposer d'un gain important dans des sites bas voisins su site 0° , sinon les échos parasites, tels ceux produits par des bâtiments, des montagnes, etc..... seraient de niveau comparable, voire supérieurs, a ceux des cibles que l'on veut utilement détecter.

L'éclairissement de sites faibles en zone lointaine sans tenir compte de l'altitude des avions en survol serait une erreur. les échos détecté collines ou montagnes risqueraient de masquer les cibles utiles et de toute façon.

On cherchera donc a résoudre ce problème en choisissent un diagramme site : $G = f(\beta \text{ site})$ présentant une certaine directivité, c'est-à-dire une décroissance rapide du gain pour les sites faibles .sur un diagramme souhaitable de couverture (fig 1.26), cette décroissance vers les sites faibles se traduit a partir de l'angle de pointage optimum β_0 auquel correspond le gain $G_0 \text{ max}$ et par conséquent le portée max R_0 .

Le gain pour le site $\beta = 0^\circ$ est appelé CHUTE AU SOL.

2.1.4.3 sites élevés :

D'autre part, pour les sites élevée, établir le « plafond » de la zone a surveiller a une hauteur constante au-dessus du sol suppose un diagramme de couverture « horizontal » (parallèle a la surface terrestre)

Or, l'élément directif, dirigé vers les sites relativement bas, ($\beta > 6^\circ$) ne rayonne pratiquement pas au zénith.

Le gabarit le plus idéal possible du diagramme de couverture sera alors celui

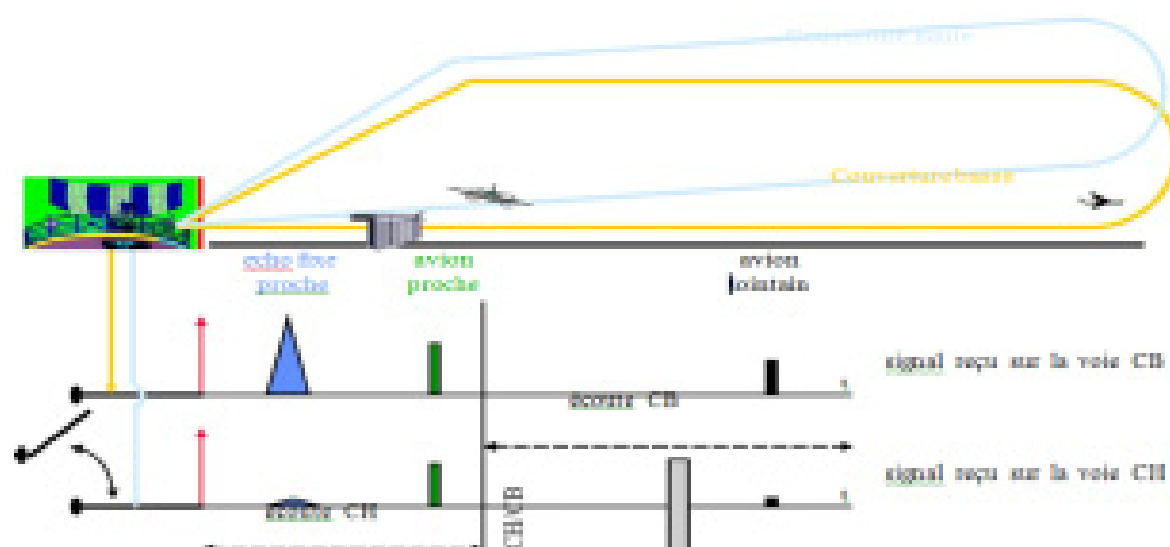


Figure 20: diagramme réelle

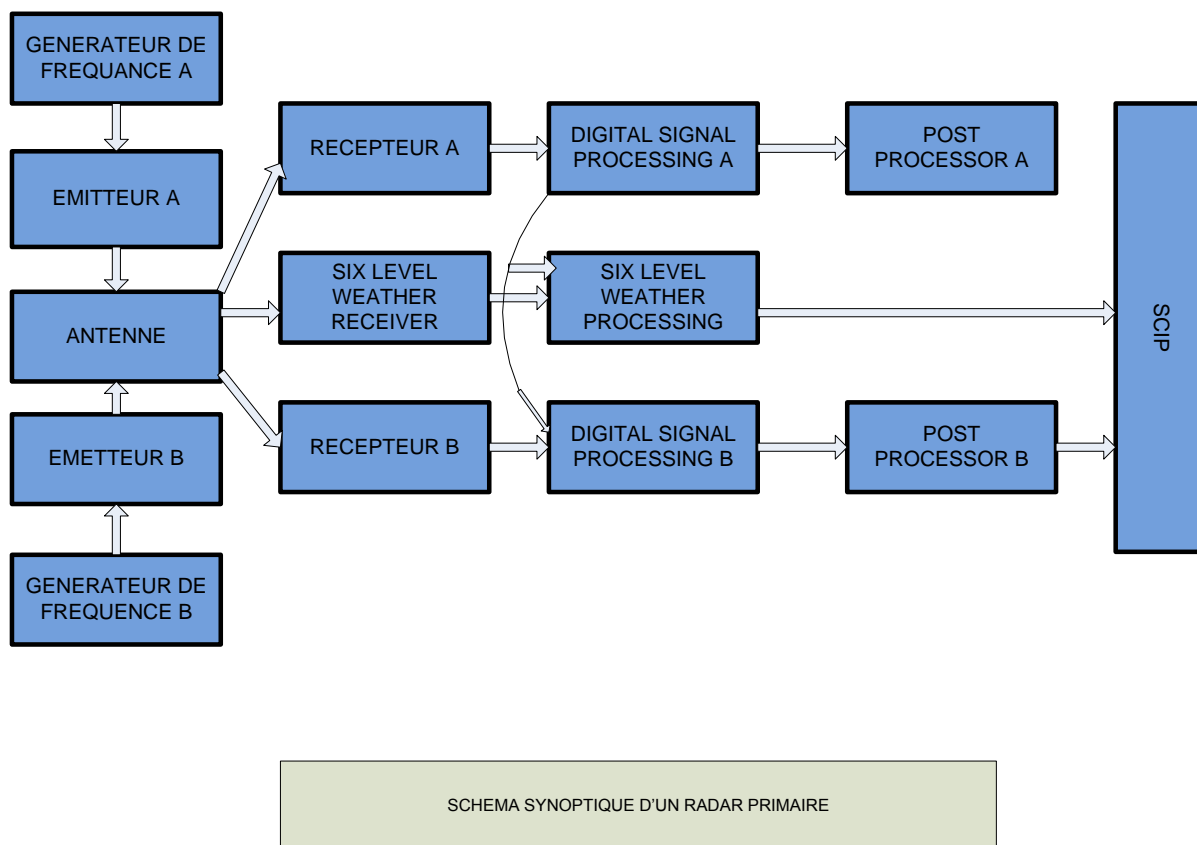
2.1.5 Architecture du radar :

2.1.5.1 station radar



Figure 21: Antenne Radar

2.1.5.2 Schéma Synoptique d'un radar primaire :



SCHEMA SYNOPTIQUE D'UN RADAR PRIMAIRE

Figure 22: Architecture Radar

2.1.5.3 Description des différents composants du radar primaire :

Générateur de fréquence : permet de fournir la fréquence nécessaire pour l'émetteur

Coho : 31,67 Mhz et stalo 2669,43 Mhz.

Emetteur : L'émetteur du radar produit des impulsions de courte durée RF de haute puissance de l'énergie qui est rayonnée dans l'espace par l'antenne. L'émetteur du radar doit avoir les caractéristiques suivantes techniques et d'exploitation:

- L'émetteur doit avoir la capacité requise pour générer la puissance moyenne et la puissance RF de pointe nécessaires.
- L'émetteur doit avoir une largeur de bande appropriée RF.
- L'émetteur doit avoir une grande stabilité RF pour répondre aux besoins de traitement du signal.
- L'émetteur doit être facilement modulable pour répondre aux exigences de conception de forme d'onde.
- L'émetteur doit être efficace, fiable et facile à entretenir et l'espérance de vie et le coût du dispositif de sortie doit être acceptable.

Antenne : divise la couverture en couverture basse et couverture haute, la première est utilisée pour l'émission et la réception tant dit que le deuxième elle est utilisé pour la réception seulement

Assure la réception des données météo

Récepteur : reçoit les données radar et le convertie en données digital de 12 bits

Compare la phase de signal reçu avec celle du cohérent à fin de déterminer la nature de cible

Permet de détecter des cibles à faible puissance

Digital signal processing: receive input from on line target channel

Reject ground and weather clutter (geo censor map, clutter map)

Six level weather: detect 6 level of weather

Perform smoothing and contouring

Post processing: associate primitive target detections

Track target scan by scan

Perform range and azimuth centroiding of target returns

SCIP: select surveillance and weather data to be sent to remote site

Control radar operation

Verifies system control panel selection

2.2 Radar solid state :

2.2.1 *Présentation :*

Si nous voulons avoir une résolution fine, la durée de l'impulsion doit être la plus courte possible, ce qui nous impose soit de grandes puissances (difficile à réaliser, emploi de klystrons coûteux) soit d'accepter de réduire la portée utile du radar.

Le problème posé à un radar à compression d'impulsion consiste à accroître la portée utile sans dégrader le pouvoir séparateur tout en gardant des puissances raisonnables.

2.2.2 *Concept élémentaire :*

2.2.2.1 Séquence de forme d'onde :

Les formes d'ondes cohérentes générées et traitées par le radar à compression d'impulsion (dans ce cas radar STAR 2000) utilisent deux types différents d'impulsions :

Impulsions courtes non modulées pour la détection à courte portée

Impulsions longues modulées en fréquence pour la détection à longue portée

Ces différents types d'impulsions sont : entrelacées dans le temps

Multiplexées en fréquence

Les formes d'ondes sont transmises selon un motif répétitif, nommé séquence d'intervalle de traitement cohérent (Coherent Processing Interval Sequence, CPIS) adapté au temps de balayage du faisceau.

2.2.2.2 Définition d'une rafle :

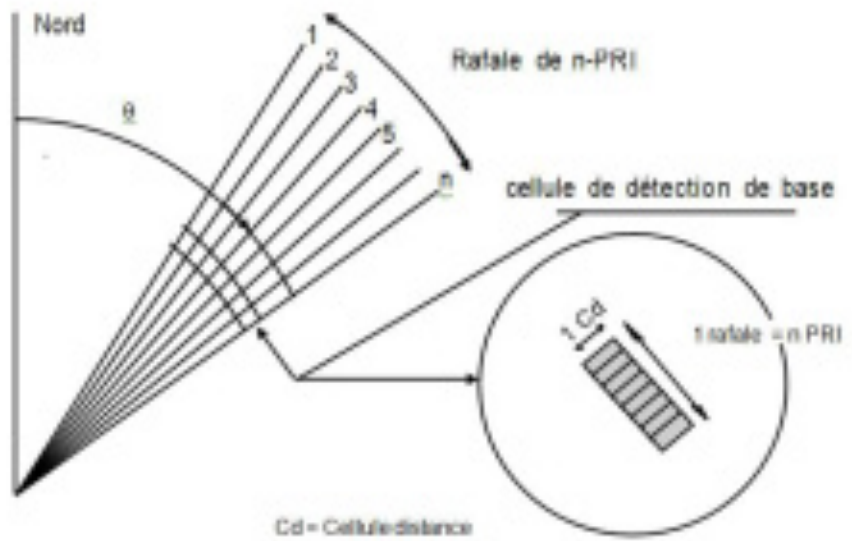


Figure 23: Forme d'un rafale

SEQUENCE D'INTERVALLE DE TRAITEMENT COHERENT (CPIS)

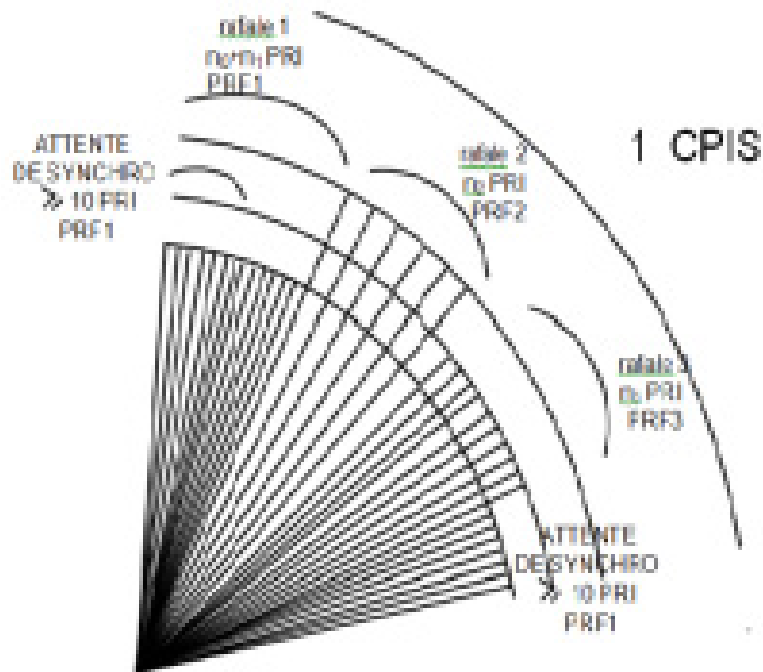


Figure 24: séquence CPIS

Les CPIS sont synchronisées en azimut et une "séquence d'attente" permet de les rephaser en azimut à chaque tour d'antenne.

Une CPIS comprend trois rafales.

Chaque rafale correspond à la transmission selon une fréquence de récurrence (PRI) constante :

D'une impulsion isolée (Rafales N°1 = SR1 et N°3 = LR2) ou de deux impulsions (Rafale N°2 = SR2 + LR1),

La deuxième rafale étant le multiplexage en temps et en fréquence d'une rafale courte portée et d'une rafale longue portée (SR2 et LR1).

SR = Short Range = Veille Proche VP

LR = Long Range = Veille Longue VL

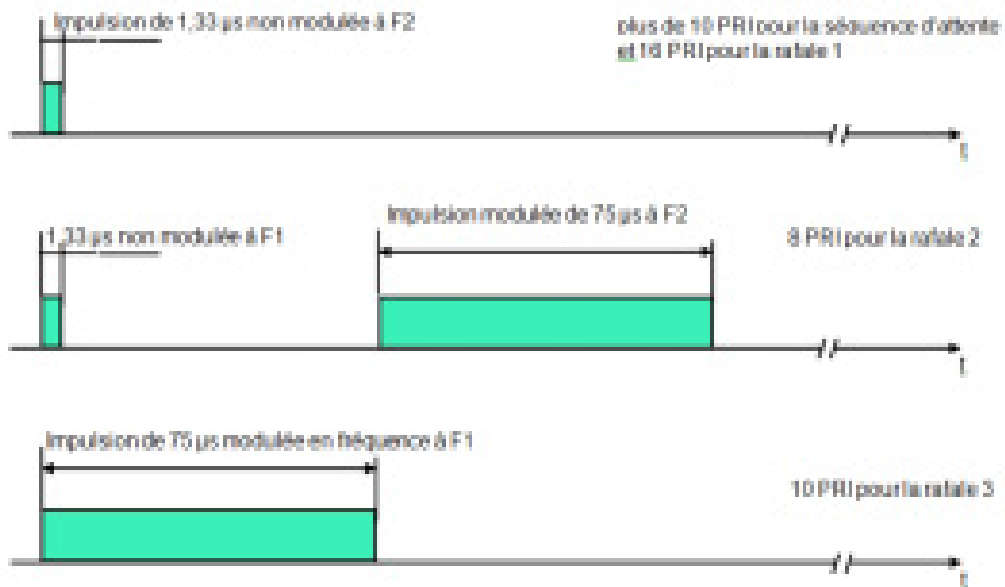


Figure 25: Formes d'onde courte et longue

2.2.2.3 *Forme d'onde courte portée (SR1/SR2)*

La forme d'onde courte portée fonctionne avec des impulsions de 1,33 μ s non modulées et couvre jusqu'à 10 2/3* milles nautiques permettant d'assurer la détection des cibles jusqu'à la limite de la zone aveugle des impulsions longue portée.

Cette forme d'onde comprend deux rafales cohérentes (SR1 et SR2) à deux fréquences différentes (respectivement F2 et F1).

La première rafale courte portée SR1 est émise à haute PRF (# 7 kHz*) pour permettre une large visibilité du domaine Doppler. Elle comprend 16 impulsions offrant plus de 10 dB de gain cohérent sur la cible.

La seconde rafale courte portée SR2 (multiplexée en temps avec la première rafale longue portée LR1) est émise avec une PRF basse standard (# 670 Hz*).

* Portée instrumentée pour un STAR 80 Nm. 10 2/3 Nm = 128 Cd (cellule distance)

$$1 \text{ Cd} = 1/12 \text{ Nm} = 154 \text{ m} = 1,03 \mu\text{s}$$

Cette gestion spécifique de la courte portée permet d'améliorer les performances de détection à courte portée par l'amélioration du gain d'intégration.

La diversité en fréquence entre SR1 et SR2 améliore grandement la probabilité de détection.

Ce gabarit de rafale spécifique est très efficace pour compenser la faible émission d'énergie pendant l'impulsion courte afin d'assurer la détection lorsque les cibles sont des avions de haute élévation.

2.2.2.4 *Forme d'onde longue portée (LR1/LR2) :*

La forme d'onde longue portée fonctionne avec des impulsions de 75 μ s et couvre de 10 2/3 Nm à 80 Nm soit 69 1/3 Nm = 832 Cd.

L'impulsion longue est modulée non linéairement en fréquence et de manière codée (Non Linear Frequency Modulated, NLFM) afin d'obtenir, après compression à la réception, une impulsion de 1,33 μ s nécessaire au pouvoir séparateur en distance.

Les techniques de codage / compression sont élaborées de telle manière que les lobes secondaires et les pertes soient réduits au minimum pour les cibles d'intérêt.

Cette forme d'onde se compose de deux rafales cohérentes (LR1 et LR2) de 8 et 10 impulsions générées à deux fréquences différentes (F2 et F1).

Les deux PRF différentes utilisées (# 670 Hz et 920 Hz) offrent un effet d'étalement efficace entre ces deux rafales qui permet d'obtenir un fonctionnement sans vitesse aveugle en condition de faux échos, pour une vitesse radiale atteignant \pm 850 Kts.

La diversité en fréquence entre LR1 et LR2 est aussi une solution éminente pour améliorer la probabilité de détection.

Motif d'émission :

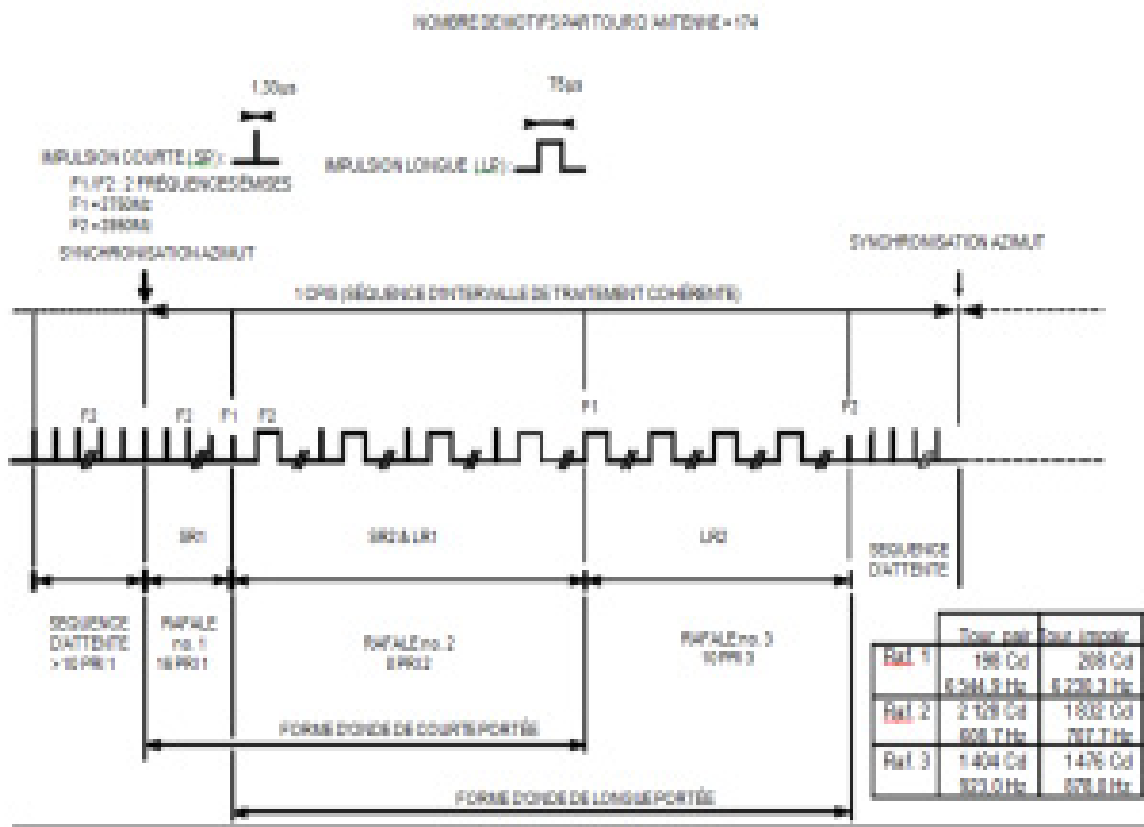


Figure 26: forme de signal d'émission

2.2.3 Configuration standard :

2.2.3.1 Description :

Une antenne bilobe AN-2000 S, incluant un réflecteur, un dispositif de réglage du site, une poutre de support des deux sources équipées, avec commande de polarisation pour chaque couverture.

Un mécanisme d'entraînement EA-2000P équipé de deux moteurs.

Un ensemble joint tournant JTS, comprenant principalement le joint tournant 7 voies et deux codeurs optiques de données azimutales.

Un coffret de distribution azimut ADU-2000, associé aux codeurs optiques, qui délivre les impulsions incrément d'azimut (ACP) et l'impulsion référence azimut (ARP) aux différents ensembles du radar.

Une armoire de commande d'antenne AA-2000.

Une nappe hyperfréquence MWA-2000S assurant l'interface entre l'émetteur et l'antenne d'une part et entre l'antenne et le récepteur d'autre part.

Elle est composée principalement de composants hyperfréquences: Duplexeur.

Dispositif de commutation pour :

canal A / B.

Couverture haute / couverture basse. Amplificateurs faible bruit.

Diviseurs, circulateurs, coupleurs, atténuateurs, limiteurs et charges d'adaptation.

Un émetteur SST-2000S, logé dans une armoire double et équipé de 8 ou 16 modules d'émission de puissance.

Un assécheur de guide d'onde GC-265 CT.

Compositions du système radar STAR2000 :

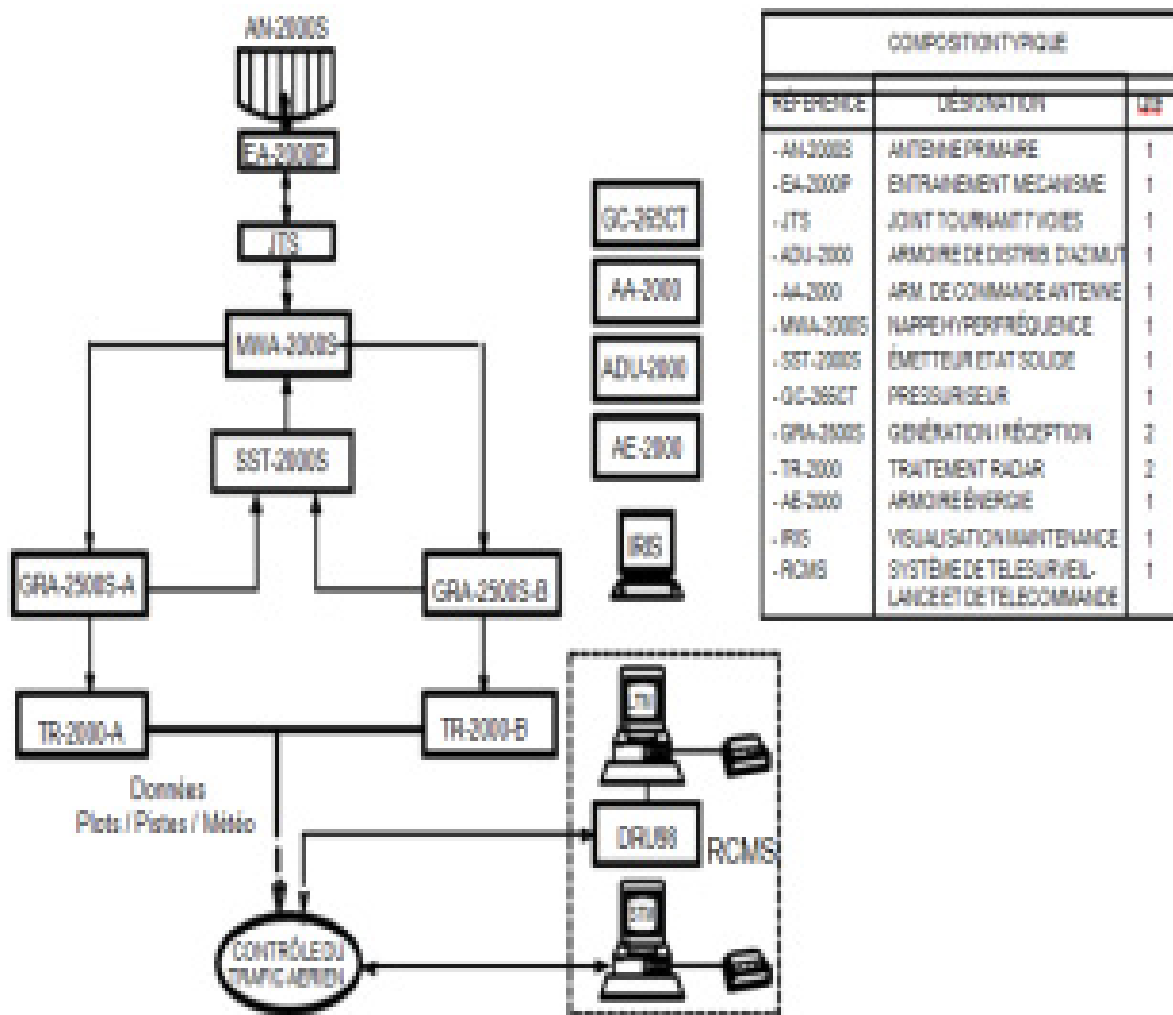


Figure 27: Architecture radar solid stat

2.2.3.2 Système d'antenne :

Le réflecteur, de forme parabolique dans le plan horizontal, présente un lobe étroit en azimut.

Une courbure en cosécante au carré dans le plan vertical permet d'obtenir un diagramme important en site.

Associée à deux sources légèrement décalées dans le plan vertical, l'antenne présente deux diagrammes de couverture à la réception; couverture basse (CB) et couverture haute (CH).

L'émission s'effectue sur la CB tandis que la réception est alternativement commutée entre la CH et la CB en fonction de la distance et du site d'installation.

La réception CH permet de diminuer le niveau du fouillis de sol pour des distances proches du radar.

Le diagramme de couverture CB/CH est programmable sur site.

L'antenne admet deux types de polarisation:

- Polarisation linéaire verticale, pour détecter la présence d'aéronefs standards en l'absence de précipitation atmosphérique
- Polarisation circulaire, pour diminuer le bruit météo et améliorer le rapport signal à bruit en cas de précipitation.

Une armoire de commande d'antenne assure la commande et le contrôle du mécanisme d'entraînement de l'antenne et des paramètres de rotation.

Le mécanisme d'entraînement de l'antenne est conçu pour fournir une vitesse de rotation de 15 t/min, 12 t/min (pour 80 Nm) ou 10 t/min.

Le joint tournant est inséré dans le mécanisme d'entraînement et permet d'assurer la continuité hyper et électrique.

Composants de la nappe hyperfréquence

Le joint tournant présente 4 voies hyperfréquences primaires :

2 voies avion (CH/CB)

2 voies météo (CH/CB)

Il est également capable d'interfacer les trois canaux MSSR en bande L.

La nappe hyperfréquence assure l'interface entre la partie émission / réception et l'antenne via le joint tournant.

Un duplexeur oriente les signaux émission ou réception sur la couverture basse (CB); des limiteurs protègent les 4 canaux de réception.

Des commutateurs rapides CH/CB sont implémentés en entrée des 4 canaux de réception de manière à sélectionner le faisceau de réception approprié en fonction de la distance.

Système de données de position en azimut :

Le système STAR-2000 est équipé de deux codeurs optiques 14-bit placés dans le joint tournant.

Ces codeurs sont montés directement sur l'axe afin de réduire au maximum les possibilités d'erreur angulaire.

Les codeurs sont associés au coffret de distribution d'azimut (ADU) qui délivre les impulsions de référence (ARP) et d'azimut (ACP) aux sous-systèmes du STAR-2000.

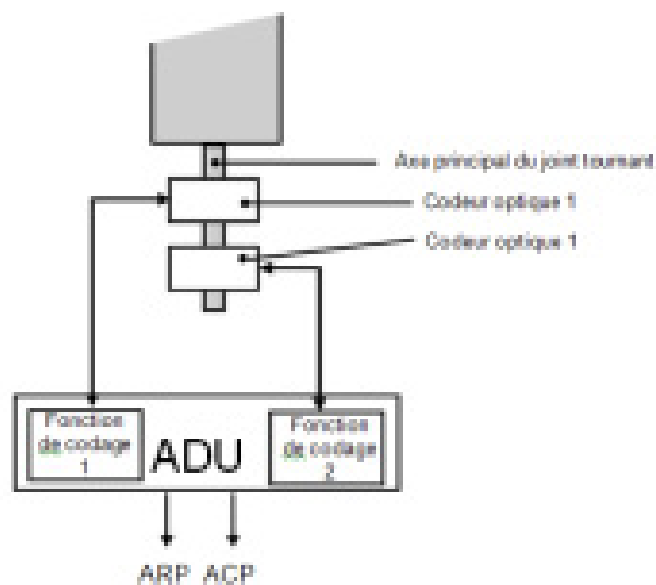


Figure 28: codeurs

2.2.3.3 *Emetteur* :

L'émetteur fonctionne sur la plage 2700 MHz - 2900 MHz sans réglage et est compatible avec la diversité de fréquences. Il est conforme aux exigences CEM et émet un spectre hyper étroit conforme à la norme MIL STD 469 - Catégorie D - Radars.

Sa conception à tolérance de panne permet d'en effectuer la maintenance sans interruption de service.

2.2.3.4 *Récepteur* :

Le coffret de Génération/Réception GRU assure deux fonctions distinctes:

- La génération des impulsions longues et courtes aux fréquences F1 ou F2 est effectuée par un synthétiseur numérique. Les séquences CPIS sont commandées par le traitement radar TR 2000.
- La réception des signaux.

Des récepteurs "avion" et "météo" dédiés sont couplés à l'antenne via des amplificateurs à faible bruit (AFB).

La conversion A/N directe des FI, suivie du traitement par un démodulateur amplitude phase (DAP), offrent une vidéo linéaire hautement dynamique ainsi qu'une bonne réjection de la fréquence image.

Cette conception évite les dérives en fréquence et écarte le besoin de réglages



Figure 29: récepteur Radar

2.2.3.5 Traitement radar :

Le traitement radar comprend :

Un traitement de signal (TS),

Un traitement de données (TD).

Le traitement de signal assure :

Le traitement des signaux avion

Le traitement des signaux météo

Le traitement de signal est basé sur des traitements 32 bits fonctionnant avec un logiciel temps réel. Il fournit la puissance de calcul nécessaire pour une forte réduction des lobes secondaires en sortie de compression d'impulsion et pour le traitement MTD adaptatif.

Les échos radar des rafales d'impulsions cohérentes émises sont traités séquentiellement au travers d'un banc de filtres Doppler (FIR). Le banc de filtres est

sélectionné de manière à réduire les fausses alarmes tout en maintenant une très haute visibilité des cibles.

Les données filtrées sont ensuite seuillées par un niveau adapté afin de supprimer les faux échos et assurer un taux constant de fausses alarmes (CFAR).

Le traitement de signal météo évalue les niveaux météo en fonction des 6 niveaux de référence NWS, après réjection des faux échos de sol.

La sélection du filtre sol est commandée par une carte adaptée au site.

Le traitement des données comprend le filtrage de plots de balayage à balayage, la génération de cartes météo et le formatage des données.

Le traitement de données peut gérer jusqu'à 700 cibles (Primaires, Secondaires ou associées) avec un maximum de 300 faux plots primaires et 100 faux plots secondaires.

2.2.3.6 *Echange des informations :*

Au niveau de chaque TR 2000, la transmission des informations entre les deux fonctions traitement, signal et données, s'effectue en pratique au moyen d'un réseau Ethernet:

- réseau Ethernet A pour le TR 2000A,
- réseau Ethernet B pour le TR 2000B.
- Cette application implique l'utilisation des composants spécifiques aux réseaux Ethernet:
 - concentrateur Ethernet (hub),
 - circuit d'adaptation au réseau (transceiver).

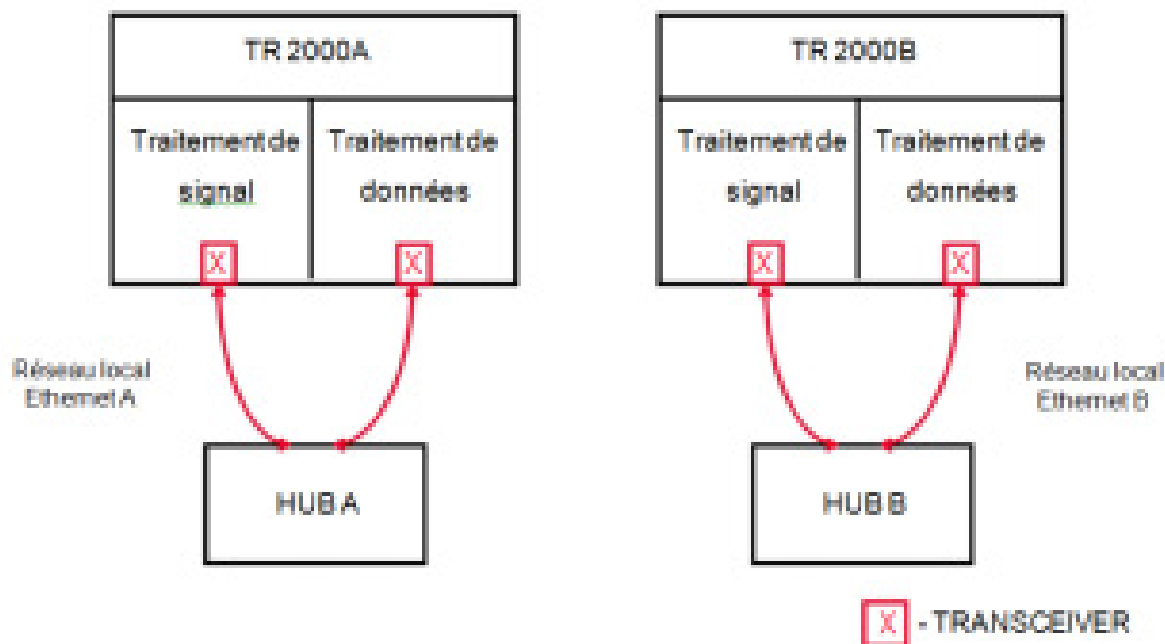


Figure 30: Traitement Radar

2.2.4 Génération de l'impulsion

Séquentiellement, la chronométrie TR-2000 envoie des commandes à la génération numérique pour générer les impulsions courtes ou longues.

Les impulsions sont générées en FI basse (56 MHz) puis sont converties en hyper via un étage convertisseur-élevateur.

L'oscillateur local (OL1) détermine la fréquence hyper finale émise (F1 ou F2).

Après amplification, une impulsion hyper de 5 à 10 mW est appliquée au préamplificateur. L'impulsion hyperfréquence est alors amplifiée par les 16 modules de puissance en parallèle.

Les sorties hyper sont sommées pour délivrer une puissance crête de 25 kW. Les impulsions d'émission sont ensuite envoyées sur la source couverture basse de l'antenne via la ligne hyperfréquence.

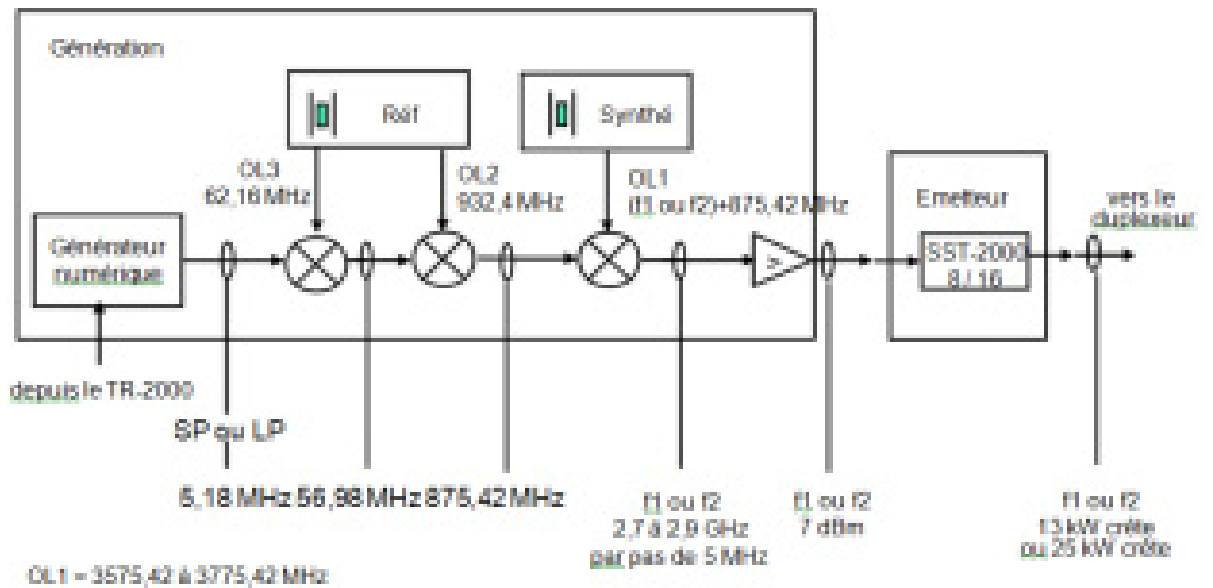


Figure 31: schéma émetteur

2.2.5 Principe de la réception :

En courte portée, la couverture haute ou basse est sélectionnée par des commutateurs CH/CB

La commutation de la couverture haute vers la couverture basse dépend du niveau de fouillis fixe permanent environnant le radar, donc du site d'installation.

Ce diagramme de couverture est programmé au niveau du TR 2000.

En longue portée, seule la couverture basse est utilisée.

Le signal sélectionné est pré-amplifié par un AFB (amplificateur à faible bruit) équipé d'une fonction STC (sensibilité en fonction du temps).

Les lois STC, programmables au niveau du TR 2000, s'appliquent en courte portée afin d'ajuster la sensibilité du récepteur en fonction de la distance et de l'environnement extérieur propre au radar.

Après amplification à faible bruit, les signaux hyperfréquences F1 ou F2 sont transposés en signaux à fréquence intermédiaire très basse 5,18 MHz (VLIF) au moyen de trois mélangeurs successifs.

Le signal VLIF est ensuite converti en numérique sur 12 bits puis envoyé au démodulateur amplitude - phase (DAP).

Le DAP numérique délivre les échantillons vidéos I et Q linéaires sur un bus parallèle 16 bits.

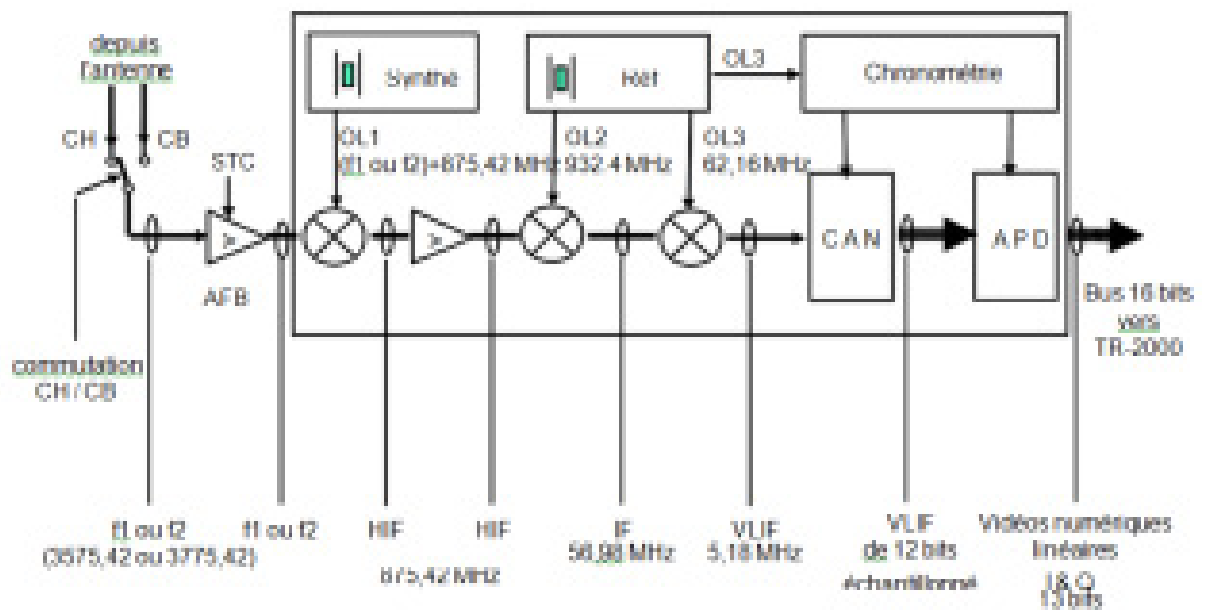


Figure 32: architecture de récepteur

Chapitre 3
LE RADAR SECONDAIRE

3.1 Radar SSR classique:

3.1.1 LE FONCTIONNEMENT

Le schéma ci-dessous représente un radar secondaire interrogeant un avion et traduisant les informations reçues sur un écran.

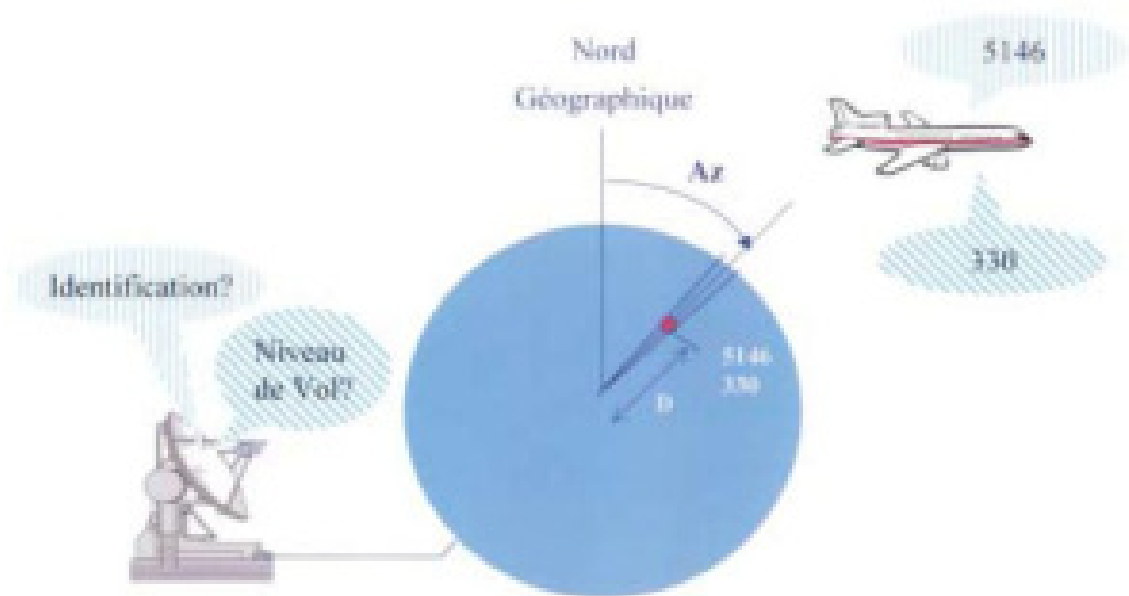


Figure 33:principe du radar secondaire

Le radar secondaire pose deux questions

Quel est ton code ?

Chaque avion se voit affecter par la réglementation un code qui devra être positionné par le pilote sur le transpondeur.

Quel est ton niveau de vol ?

Le transpondeur est relié à l'altimètre de l'avion. Le niveau de vol ou Flight Level sera renvoyé au radar.

✚ Mesure de la distance:

En radar la distance était fonction du temps en utilisant la relation $D = \Delta T / 2$. La réponse d'un transpondeur qui doit interpréter la question posée ne peut techniquement pas être

instantanée. Tous les transpondeurs de toutes les marques se sont vus imposer un temps de réponse fixe t_r de $3 \mu s$ qui sera soustrait par le radar.

$$D \text{ devient } \frac{C \tau (\Delta t - t_r)}{2}$$

✚ Mesure de l'azimut:

En radar secondaire classique (non monopulse) SSR, l'azimut de la cible est l'azimut de l'antenne. Ces types de radars sont en cours de disparitions.

3.1.2 L'INTERROGATION

3.1.2.1 Le signal émis

Fréquence de l'interrogation radar : 1030 Mhz

Fréquence de la réponse transpondeur : 1090 Mhz

Le délai entre P1 et P3 représente le Mode.

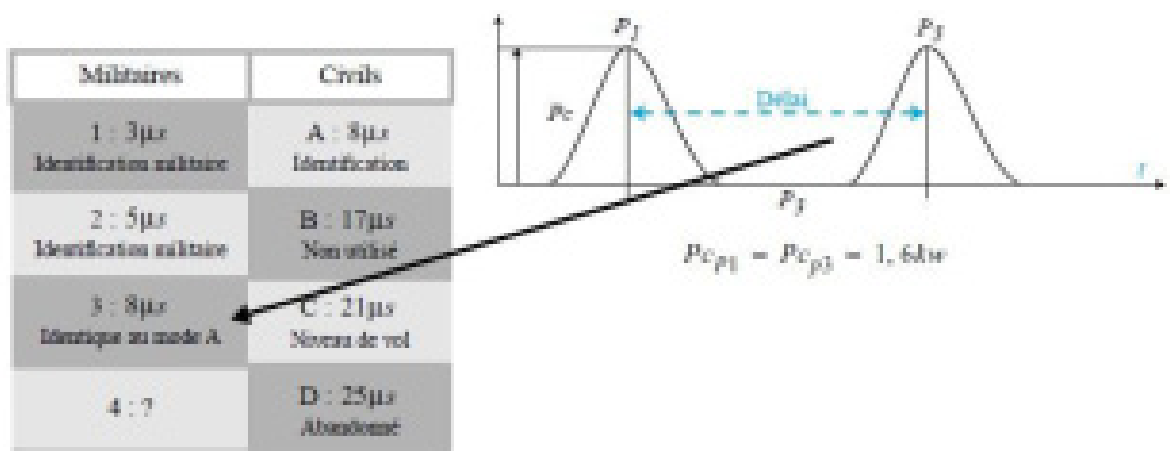


Figure 34:interrogations ssr

3.1.2.2 Positionnement en azimut

- Lobe directif libellé Σ d'ouverture 2,4
- La position de l'antenne se mesure par rapport au Nord Géographique (Az) par un codeur 14 bits. Ceci équivaut à une précision de $0,022^\circ$: $0,022 = 360/214$
- Le niveau du signal sur les lobes secondaires sera toujours inférieur au

minimum de 26 dB par rapport au lobe principal.

3.1.3 LE TRANSPONDEUR

3.1.3.1 La réponse transpondeur

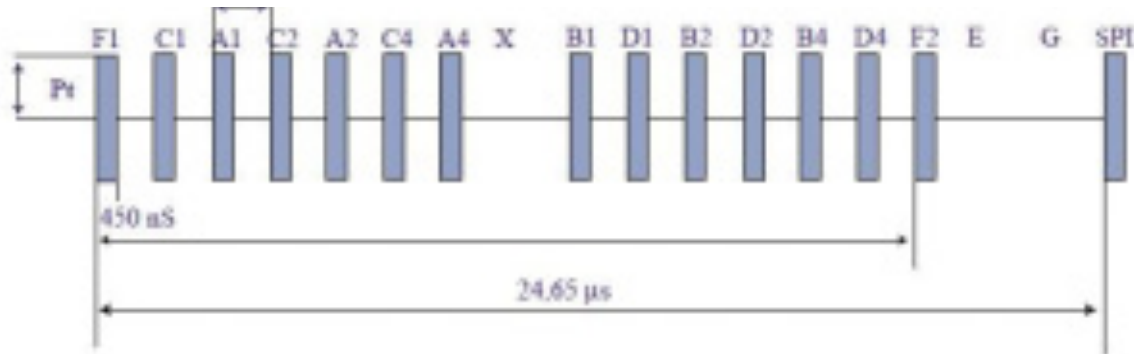


Figure 35:forme de la réponse

Un Code transpondeur s'exprime sous la forme de 4 mots de 3 bits :

- Mode A Ces mots s'exprimeront par ABCD
- Mode C Codage du FL (Fly Level) : - 10 au FL 1267 par pas de 100 Pieds.

On utilise le Binaire Codé Réfléchi (Code de Gray)

- X, E, G ne doivent jamais exister
- SPI (Special Pulse Identification) est positionnée par le pilote pour les besoins du Contrôleur (Identifiez Vous).La piste apparaît avec un mode de visualisation remarquable à l'écran. Le SPI est renvoyée avec le mode A pendant une durée de 15 à 30 s
- La puissance émise devra être comprise ente 125 et 500 Watts

Après une réponse le transpondeur doit rester bloqué pendant $1s25$

(Normes OACI)

3.1.3.2 Synoptique du transpondeur

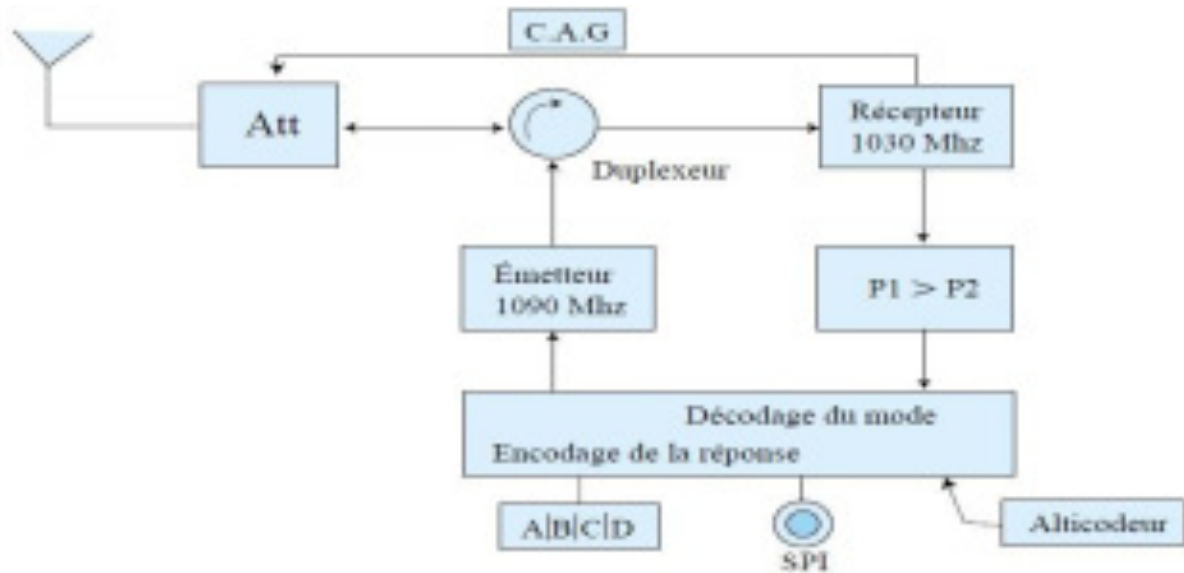


Figure 36:synoptique transpondeur

3.1.4 LE BILAN DE PUISSANCE

3.1.4.1 Les équations

Un radar émet la puissance P_i avec un gain d'antenne G_i (i pour Interrogateur) et avec une fréquence f_i correspondant à une longueur d'onde λ_i

De la même manière le transpondeur répond en émettant une puissance P_t , un gain d'antenne G_t (t pour Transpondeur) et une longueur d'onde λ_t

La densité de puissance reçue au transpondeur à une distance d du radar se retrouve dans l'expression

$$d_{pt} = G_i P_i / 4\pi d^2$$

Surface équivalente présentée par l'antenne du transpondeur : $S_t = (G_t \cdot \lambda_i^2) / (4\pi)$

Puissance reçue au transpondeur : $P_{rt} = S_t \times d_{pt} = (G_t G_i P_i * \lambda_i^2) / (d. (4\pi))^2$

A la Réception :

La densité de puissance reçue au radar à une distance d du transpondeur se retrouve dans l'expression

$$d_{pt} = G_t P_t / 4\pi d^2$$

Surface équivalente présentée l'antenne du radar : $S_1 = (G_i * \lambda_i^2) / (4\pi)$

Puissance reçue à l'interrogateur : $P_{ri} = S_i \times d_{pi} = (P_t G_t G_i * \lambda_i^2) / (d. (4\pi))^2$

3.1.4.2 *Bilan de puissance (Liaison Équilibrée)*

Les diagrammes ci-dessous correspondent aux valeurs indicatives des variations de puissances en fonction de la distance.

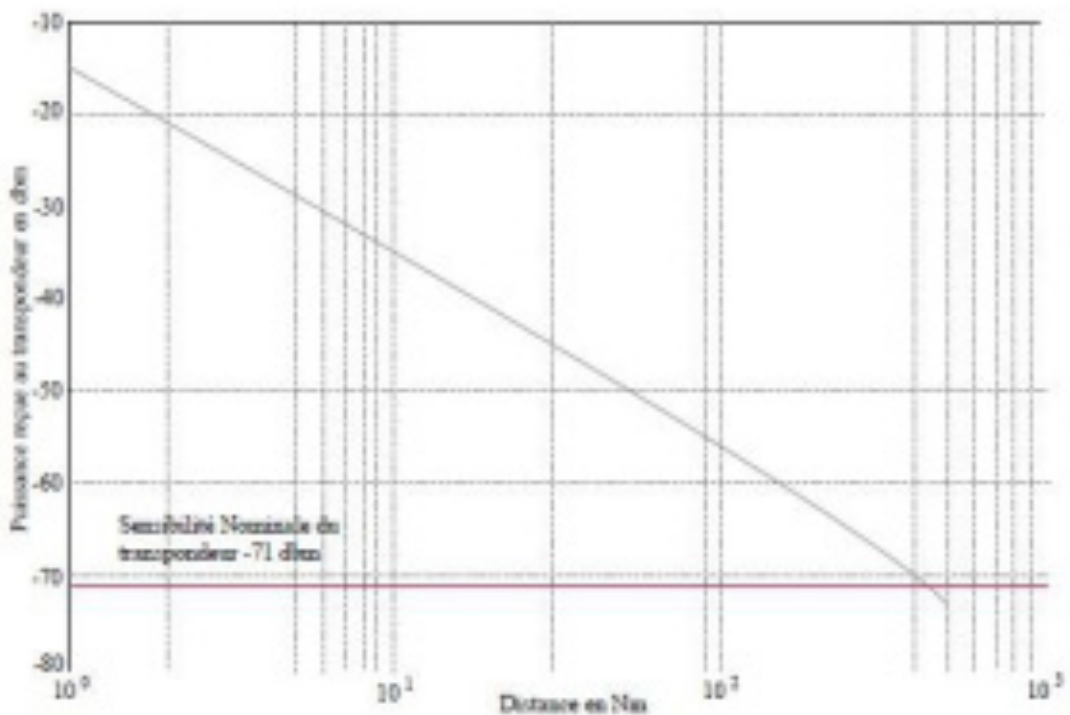


Figure 37: liaison montante

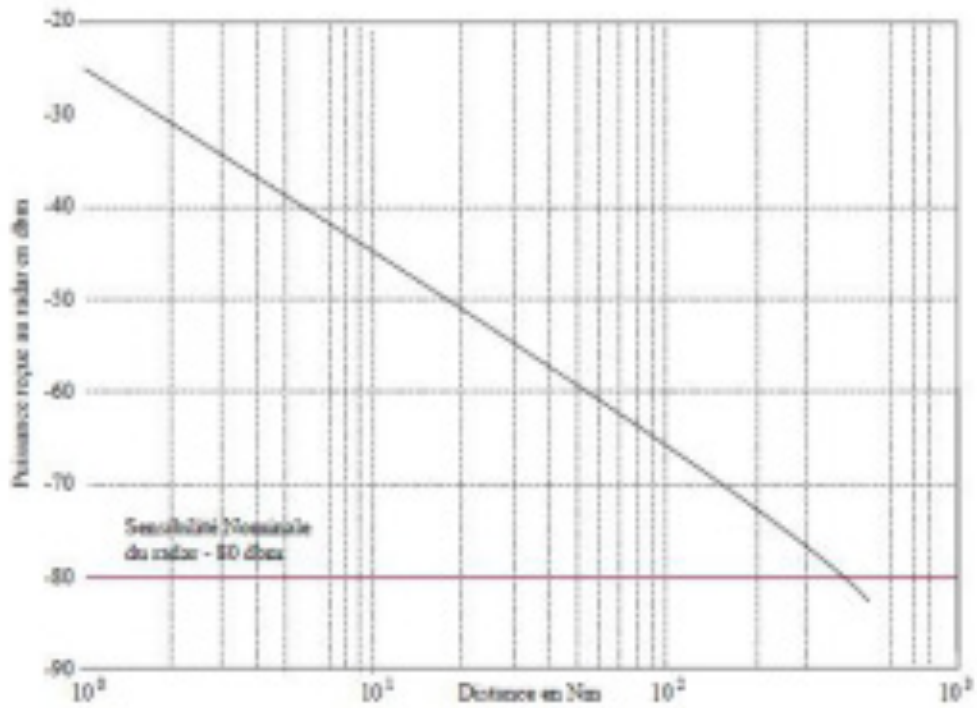


Figure 38:liaison descendante

On remarque que les niveaux :

- d'émission du radar 1600W et de limite de sensibilité du transpondeur *-71 dbm*
- d'émission du transpondeur entre 125 et 500W (on a pris 200) et de limite de sensibilité du radar *-80 dbm*

Donnent une portée maximum à peu près identique, c'est ce que l'on appelle une liaison équilibrée.

3.2 LES PHÉNOMÈNES PARASITES

3.2.1 LES PROBLÈMES

3.2.1.1 Les réponses sur lobes secondaires

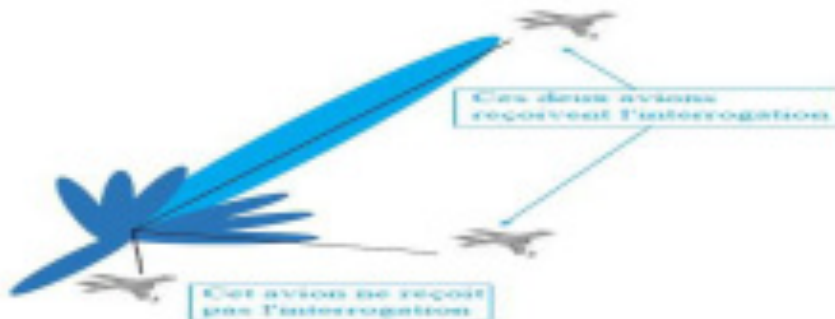


Figure 39:lobes secondaires

Un avion proche, dans l'axe d'un lobe secondaire va recevoir l'interrogation.

- La présence des lobes secondaires est quelque chose de naturel dans le cas d'antennes fortement directives.
- Une imperfection de géométrie d'antenne ne fera qu'accentuer le problème

La réception d'une réponse sur un lobe secondaire constitue, pour le radar, une information erronée sur la position de la cible.

Les réponses reçues, sur les lobes secondaires, sont beaucoup plus faibles que celles reçues sur le lobe principal.

3.2.1.2 Le fruit

(False Replies Unsynchronised with Interrogator Transmission) ou réponses asynchrones.

Une réponse, destinée à une station radar, est renvoyé par l'aéronef de manière quasi-omnidirectionnelle.

Celle-ci peut être captée par une autre station radar, si l'aéronef se situe dans le lobe principal de son antenne à ce moment là. La réponse ne peut pas être utilisée par cette autre

station, par manque de référence de temps. Elle lui est donc inutile et constitue un « fruit ». Ce dernier peut être gênant si les deux stations interrogent avec la même période de répétition.

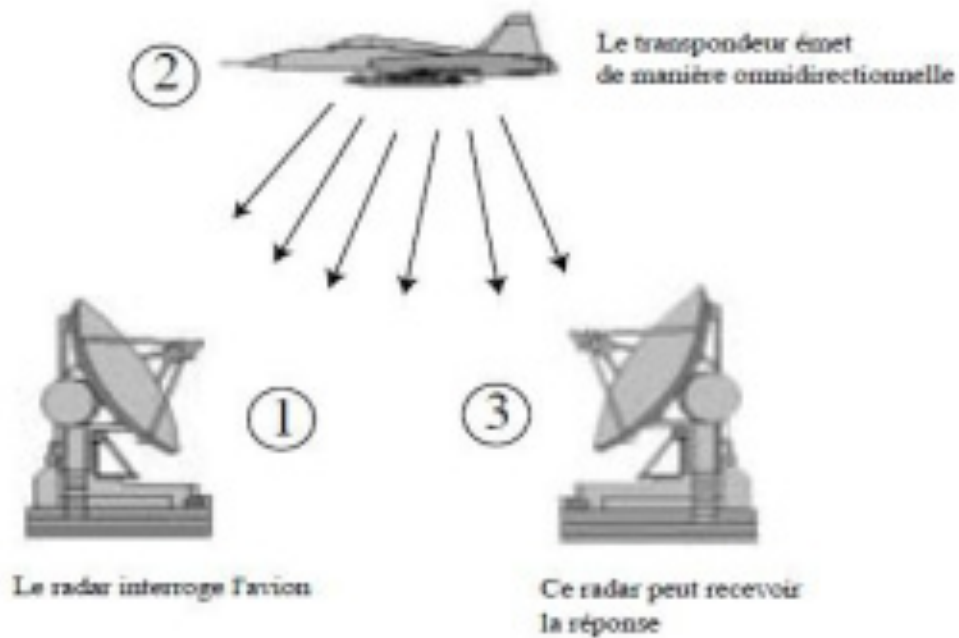


Figure 40:principe du transpondeur

En radar secondaire les fréquences d'interrogation (1030 Mhz) et de réponse (1090Mhz) sont identiques (Normes OACI). Le Radar 3 va recevoir et décoder les réponses du transpondeur 2 aux interrogations du radar 1.

3.2.1.3 *Les réponses en deuxième récurrence*

La cible se situe au-delà de la portée théorique. Si la réponse, qu'elle renvoie, est prise en compte, elle sera positionnée à une distance de la station correspondant à la différence qui existe entre sa position réelle et la portée théorique du radar.

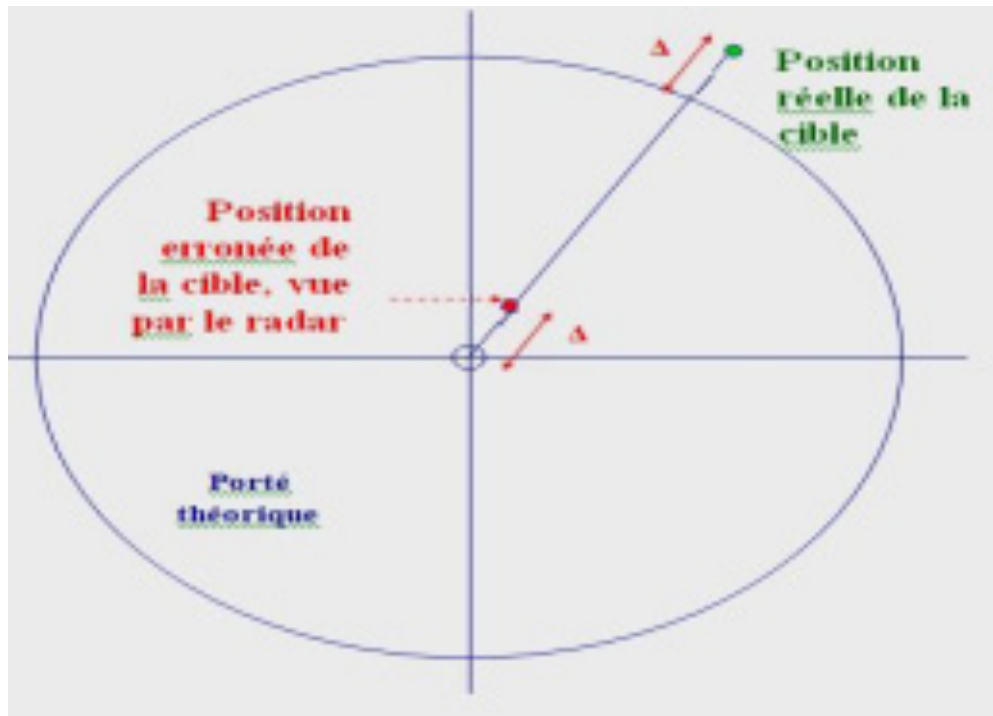


Figure 41:réponse en deuxième récurrence

Si l'on n'en prend pas garde la réponse à la première interrogation sera associée à la deuxième. La distance correspondra au Δt entre la deuxième interrogation et la réponse

3.2.1.4 Les réflexions

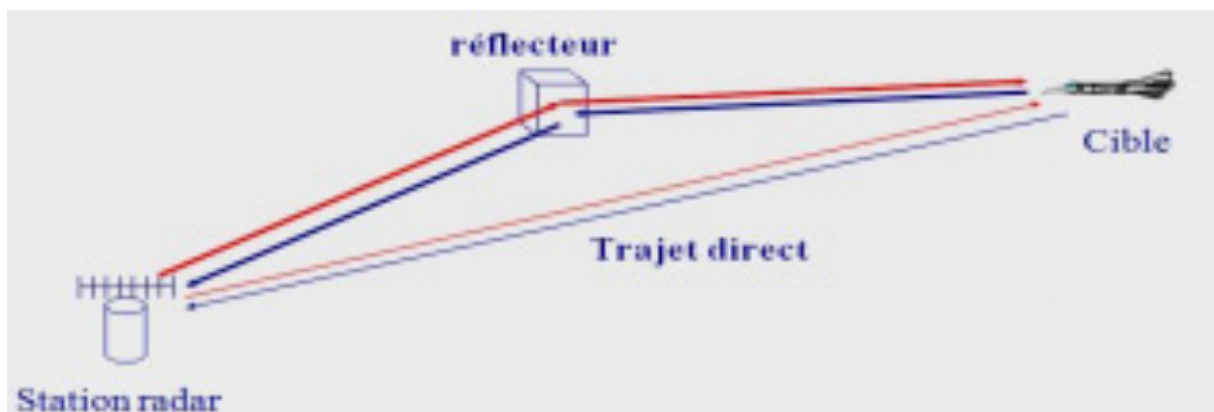


Figure 42:les réflecteurs

Les signaux détectés par l'intermédiaire d'un réflecteur, donnent des mesures fausses en azimut et en distance.

Le niveau du signal réfléchi est en général plus faible que le signal direct.

La cible, vue par l'intermédiaire du réflecteur, est plus éloignée que celle vue en trajet direct.

Les réflecteurs produisent, à partir d'une cible vraie, une deuxième cible qu'il faut éliminer.

3.2.1.5 *Le Garbling*

C'est l'enchevêtrement des réponses.

L'avion A et l'avion B se trouvent en même temps dans le lobe principal de l'antenne, à la même distance de celle-ci. Ils reçoivent donc en même temps l'interrogation du radar.

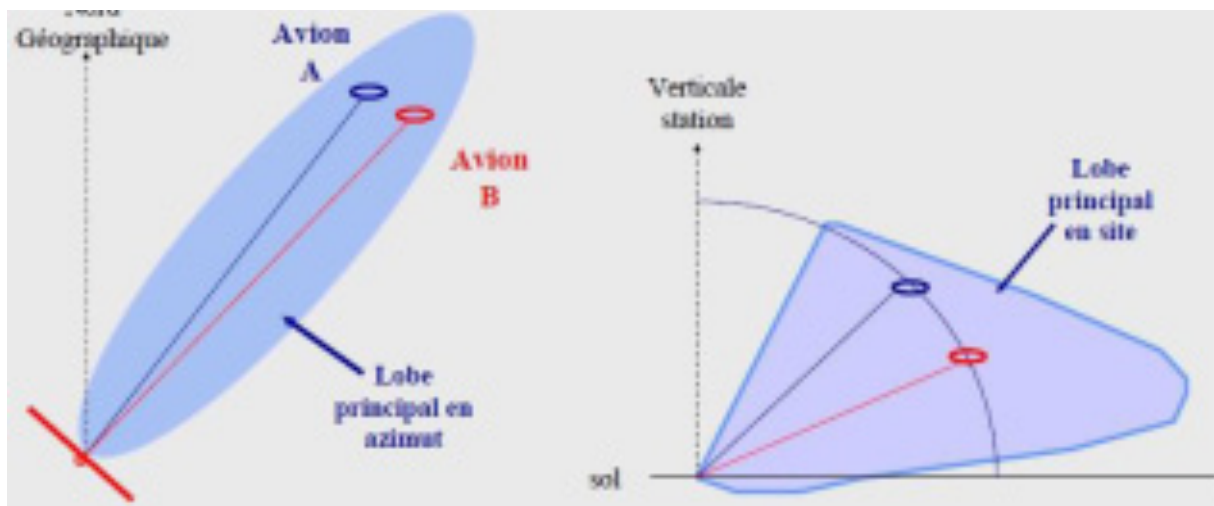


Figure 43:Garbling

Les réponses de A et B reviennent donc, au même moment, à l'entrée du récepteur du radar.

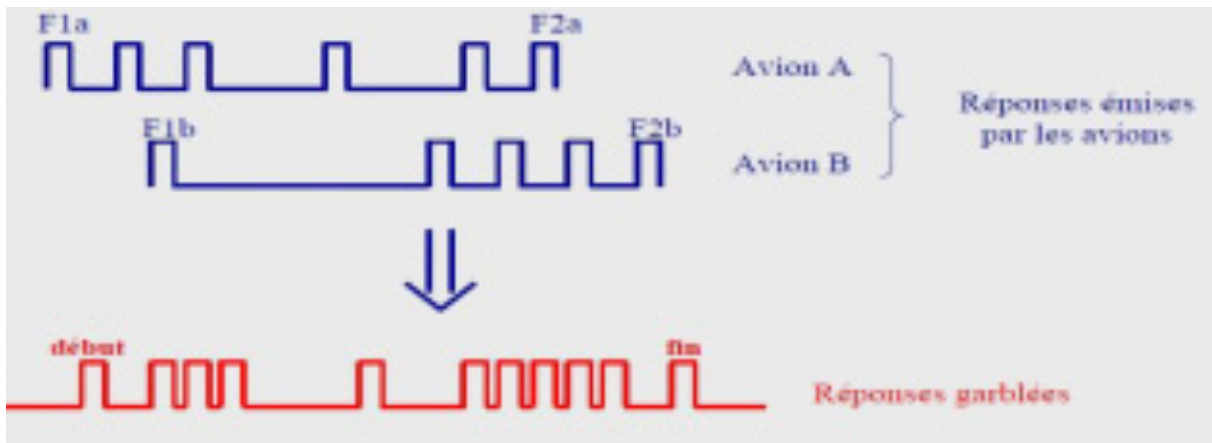


Figure 44:réponse garblées

Les réponses A et B reviennent enchevêtrées au récepteur du radar. Suivant les cas, il ne sera pas simple de distinguer quelle impulsion appartient à quelle réponse. Dans ce cas, il arrive fréquemment que les codes extraits soient faux ou invalides.

La longueur des réponses, n'est pas négligeable en équivalent temps distance.

20,3µs correspond à une distance d'environ 3 km (ou un peu moins de 2 Nm). L'enchevêtrement va donc se produire pour une différence de distance, entre A et B, de 3 km et en-dessous.

A cette échelle de distance, les réponses des deux avions peuvent rester garblées sur un ou plusieurs tours d'antenne.

Les conséquences du garbling peuvent se manifester à plusieurs niveaux, si le radar n'arrive pas à extraire correctement les codes. Dans ce cas, les codes extraits sont faux.

Le code C est affecté plus vite que le code A.

Piste monoradar :

- Les codes A et C, déportés et ensuite affichés à l'écran du contrôleur, pourront être faux.

Piste multiradar :

- Si les différents radars, qui détectent les avions garblés, n'extraient pas les mêmes codes, il peut y avoir dédoublement des pistes. Si les codes A et C sont différents d'un radar à l'autre,

le système associe les plots qu'il reçoit à plusieurs pistes au lieu d'une piste corrélée :

- Dans le cas où le code A extrait et attribué à la piste est faux, il y a perte de corrélation avec le plan de vol.

En principe, les systèmes multiradar sont mieux armés contre le garbling, puisqu'il peut toujours y avoir un des radars qui aura pu fournir les bons codes avec une bonne qualité.

3.2.2 DES SOLUTIONS

3.2.2.1 L'ISLS

(Interrogations avec Suppression de Lobes Secondaires). Le but est d'empêcher le transpondeur de répondre s'il est interrogé sur lobe secondaire.

On crée un deuxième diagramme de rayonnement Ω dit "de contrôle" sur lequel on va émettre une impulsion P_2 retardée de $2\mu s$ par rapport à P_1 . Ω doit être conçu pour qu'un avion interrogé sur lobe secondaire de Σ reçoive une amplitude sur P_2 supérieure à celle reçue sur P_1 . Le diagramme Ω est souvent représenté sous forme omnidirectionnelle en Azimut.

La réception d'un $P_2 > P_1$ va bloquer le transpondeur pendant $35\mu s$.

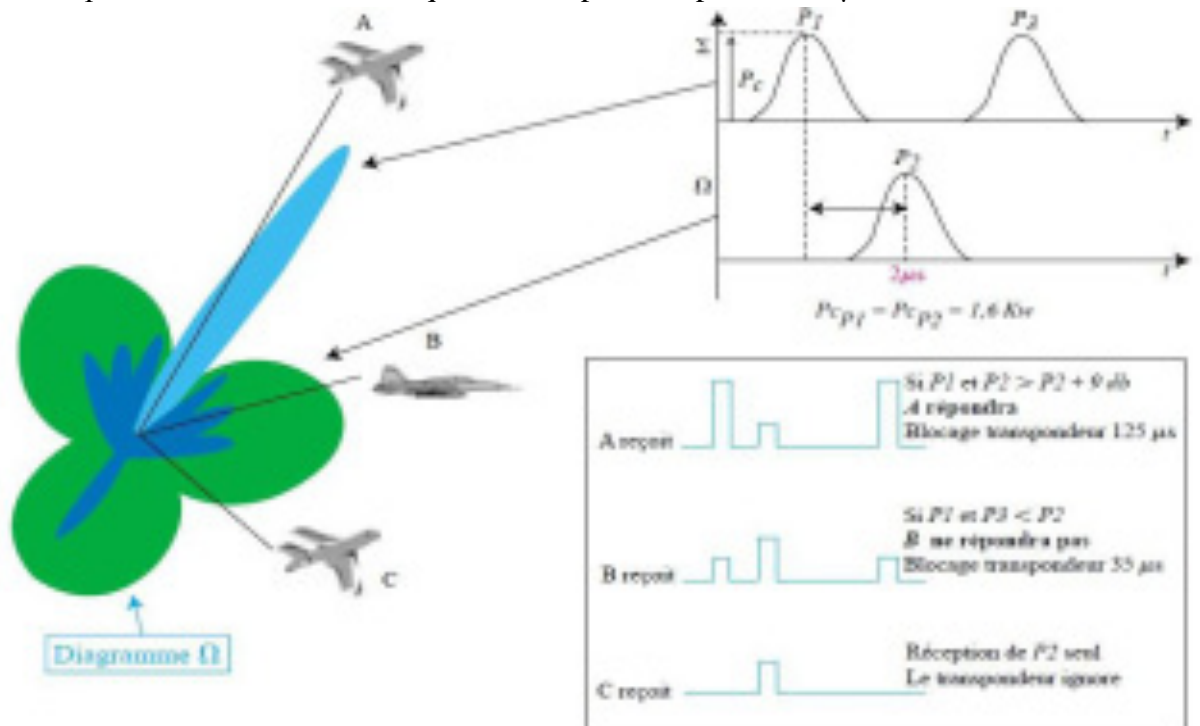


Figure 45: principe de l'ISLS

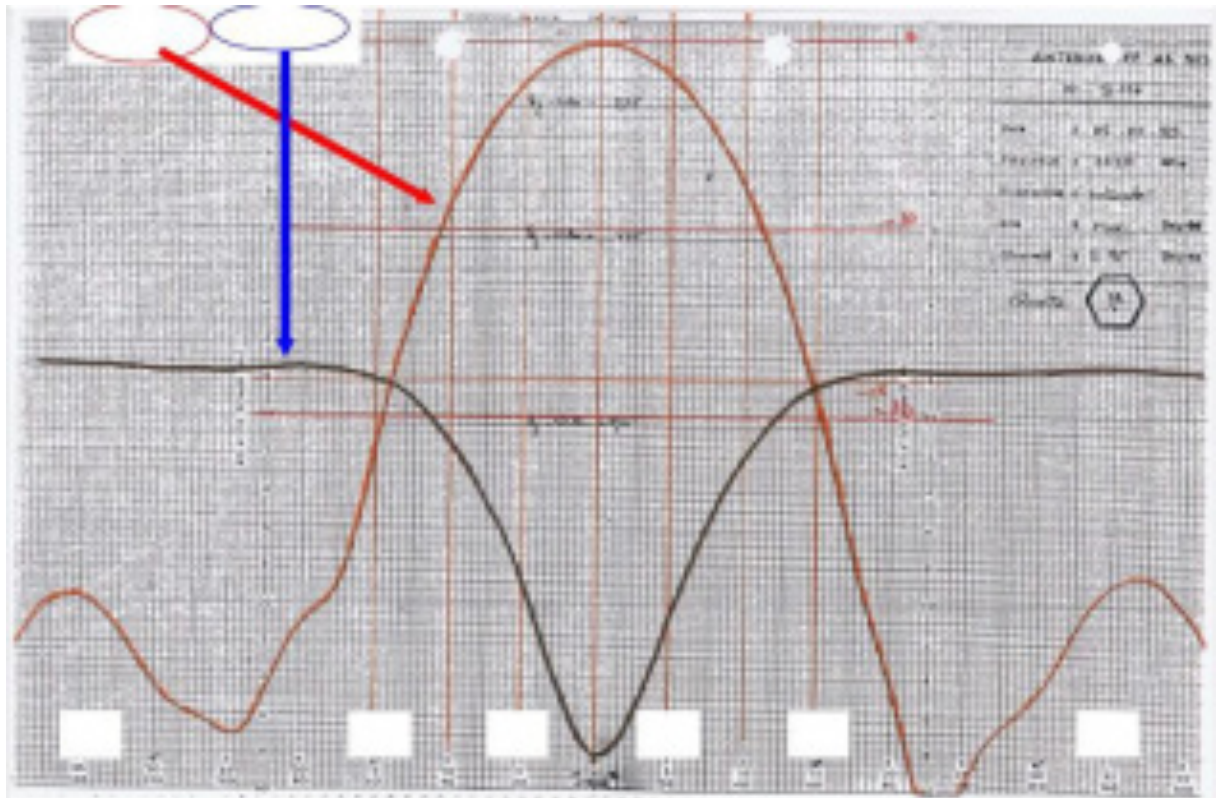


Figure 46: Diagrammes Ω et Σ autour de l'axe antenne

3.2.2.2 Élimination des réponses asynchrones

Rappel : Les réponses asynchrones ou fruit sont les réponses parvenant à un radar de la part d'une interrogation par un autre radar.

Ceci sera réalisé par la fonction "défruitage" d'un équipement logique situé après le récepteur radar qui sera appelé "extracteur".

Le Choix de la fréquence de récurrence :

L'idée est que deux radars proches n'aient pas la même fréquence de récurrence.

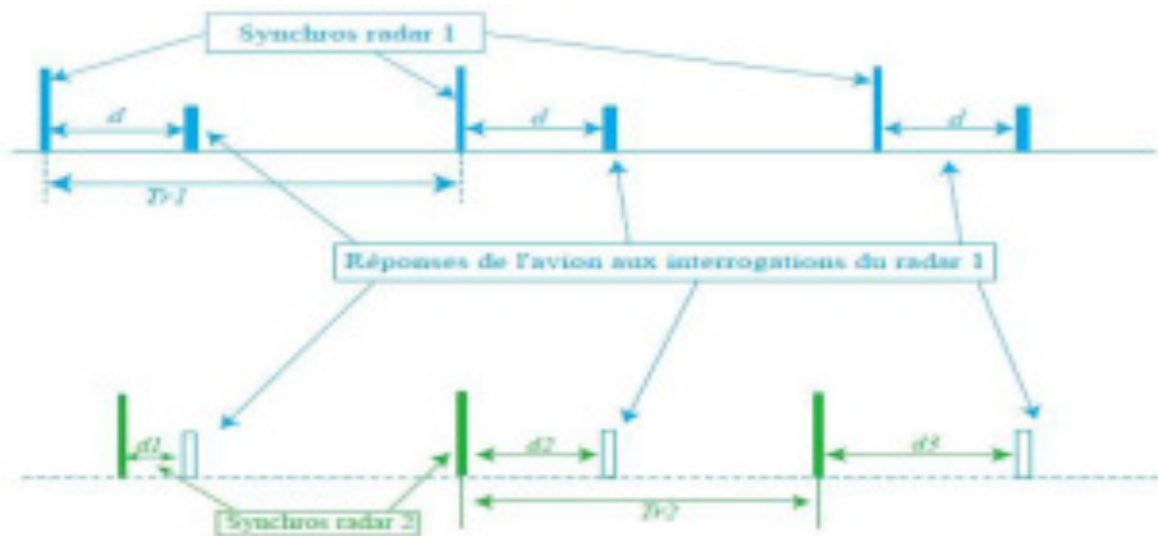


Figure 47:réponses asynchrones

Dans le schéma ci-dessus le radar 1 détecte l'avion à une distance d . Le radar 2 reçoit aussi cette même réponse. Mais sa synchro étant différente, la distance vue sera d_1 , d_2 , d_3 en tous cas différent lors de deux interrogations consécutives.

Il suffira d'analyser les réponses consécutives deux à deux et de rejeter celles qui seront différentes.

- **La Wobulation :**

L'intérêt est de s'affranchir d'une réponse à une récurrence précédente ou une interrogation autre mais qui s'avèrerait synchrone à notre radar. En wobulant de Δt on va briser ce synchronisme et se ramener au cas précédent.



Figure 48:principe de wobulation

Avec la wobulation, les signaux non-souhaités sont éliminés

Seuls les signaux synchrones sont gardés par le radar. C'est à dire ceux dont le temps- distance varie très peu entre deux mesures du même tour d'antenne.

En faisant varier la période de répétition, les réponses en seconde récurrence et le fruit sont rendus asynchrones et sont éliminés par le radar.

3.2.2.3 Le RSLs

De la même manière que l'ISLS permet d'interdire les réponses sur les secteurs angulaires qui ne nous intéressent pas. Le RSLs qui agit sur la réception va rejeter les trames en provenance de ces mêmes secteurs. On aura donc sur la voie Ω un récepteur identique à celui sur la voie Σ .

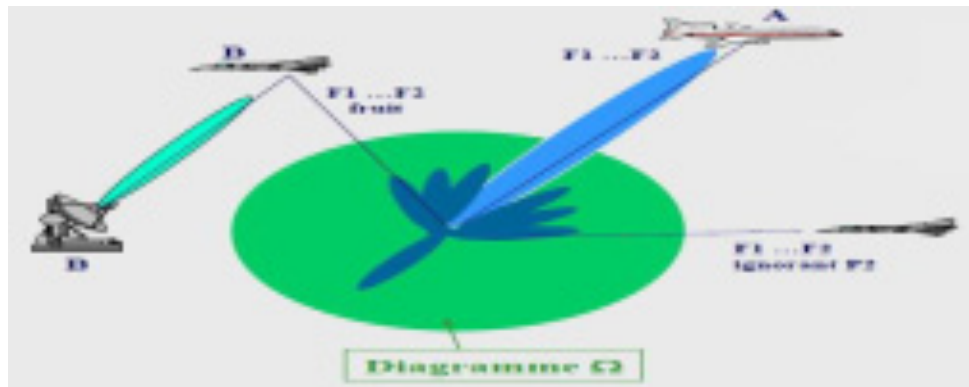


Figure 49:schéma de l'RSLs

Le FRUIT dans le lobe Σ en provenance d'une interrogation du radar A vers l'avion A ne pourra pas être éliminé par le récepteur du radar. Ce deviendra l'attribution de l'extracteur.

Le FRUIT sur lobe secondaire de l'avion B aux interrogations du radar B pourra être éliminé par le RSLs :

- Si $F1(\Omega) > F1(\Sigma)$ on élimine (par $F1$ on considère la trame complète)
- $F1(\Omega) < F1(\Sigma)$ on garde

3.2.2.4 Le RSLs Ajustable

Le fait de pouvoir jouer sur le gain des amplis des récepteurs sur Σ et Ω va

permettre d'optimiser le RSLs précédent.

Les trames reçues par le radar de la part de transpondeurs proches (réponses sur bord de lobe + fruit) se situent dans un secteur α_1 qui est trop large.

Ces trames ne seraient pas prises en compte par un radar monopulse.

En réception on va rajouter un Offset de X_{db} aux trames reçues sur Ω . On ne comparera plus comme précédemment $F1(\Sigma)$ à $F1(\Omega)$ mais $F1(\Sigma)$ à $F1(\Omega) + X_{db}$ avec

$$(0 \leq X \leq 10)$$

Si $F1(\Omega) + X_{db} > F1(\Sigma)$ donc on élimine

Si $F1(\Omega) + X_{db} < F1(\Sigma)$ donc on garde

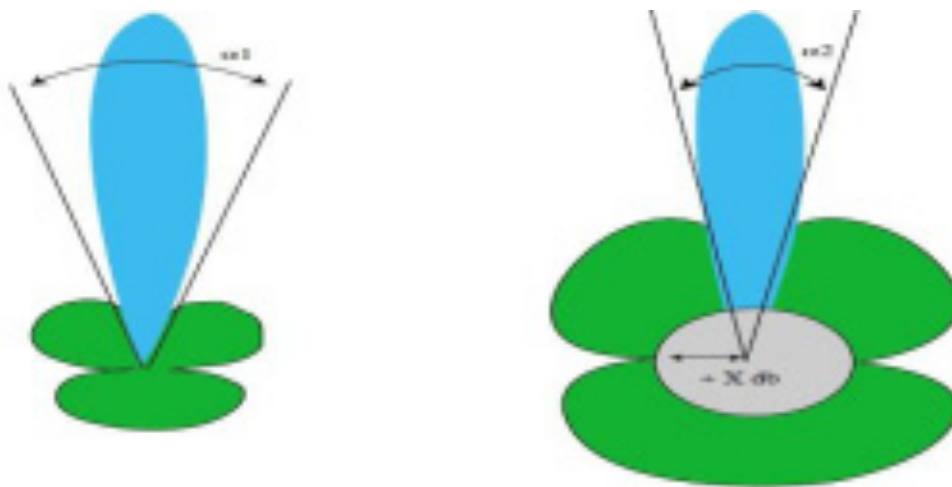


Figure 50: principe de l'RSLs ajustable

Avantage : Les réponses prises en compte se situent dans un secteur α_2 plus étroit que α_1 .

Moins de charge pour le calculateur.

Inconvénients : Un fruit peut masquer une vraie réponse d'autant plus que X est forte.

3.2.2.5 Les Lois EVT ou GVT

Gain variable avec le temps ou ébasage variable avec le temps.

Les signaux reçus sur les lobes secondaires, les réponses en seconde récurrence, les réflexions sur le sol et les petits réflecteurs constituent en général des signaux de faible amplitude, par rapport aux signaux utiles.

Une méthode pour les éliminer consiste à déterminer à partir de quel niveau on aurait un signal normal, sachant que le niveau baisse en fonction de la distance.

On applique donc un seuil de sensibilité variable dans le temps, lors du traitement des signaux issus du récepteur.

Plus les cibles sont proches, plus les signaux reviennent avec une amplitude élevée.

Le seuil décroît en $1/R^2$ pour les radars secondaires.

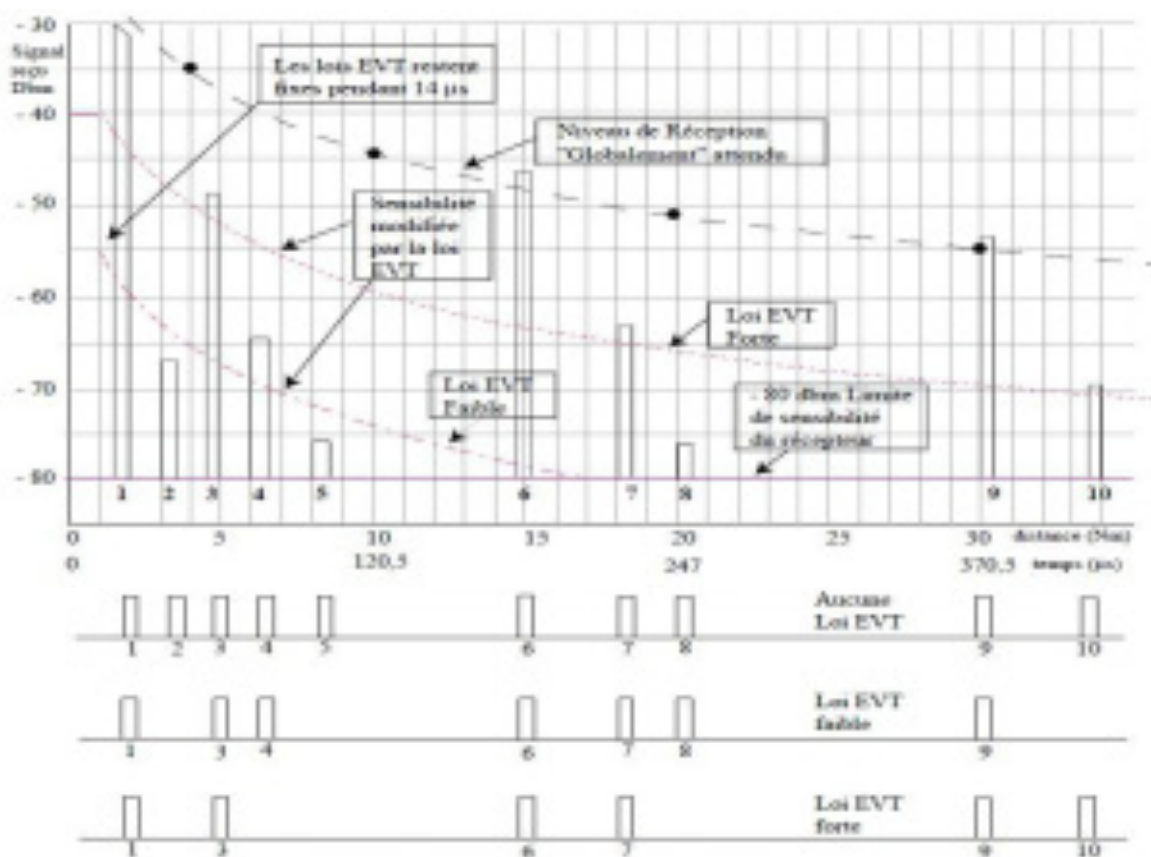


Figure 51: comparaison des lois evt

Suivant le numéro de la loi, le seuil à l'origine varie. Plus le numéro est élevé, plus le seuil est remonté, laissant passer moins de signaux et rendant la détection de certains transpondeurs plus difficile.

Par défaut, la loi 3 est programmée sur les radars.

En cas de problème de réflecteur dans un secteur, on peut utiliser une loi de numéro plus élevé, pour résoudre le problème. Dans ce cas, on utilise aussi la sectorisation, pour ne pas pénaliser les secteurs qui ne présentent pas de problème en dégradant leur détection

En principe, 16 lois sont définies. La loi 0 ne correspondant à aucun filtrage, autre que la sensibilité max du récepteur (environ -85 dBm pour le mode S, sur toute la portée).

Le seuil de traitement des signaux est calculé suivant la distance, de manière suivante :

$$P_{\min} = P_{\text{seuil-origine}} - 10 \text{ Log} (R / \text{distance palier constant})^2.$$

Soit pour la loi 3 :

$$P_{\min} = -53,13 - 20 \text{ Log} (R / 1,81 \text{ Nm})$$

L'influence de la loi EVT sera limitée par la sensibilité max du récepteur, pour les distances éloignées. C'est-à-dire quand P_{\min} passera sous -85 dBm environ.

Remarque sur l'influence de la loi EVT sur le cône mort :

Avec une loi différente de 0, pour un transpondeur se situant à une distance supérieure à celle du palier constant (1,81 Nm en loi 3) et inférieure à la fin d'influence de la loi EVT, l'angle de site du cône mort reste constant.

3.2.2.6 *L'IISLS*

(Improved ISLS) : Dans certains cas, il arrive que l'ISLS, les lois EVT et la poursuite radar n'arrivent pas à éliminer les plots créés par des réflecteurs importants, d'où le besoin de l'IISLS, une bonne solution (mais pas parfaite) pour s'affranchir des réflecteurs forts.

Les réponses issues de réflexions sur des obstacles gênants (structures métalliques planes, hangars d'avions) peuvent être d'une amplitude telle qu'il est quasi impossible de les distinguer de vraies réponses. Certains transpondeurs peuvent être moins puissants ou leur antenne être masquée.

On va chercher une astuce pour empêcher le transpondeur de répondre.

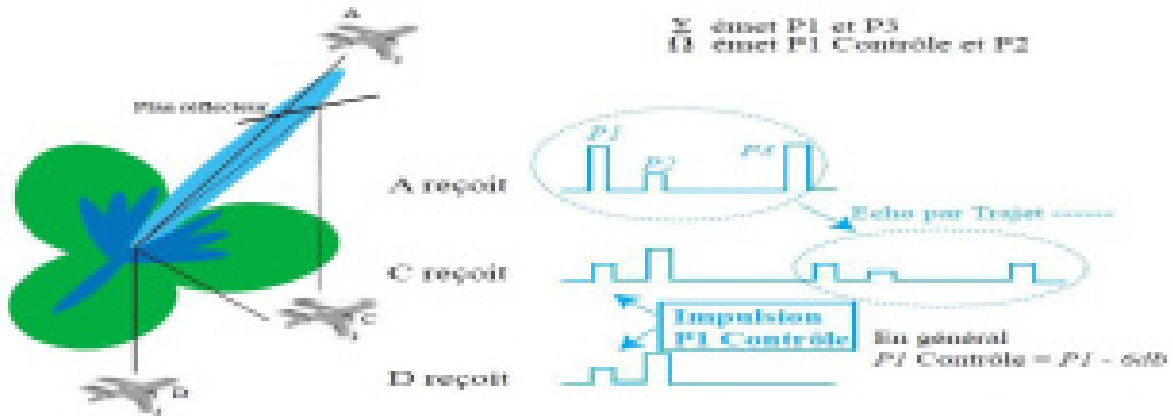


Figure 52:Principe d'IISLS

L'avion C reçoit le tandem d'impulsions P1 Contrôle - P2 émis par Ω qui va bloquer son transpondeur pendant $35\mu s$. Ceci devrait permettre de laisser passer l'écho de l'interrogation sur Σ Pour être certain que dans tous les cas possibles

$$P1 \text{ Contrôle} < P2. \text{ On prendra } P1 \text{ Contrôle} = P1 - 6db$$

✚ Avantage:

On empêche le transpondeur de répondre. On n'a pas à se soucier des caractéristiques de l'obstacle.

✚ Inconvénients :

- L'avion D qui est là par hasard va lui aussi recevoir le tandem d'impulsions P1 Contrôle - P2 qui va à lui-aussi lui bloquer son transpondeur pendant $35\mu s$. Ceci s'avère pénalisant s'il est à cet instant interrogé par un autre radar.
- Ceci est inactif si le trajet (aller/retour) : radar \Rightarrow réflecteur \Rightarrow transpondeur est supérieur de plus de $35\mu s$ ($\approx 3Nm$) au trajet (aller/retour) : radar \Rightarrow transpondeur

3.2.2.7 La Sectorisation

Correspond à un paramétrage du radar. L'azimut est divisé en secteurs élémentaires pouvant être paramétrés différemment. Pour certains radars, chaque secteur fait 1° . Dans ce cas par exemple on ajuste les lois GVT et l'IISLS pour s'affranchir de réflecteurs parasites.

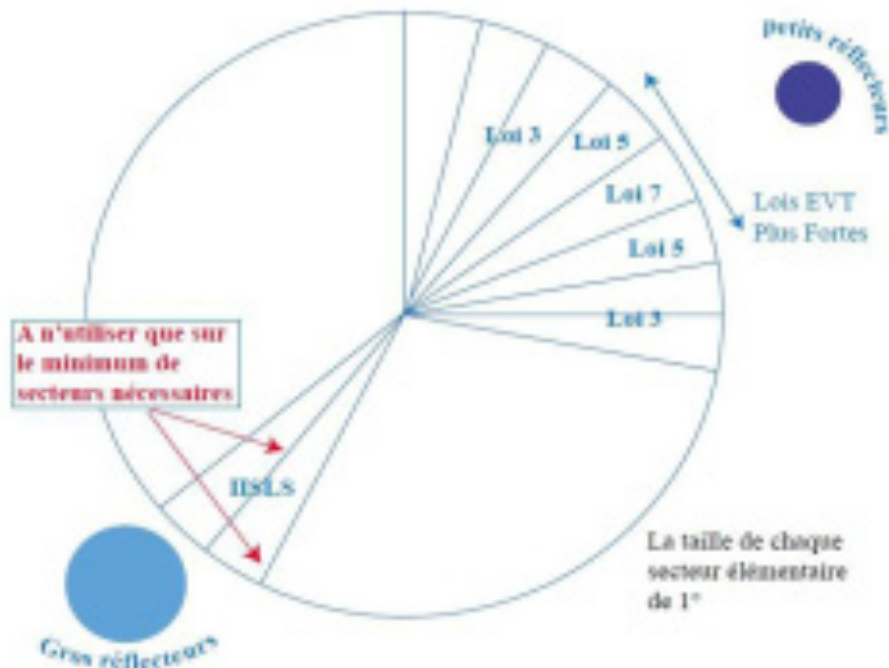


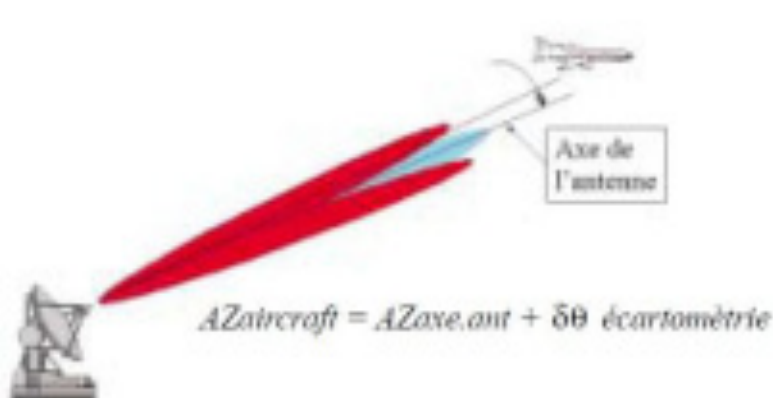
Figure 53:Principe de la sectorisation

3.3 LE RADAR SECONDAIRE MONO-IMPULSION

3.3.1 LE PRINCIPE DU MONOPULSE

3.3.1.1 Le principe du monopulse

Au diagramme Σ précédent ; on adjoint un diagramme d'antenne Δ dont la particularité est d'avoir un zéro de réception dans l'axe de l'antenne, et une pente raide de part et d'autre.



$$AZ_{aircraft} = AZ_{axe.ant} + \delta\theta \text{ écartométrie}$$

La technique mono-impulsion calcule le dépointage entre l'axe de l'antenne et la position réelle de l'avion. C'est la mesure d'écartométrie.

Le dépointage θ appelé "écartométrie" sera fonction du rapport :

$$\frac{\text{mesure sur } \Delta}{\text{mesure sur } \Sigma}$$

Figure 54:La technique d'écartométrie

Ce rapport sera signé :

Le signal issu de l'un des deux lobes $\Delta+$ est en phase avec le signal issu de Σ ;

Le signal issu de l'autre : $\Delta-$ est en opposition de phase avec le signal issu de Σ

La limite de prise en compte des mesures sera lorsque $\Sigma = \Delta$; ceci correspond par géométrie d'antenne à $\theta = \pm 1,2^\circ$. Si $\Delta > \Sigma$ on dira que l'écartométrie est saturée

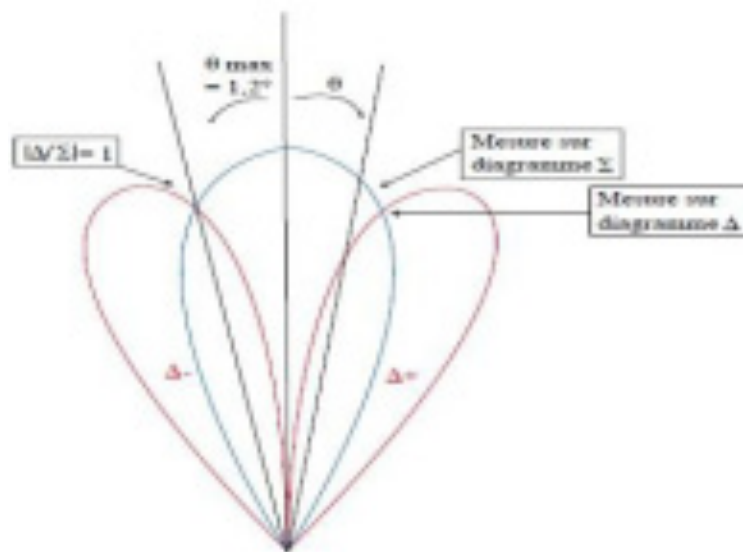


Figure 55:schéma des lobes somme et delta

La mesure d'Azimut peut se faire sur chaque impulsion du code d'où le nom de radar monopulse.

θ_{lim} (limite) correspond à la mesure extrême de dépointage pour lequel l'équipement a été conçu :

1,4° de part et d'autre de l'axe (2,8° au total).

Cet angle n'a pas de nom particulier θ_{min} (Minimum) correspond à l'incrément de mesure d'écartométrie. L'écartométrie est codée sur 7 bits (6 + bit de signe)

$$\theta_{min} = \theta_{lim} / 128 = 0,022^\circ$$

On remarque que par cohérence l'incrément d'écartométrie a la même valeur que le ϵ du codeur d'antenne : 0,022°.

θ_{\max} (Maximum) correspond à la mesure maximum utile pour le MSSR : $1,2^\circ$ de part et d'autre de l'axe ($2,4^\circ$ au total).

Cette valeur correspond à $\Sigma = \Delta$ mais aussi à la coupure à 3 db du diagramme Σ .

3.3.2 LE SIGNAL REÇU EN MONOPULSE

3.3.2.1 Les trames en monopulse

Les séquences d'interrogation du radar et les réponses du transpondeur seront identiques en monopulse (MSSR) qu'en secondaire (SSR). Seule la réception change avec l'apparition des antennes réseaux et le traitement de l'information Δ .

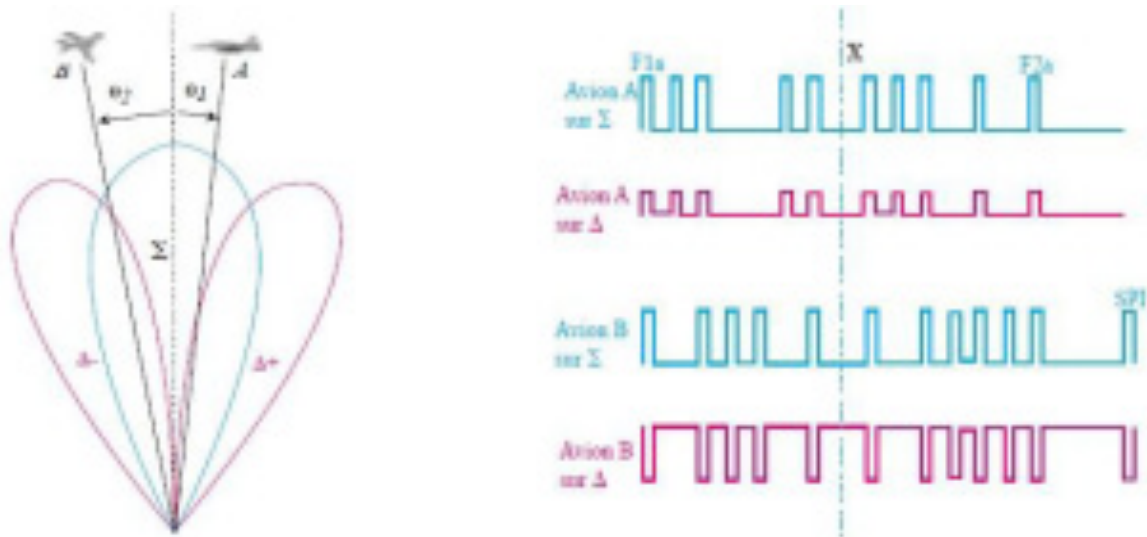


Figure 56: signaux reçus par la station radar

- L'avion A est positionné dans le lobe de Δ dont les signaux issus sont en phase avec ceux de Σ . Son écartométrie Δ/Σ sera dite positive.
- L'avion B est positionné dans le lobe de Δ dont les signaux issus sont en opposition de phase avec ceux de Σ . Son écartométrie Δ/Σ sera dite négative.
- On remarquera aussi que Δ/Σ augmente plus on s'éloigne de l'axe de l'antenne.

3.3.2.2 Le Garbling en monopulse

En SSR, on rejetait à peu près systématiquement les réponses dans toute situation de garbling. Il était peu fiable de faire l'analyse des différences de niveau et de position entre chacune des impulsions. (La technologie ancienne ne le permettait pas). Les deux avions étant proches, on ne peut pas attendre de grande différence de niveaux entre les réponses.

En MSSR, c'est différent : la technologie aidant bien, on chiffrera pour chacune des impulsions reçue les valeurs : $\log \Sigma$, $\log \Delta$ et surtout Δ / Σ . Ceci doit permettre par comparaisons aux valeurs extrêmes (F1 et F2) de reconnaître à quelle réponse associer l'impulsion.

Par principe si dans deux trames garblés, 2 impulsions ne le sont pas. C'est :

- La Première et ce sera F1 de la réponse d'un avion. Ce sera la fin de trame qui sera garblée. On dit que l'on a un cas de "garbling arrière" .
- La Dernière (Sauf SPI) et ce sera F2 de la réponse de l'autre avion. Ce sera le début de trame qui sera garblé. On dit que l'on a un cas de "garbling avant" .

3.3.3 L'ANTENNE MONOPULSE

3.3.3.1 Principe de l'antenne

C'est une antenne réseau constituée d'un alignement de $(35 + 1)$ éléments rayonnants ou sources élémentaires. Les diagrammes Σ , Δ et Ω correspondent à trois combinaisons différentes de ces éléments. Ce qui est le plus caractéristique d'une antenne monopulse est leur organisation pour générer les diagrammes Σ et Δ .

L'association de sources qui permet de générer le diagramme Δ peut se décomposer en deux sous-ensembles identiques de part et d'autre de l'axe que l'on baptise $\Delta+$ et $\Delta-$. Pour obtenir Δ , on les rajoute ensemble après inversion de phase de $\Delta-$

$$\Delta = (\Delta+) - (\Delta-)$$

On va résumer les associations d'éléments Σ , $\Delta+$, $\Delta-$ en un point appelé "Centre de Phase" qui simule le point 0 de l'origine du rayonnement. Dans le cas d'une parabole ce point est facile à déterminer. Il s'agit du foyer.

Le plus important est la distance d entre : (Δ^+, Σ) et (Δ^-, Σ)

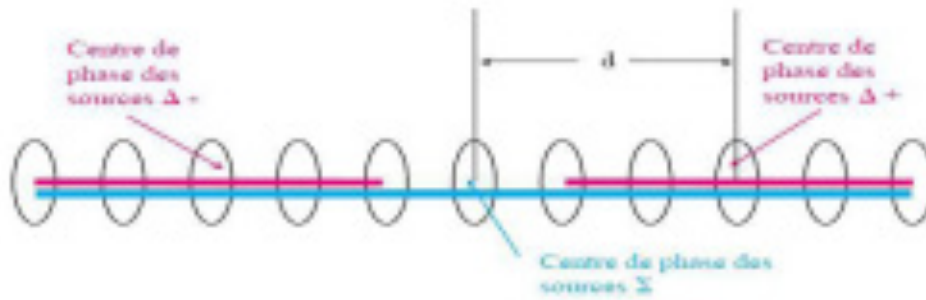


Figure 57: centre de phase

3.3.3.2 L'avion dans l'axe

Le signal arrive avec la même phase en $d\Delta^+$ et $d\Delta^- \implies E\Delta^+ = E\Delta^-$

$$E\Delta = (E\Delta^+) - (E\Delta^-) = 0$$

3.3.3.3 L'avion à droite de l'axe

En considérant que $d\Sigma, d\Delta^+, d\Delta^- \approx n d$

- le signal $E\Delta^+$ en Δ^+ est en avance de phase $\theta = (2\pi d/\lambda) \cdot \sin\alpha$ par rapport à $E\Sigma$ en Σ
- le signal $E\Delta^-$ en Δ^- est en retard de phase de $\theta = (2\pi d/\lambda) \cdot \sin\alpha$ par rapport à $E\Sigma$ en Σ

Pour ramener Σ en phase avec Δ , il suffit de multiplier par $-j$.

En rappelant que $E\Delta = (E\Delta^+) - (E\Delta^-) = 0$

Figure 58: écartométrie si l'avion est à droite de l'axe

3.3.3.4 L'avion à gauche de l'axe

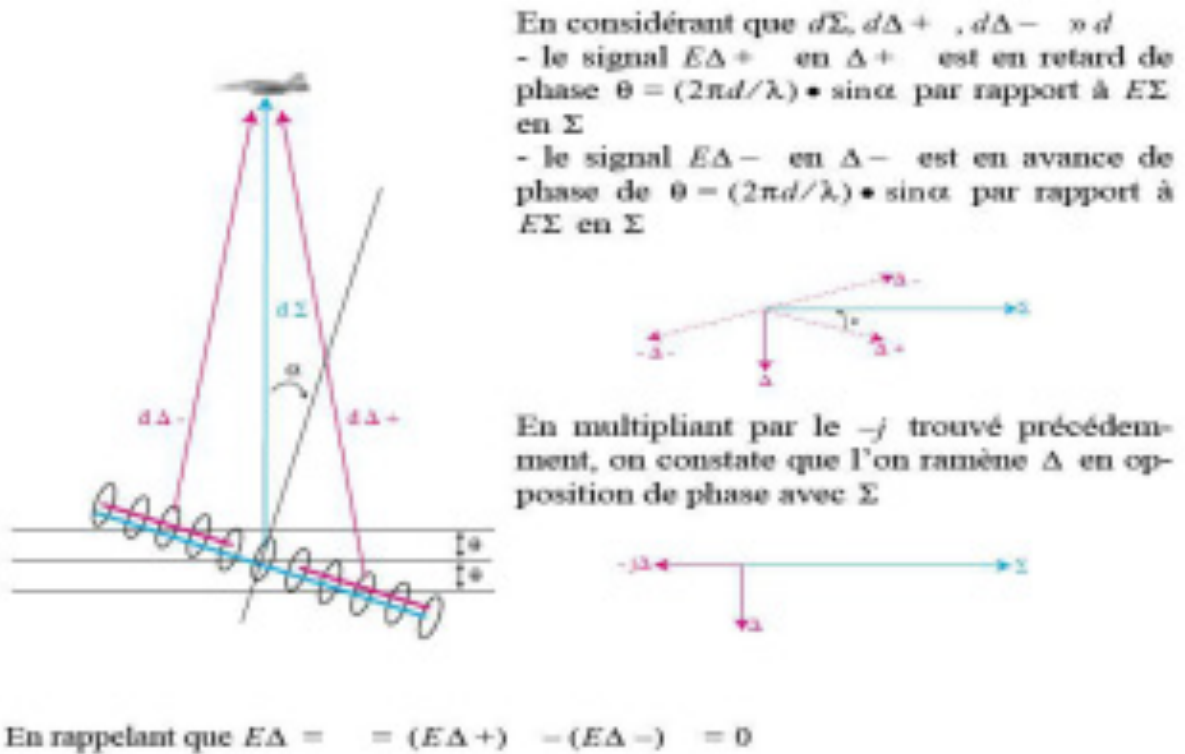


Figure 59:l'avion à gauche de l'axe

3.3.3.5 Principe de la distribution de l'antenne

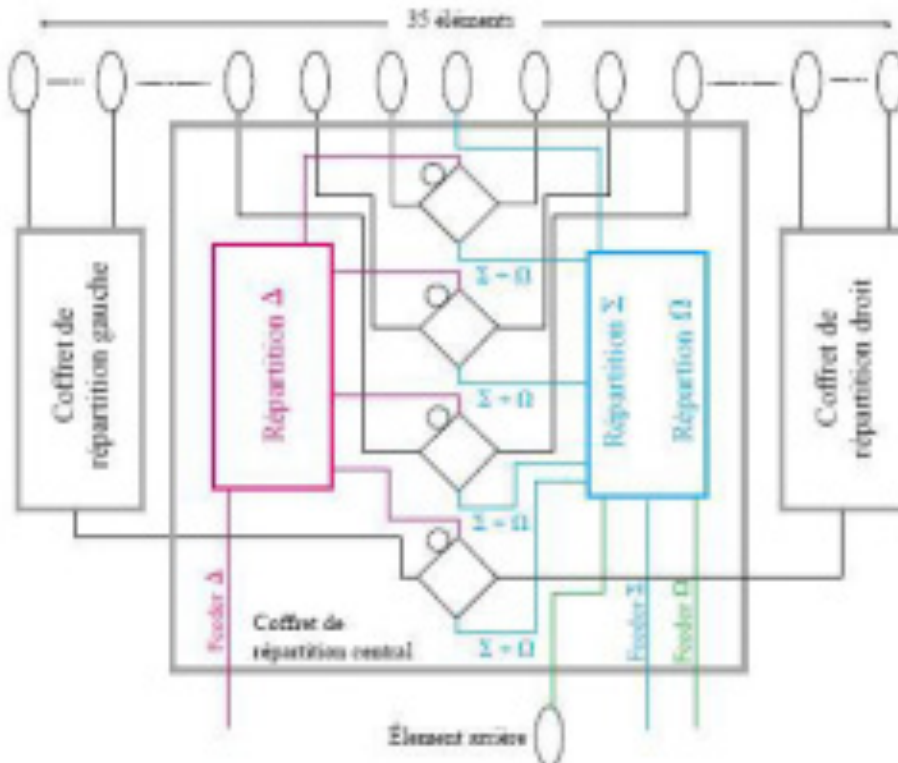


Figure 60:schéma de distribution d'antenne

3.4 Le radar secondaire Mode S :

3.4.1 Les limites du SSR

Risque de garbling et de fruit dû à:

- ✚ Un trop grand nombre d'aéronefs
- ✚ Un trop grand nombre de radars (Surtout dans certaines zones frontières), qui induisent beaucoup de réponses.

Possibilité de non-réponse due à la grande portée (et pas toujours utile) des radars qui va obliger à répondre puis bloquer le transpondeur (jusqu'à 125 μ s)

Le nombre de 4096 modes A possibles devient insuffisant dans des zones à fort trafic.

A chaque plan de vol, est attribué un code A.

Le codage du mode C ne permet de définir le niveau de vol que tous les 100 pieds.

Capacité de traitement de la station limité à 500 avions par tour d'antenne.

3.4.2 Les Objectifs du mode S

- S'affranchir des limitations de la technique SSR :

- ✚ Garbling
- ✚ Pénurie de codes A
- ✚ Capacités de traitement

- Rester compatible avec les modes A/C des Radars Secondaires

- ✚ Un radar mode S peut dialoguer avec un transpondeur non-mode S
- ✚ Un transpondeur mode S peut en faire autant avec une station non-mode S

3.4.3 Les mécanismes d'interrogation du radar mode S

Il contient toutes les fonctions du radar SSR classique. Il permet également une interrogation sélective des cibles grâce à l'utilisation des adresses uniques des aéronefs codées sur 24 bits. Ainsi qu'une liaison de données bidirectionnelle permettant l'échange des données Air/Sol et Sol/Air.

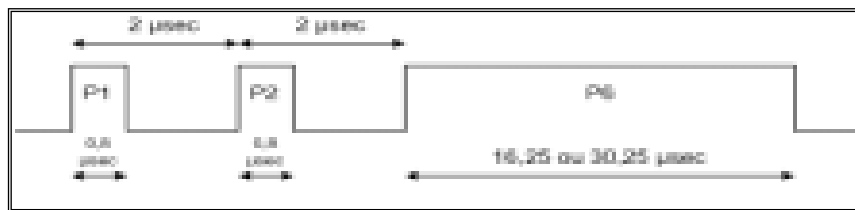


Figure 61: structure de l'interrogation mode S

Le Radar Mode S est un système de Surveillance enrichie qui possède les caractéristiques suivantes :

- La capacité d'utiliser un adressage sélectif pour chaque avion d'où la résolution des problèmes de chevauchements de réponses qui peuvent se produire dans les régions à forte densité de trafic.
- Le codage de données d'altitude à pas de 25 pieds améliore l'aptitude des systèmes au sol à surveiller et à prévoir le mouvement des aéronefs dans le plan vertical.
- Le potentiel de liaison de données permet également au système au sol d'acquérir automatiquement certaines données à bord qui améliorent la poursuite des aéronefs.

Le Mode S a été développé de manière à permettre une transition "douce", et il existe donc une compatibilité entre les modes. C'est à dire qu'une station Mode S peut traiter les transpondeurs classiques, et une station classique peut interroger les transpondeurs Mode S (qui répondent alors en modes classiques).

Le radar mode S utilise deux types d'interrogation :

- L'appel général « All Call »
- Les appels sélectifs « Roll Call »

L'appel général All Call

L'appel général est envoyé vers tous les aéronefs en même temps. Il sert à deux choses :

- Prendre connaissance des transpondeurs mode S entrant dans la couverture du radar :
 - Calcul de la position en distance azimut
 - Demande de l'adresse mode S
- Faire la surveillance (élémentaire) des transpondeurs non-mode S :
 - Calcul de la position en distance azimut
 - Demande du mode A ou du mode C

L'appel sélectif Roll Call

L'appel sélectif est envoyé vers un seul aéronef équipé mode S, à la fois. L'aéronef est sélectionné grâce à son adresse mode S.

L'appel sélectif sert à :

- Dans le cas de la surveillance élémentaire :
 - Calculer la position en distance et azimut
 - Demander le code A ou C
- Dans le cas de la surveillance enrichie :
 - Calculer la position en distance et azimut
 - Demander le code A ou C
 - Demander une BDS(Binary Data Store)

3.4.3.1 *Agencement des appels généraux et sélectifs*

Le but du mode S est de pouvoir interroger sélectivement chaque aéronef équipé.

Pour interroger sélectivement un transpondeur, le radar doit connaître :

- sa position supposée en distance et azimut
- son adresse mode S

Si le transpondeur a déjà été interrogé lors des tours précédant d'antenne, on peut calculer sa position au prochain tour et on connaît son adresse.

Dans le cas où le transpondeur entre juste dans la couverture, on ne sait pas où le situer et quelle est son adresse. On ne peut donc pas l'interroger sélectivement, sans passer par une étape préliminaire. On le situe et prend connaissance de son adresse, grâce à l'appel général « All Call ».

Une fois le transpondeur connu par le radar, il peut être interrogé en Roll Call. Ensuite, l'idéal est que ce transpondeur ne réponde qu'aux appels sélectifs et non aux appels généraux, afin de réduire sa charge.

3.4.3.2 *Le verrouillage (lockout)*

On cherche à diminuer la charge du transpondeur.

Une fois le transpondeur connu du radar, il n'est plus nécessaire de l'interroger en All Call.

- Verrouillage :

Un ordre de verrouillage est envoyé dans les interrogations Roll Call destinées au transpondeur. L'ordre de verrouillage est rattaché au code identificateur SI ou II du radar qui l'a envoyé. Ainsi, le transpondeur ne répondra, à un radar ayant ce code, qu'en Roll Call.

- Nombre d'interrogations par tour d'antenne :

L'utilisation de la technique monopulse, l'identification formelle des réponses et la correction des erreurs sur les trames, permettent de traiter un avion à l'aide d'une seule réponse par tour d'antenne, en Roll Call et surveillance élémentaire.

En All Call, plus d'interrogations sont nécessaires, du fait que l'on ai à traiter les transpondeurs non-mode S. Ces derniers nécessitent au moins 4 réponses.

Ceci permet de se prémunir au maximum des problèmes de sur-interrogation et de fruit.

3.4.4 Les interrogations

3.4.4.1 Les interrogations ALL-CALL

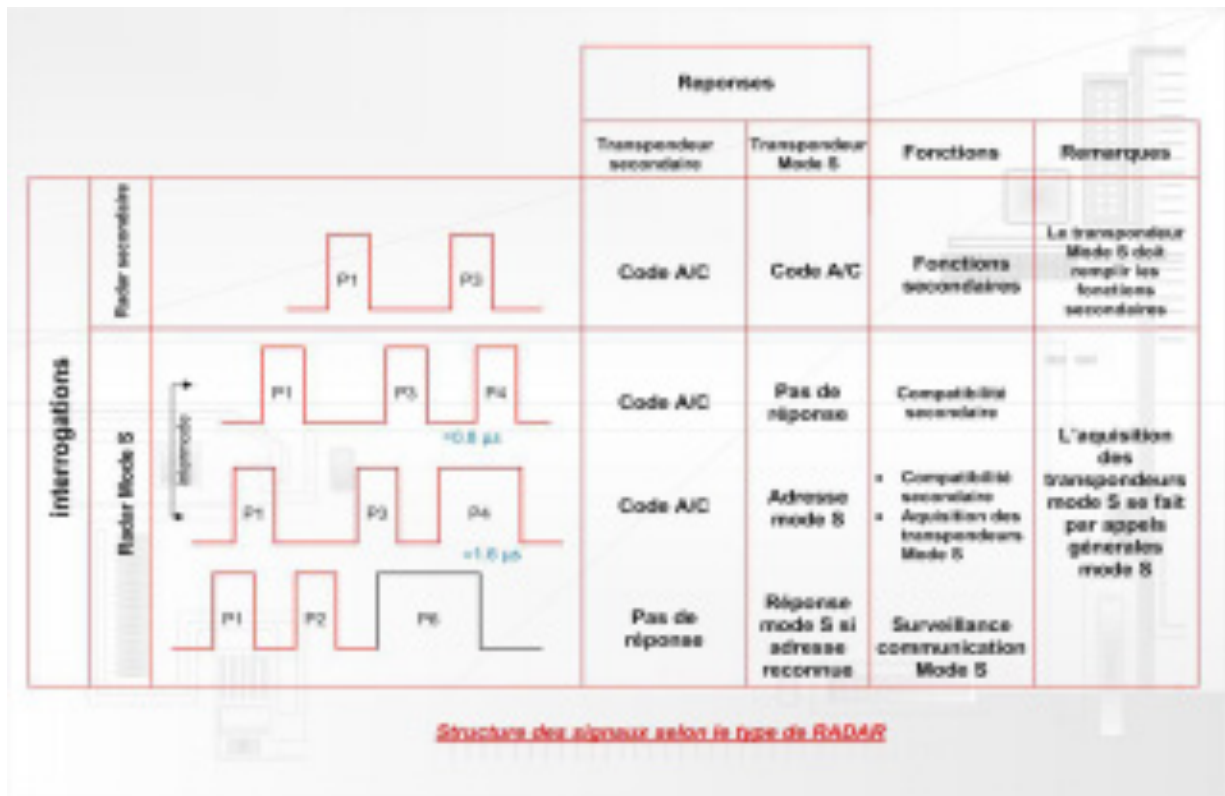


Figure 62:structure des signaux selon le type du radar secondaire

3.4.4.2 Les interrogations ROLL-CALL

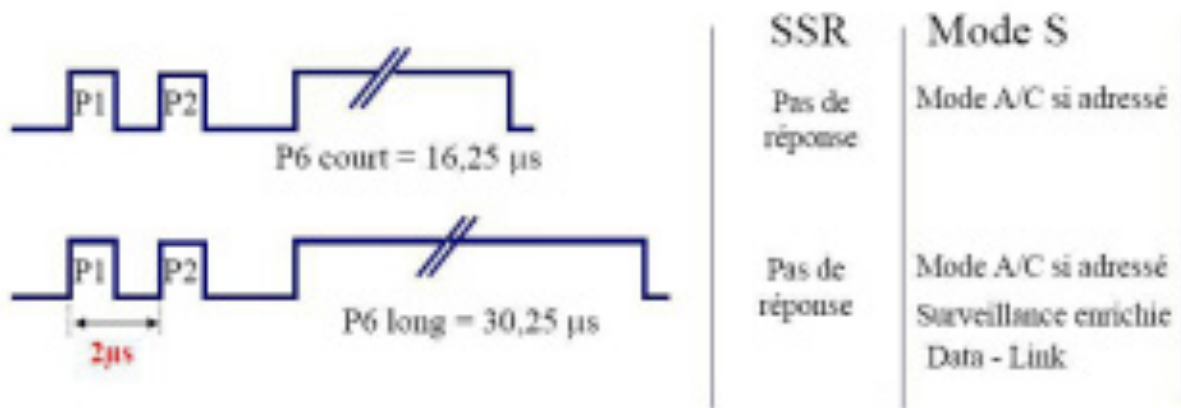


Figure 63:interrogation roll-call

Pendant les périodes Roll Call, on peut faire de la surveillance élémentaire, enrichie ou échanger des données (data-Link).

Le transpondeur mode S est utilisé par d'autres systèmes que le radar. C'est le cas de l'ADS et du TCAS. Les échanges de données, utilisées par ces systèmes, ressemblent à ceux du radar.

On a donc défini des formats en relation avec l'application qui les utilise et le type d'échange de données.

Les interrogations sont appelées des UF (Up Format). Elles sont toujours modulées sur 1030 MHz

Les réponses sont des DF (Down Format). Elles sont toujours modulées sur 1090 MHz.

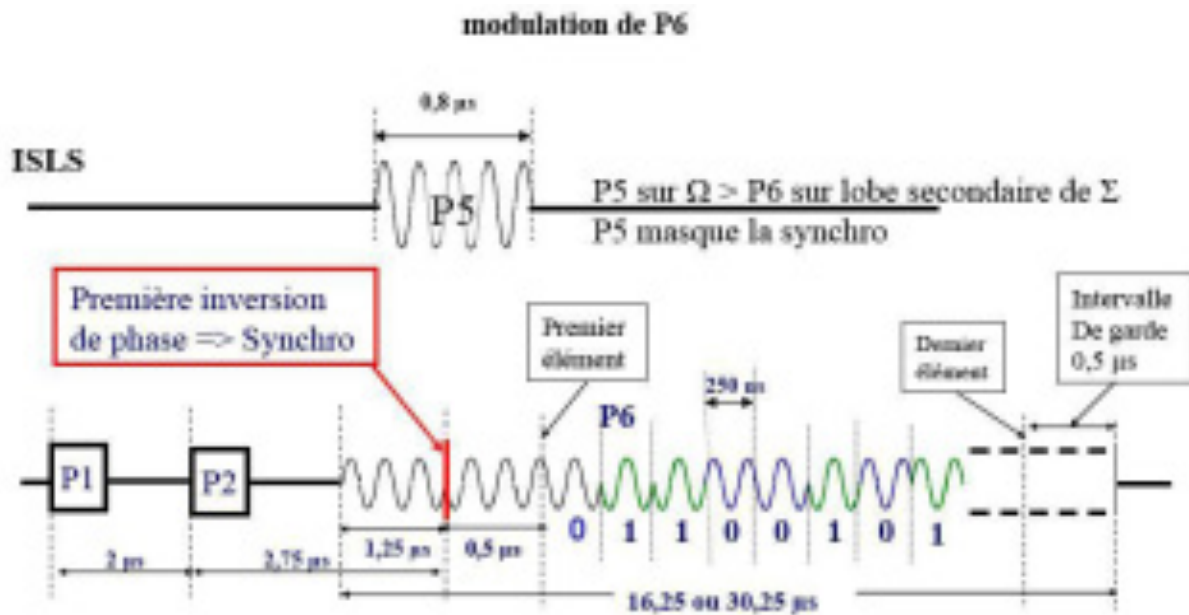


Figure 64: structure de modulation de P6

Signal HF : Fréquence interrogateurs $1030 \text{ Mhz} \pm 10 \text{ Khz}$

Le principe de la modulation DPSK est d'inverser ou non le signal HF chaque Δt

1 => Inversion du signal HF

0 => Non-Inversion du signal HF

3.4.5 Réponse Mode S :

Fréquence transpondeurs : $1090 \text{ Mhz} \pm 3 \text{ Mhz}$

La PPM est une modulation d'amplitude dans laquelle on change de niveau émission au milieu du bit:

1 => Haut première moitié du bit Bas Deuxième moitié

0 => Bas première moitié du bit Haut Deuxième moitié



Figure 65: structure de réponse mode s

Le temps de retard du transpondeur doit être de 128 μs à compter de la Première inversion de phase synchro

Après la fin de la réponse le transpondeur devra être capable de répondre à une autre interrogation après 125 μs

3.4.6 Fréquence de répétition et durées :

3.4.6.1 Périodes All Call

La durée de ces périodes dépend de la portée du radar et de la fréquence de répétition souhaitées. La fréquence de répétition dépendant elle-même de la vitesse de rotation de l'antenne et du nombre de coup au but souhaité. Cela s'apparente aux périodes d'interrogation mode A et mode C des radars non-mode S. Toutes les périodes All Call ont la même durée.

3.4.6.2 Périodes Roll Call

Lors de celles-ci, le radar interroge individuellement chaque avion situé dans le lobe principal de l'antenne. Pour un bon fonctionnement, la durée du Roll Call doit être d'au moins 1,8 fois la durée d'un Roll Call. Toutes les périodes Roll Call du schéma d'interrogation ont la même durée.

Fréquence de répétition (IRF Interrogation Repetition Frequency)

La fréquence de répétition correspond au nombre de All Call par seconde. Seules les périodes All Call contiennent un nombre d'interrogation constant, c'est à dire une.

IRF = nombre de All Call / durée totale du schéma d'interrogation

Exemple de calcul de la durée de la période All Call, en partant de l'IRF :

En partant du nombre de périodes All Call souhaité dans le lobe principal (au minimum 4 : 2 mode A et 2 mode C), en fonction de la vitesse de rotation de l'antenne, on calcule l'IRF à appliquer.

De là, on peut retrouver la durée des périodes All Call, en prenant la durée du Roll Call égale à 1,8 durée du All Call et en connaissant le schéma d'interrogation à appliquer.

Dans ce cas on a :

$$\text{IRF} = \text{nombre de All Call} / \text{durée All Call} \times (\text{nombre de All Call} + 1,8 \times \text{nombre de Roll Call})$$

D'où :

$$\text{Durée All Call} = \text{nombre de All Call} / \text{IRF} \times (\text{nombre de All Call} + 1,8 \times \text{nombre de Roll Call})$$

3.4.7 Problèmes liés au verrouillage et solutions :

Si on utilise que le code II pour identifier les stations, on arrive rapidement à des problèmes.

On ne dispose que de 15 codes II.

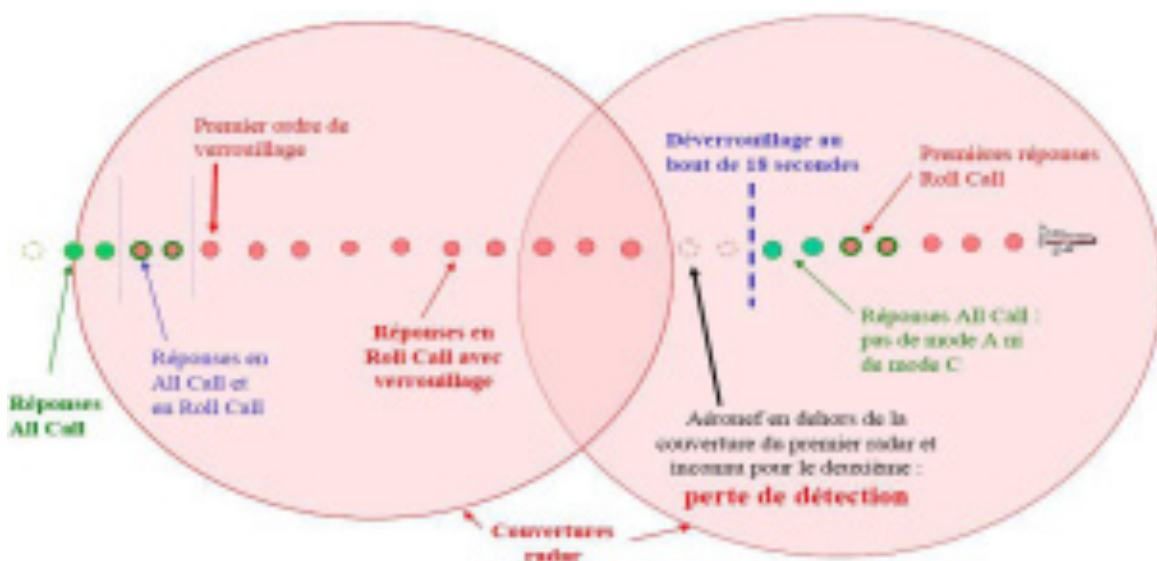


Figure 66: exemple de perte de détection

Pour résoudre ce problème on utilise plusieurs solutions dont « **lockout override** »

3.4.7.1 *Lockout override* :

On identifie le secteur à problème.

On force les transpondeurs, situés dans ce secteur, à répondre en All Call malgré le verrouillage.

Il est recommandé d'utiliser le « lockout override » avec une probabilité de réponse inférieure à 1.

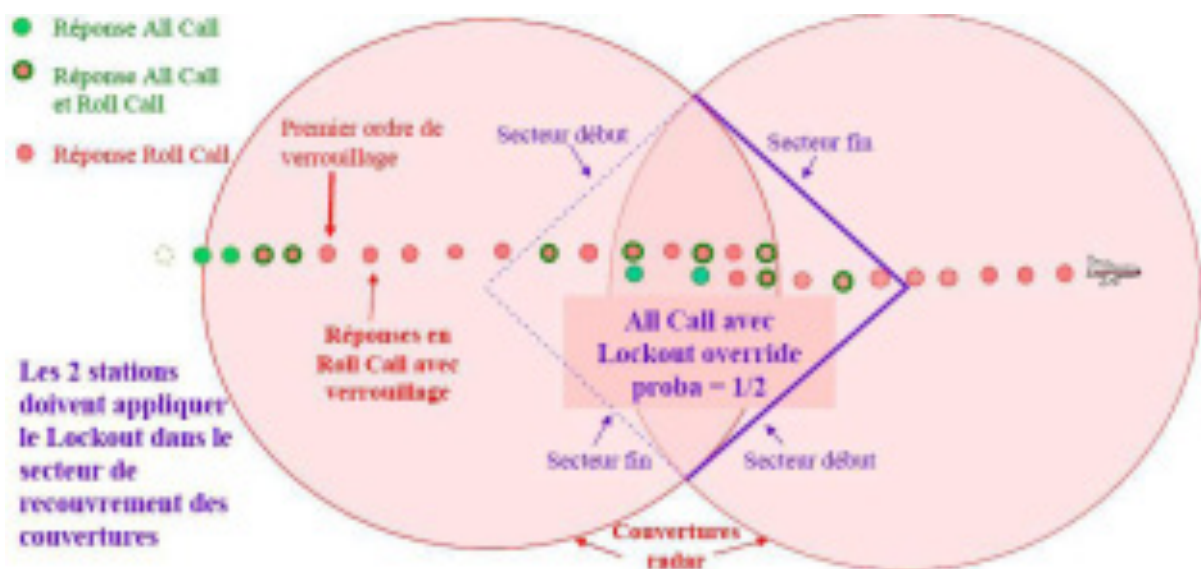


Figure 67: la solution lockout override

Il est aussi appelé « Disregard Lockout ».

Inconvénients de la formule

Le fait, d'obliger un transpondeur verrouillé à répondre en All-Call, annule l'intérêt du Mode S pour limiter le FRUIT et le GARBLING.

Pour limiter ces inconvénients, sont prévus deux procédés :

La sectorisation

On paramètre le **Disregard Lockout** uniquement sur les secteurs angulaires à problèmes (Comme l'IISLS en radar secondaire)

La probabilité de réponse

On demande au transpondeur de répondre aléatoirement 1 fois sur 2, 1 fois sur 4, ... jusqu'à 1 fois sur 16, ce qui diminue le nombre de réponses transpondeur.

Aussi bien on utilise La solution du « **Cluster** »

3.4.7.2 Cluster

On interconnecte les stations. La première station, qui a acquis le transpondeur, envoie son pistage à la suivante. Cela évite à cette dernière d'avoir à passer par la phase acquisition, connaissant déjà les caractéristiques du transpondeur, et lui permet de l'interroger directement en Roll Call.

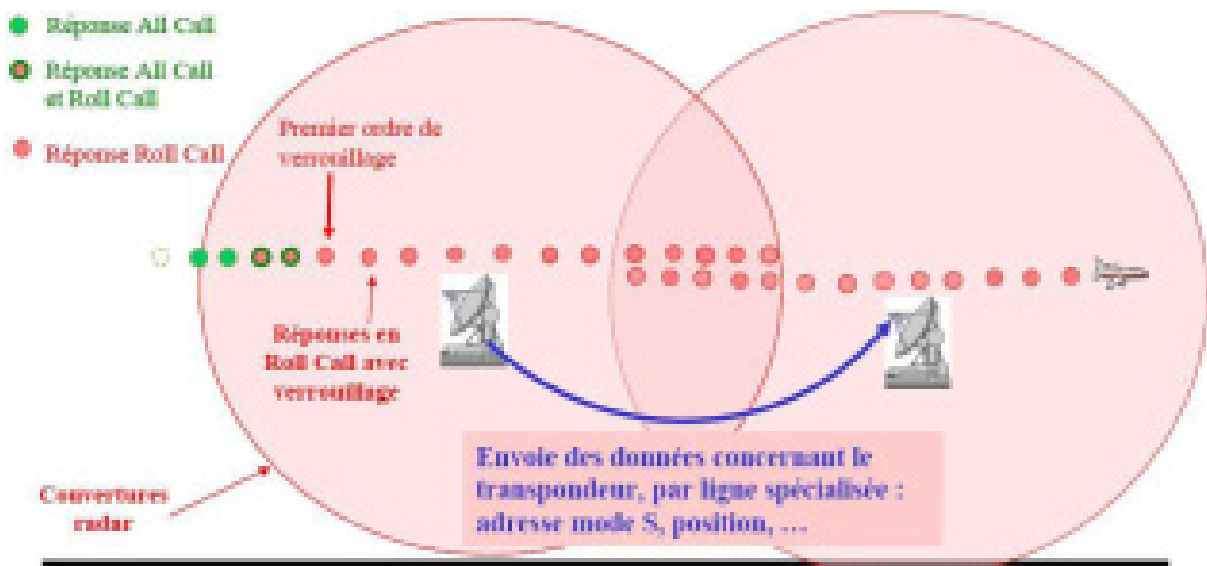


Figure 68: La solution Cluster en mode S

✚ Les 2 radars vont se transmettre toutes les informations utiles, on trouvera:

Adresse Mode S , Mode A, Mode C, position et fenêtre de réponse, etc...

- ✚ Chacun des radars devra connaître les caractéristiques de portée et de couverture de son voisin, afin de transmettre ces informations à l'instant adéquat. Généralement ce sera juste à l'instant où l'avion rentre dans la couverture du radar adjacent pour éviter la phase de verrouillage et les interrogations-réponses All-Call
- ✚ Bien que ce ne soit pas un impératif, ce dispositif s'applique parfaitement pour faire partager à plusieurs radars (jusqu'à 6) un même code **II**.

Avantages

- On a besoin de moins de codes II pour couvrir une grande zone.
- Il n'y a pas de situation de non-détection par l'un des radars.
- Il n'y a pas de réponse all-Call au changement de couverture.

Inconvénients

- On peut être sujet à une rupture de liaison entre les deux radars.
- La mise en œuvre de l'ensemble est plutôt lourde et complexe.

3.4.7.3 Les codes SI (Surveillance Identifier)

- Les codes SI ont été créés pour palier au nombre insuffisant de codes II. Ils sont 63 au lieu de 15. Ceci dans le but d'éviter les modes de fonctionnement non parfaits précédents type lockout override ou difficiles à mettre en œuvre type clusters.
- Le code SI est codé sur 6 bits, mais nécessite 3 bits supplémentaires (7 bits au lieu de 4 pour les codes II) pour être transmis dans les messages mode S. Le code SI semble un bon compromis, à condition de ne pas vouloir utiliser tous les services du mode S.

Conclusion

Dans ce document, nous avons pu étudier brièvement les principaux outils de surveillances utilisés dans l'aéronautique civile. D'autres systèmes existent et mériteront quelques explications dans des développements futurs. La visualisation appartient à la fois au passé, au présent et au futur.

Le passé

Le radar primaire et secondaire IFF étaient la première forme de visualisation du trafic aérien. Ces formes de visualisation sont certes rudimentaires mais elles permettent de compiler des sources d'informations :

- plotting
- rapports de position d'appareils identifiés
- plots d'appareils inconnus
- Altitude

Le présent

Le présent varie d'un pays à l'autre... Dans certains pays, la tendance est à la visualisation sur écran couleur avec un traitement informatique toujours plus poussé. Ainsi de nombreuses senseurs et d'autres fonctionnalités se sont progressivement rajoutées :

- Filet de sauvegarde (STCA - Short Term Conflict Alert) qui permet d'avertir le contrôleur d'un rapprochement potentiellement anormal de deux avions,
- Alerte de proximité du sol (MSAW - Minimum Safe Altitude Warning) qui permet de notifier au contrôleur qu'un avion descend en dessous d'une altitude jugée dangereuse (Système qui aurait pu, a priori, éviter une catastrophe).

Le futur

Les enjeux sont purement économiques avant tout. Le transport aérien est en pleine expansion malgré les freins conjoncturels qui peuvent apparaître. Chaque acteur de l'aéronautique cherche l'amélioration des services du contrôle : sécurité, capacité, rapidité et flexibilité...

Elle apparaît sous des formes diverses...

Pour le contrôleur, sa principale préoccupation est de détecter les conflits, faciliter les communications par des liaisons fiables « air-sol » grâce à des échanges de données

De nombreuses techniques utilisant des échanges de données numériques de surveillance sont à l'étude voire déjà en service : Datalink, Mode S, ADS-B, ACARS, etc...

Ce projet « étude des futurs systèmes de surveillance » ne couvre pas tous les systèmes de surveillance car l'évolution et les besoins de surveillance dans le domaine aéronautique impose d'autres recherches tout en tenant compte du côté économique, sécurité, flexibilités et fiabilité.

BIBLIOGRAPHIE

- ✓ Scanter x band SMR transmitter-receiver; 1999 NAVIA AVIATION AS
- ✓ THALES AIR DEFENCE. Centre Electronique Rouen Ymare
- ✓ Complement - November 2010 – ENAC
- ✓ ASR-9 SYSTEM.SECTION 1-2-4-8 .WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION BALTIMORE.MARILAND
- ✓ TECHNIQUE RADAR appliqué- TOME 1 par L.CADORET-RADAR aspect théorique par G.DELOM

ACHRONYME

- ✓ Radar : radio detection and ranging
- ✓ RF : Radio fréquence
- ✓ λ : longueur d'onde
- ✓ C : célérité de la lumière ($3 \cdot 10^8$)
- ✓ Clutter : écho indésirable
- ✓ τ : largeur d'impulsion radar
- ✓ GVT : gain variable dans le temps
- ✓ STC : sensitivity time control
- ✓ NM : nautical miles
- ✓ CH : couverture haute
- ✓ CB : couverture basse
- ✓ STALO : oscillateur local
- ✓ COHO : oscillateur cohérent
- ✓ IF : fréquence intermédiaire

