

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## **Mémoire de Fin d'Étude**

Présenté à

**L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued**

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

## **MASTER ACADEMIQUE**

En Télécommunications

Présentés par

**BEZZAHI Abdelhakim et BEDDAZEKRI Abdelbasset**

# **Thème**

**Etude d'un Radar Secondaire Monopulse en  
utilisant la Technique de Suppression Améliorée  
des Lobes Secondaires à Interrogation**

Soutenu le 26/05/2016. Devant le jury composé de :

|                         |       |            |
|-------------------------|-------|------------|
| Dr. AJGOU Riadh         | M.C.B | Président  |
| Mr. MEDJOURI Abdelkader | M.A.A | Examineur  |
| Mr. BOULILA Mohammed    | M.A.A | Examineur  |
| Dr LAKHDAR Nacereddine  | M.C.B | Rapporteur |

**Année Universitaire 2015/2016**

# *Dédicace*

*À nos parents,*

*À nos familles,*

*À nos amis.*

## **REMERCIEMENTS**

*Tout d'abord, nous remercions ALLAH, notre créateur de nous avoir donné les forces pour accomplir ce travail.*

*Nous exprimons nos très sincères reconnaissances au Dr. **LAKHDAR Nacereddine**, d'avoir accepté de nous encadrer, pour ses conseils, ses remarques, surtout sa patience et sa modestie.*

*Nous avons également l'honneur de remercier l'Administration du Département de Génie Electrique d'avoir facilité le processus de sélection du mémoire et de l'encadreur, ainsi que de l'organisation et la bonne coordination.*

*Un grand merci est adressé aux examinateurs **Mr BOULILA Mohammed** et **Mr MADJOURI Abdelkader** et **Dr AJGOU Riadh** d'avoir accepté la lecture et l'évaluation de notre mémoire.*

*Finalement, nous remercions tous ceux qui ont participé à réaliser ce mémoire*

## SOMMAIRE

|                                                                      |      |
|----------------------------------------------------------------------|------|
| Dédicace .....                                                       | ii   |
| Remerciements .....                                                  | iii  |
| Liste d'abréviations .....                                           | iv   |
| Listes des tableaux .....                                            | v    |
| Liste des Figures .....                                              | vii  |
| Résumé .....                                                         | viii |
| Introduction Générale .....                                          | 1    |
| <b>Chapitre I : Généralités sur le radar</b>                         |      |
| I.1 Historique .....                                                 | 3    |
| I.2 Principe de base d'un radar .....                                | 4    |
| I.3 Composantes d'un système radar .....                             | 7    |
| I.3.1 L'émetteur .....                                               | 8    |
| I.3.2 Le duplexeur .....                                             | 8    |
| I.3.3 L'antenne radar .....                                          | 9    |
| I.3.4 Le joint tournant .....                                        | 9    |
| I.3.5 Le récepteur .....                                             | 9    |
| I.3.6 Traitement et exploitation des informations .....              | 10   |
| I.3.7 Synchronisation .....                                          | 10   |
| I.4 Conclusion .....                                                 | 11   |
| <b>Chapitre II : Classification des systèmes radar</b>               |      |
| II.1 Introduction .....                                              | 12   |
| II.2 Systèmes radar .....                                            | 12   |
| II.2.1 Radars Primaires .....                                        | 12   |
| II.2.1.1 Radars à impulsion .....                                    | 13   |
| II.2.1.2 Radar à onde continu.....                                   | 14   |
| II.2.1.2.1 Radars à onde continue non modulée .....                  | 15   |
| II.2.1.2.2 Radars à onde continue modulée .....                      | 15   |
| II.2.2 Radars Secondaires .....                                      | 16   |
| II.2.3 Radars Bistatiques.....                                       | 16   |
| II.2.4 Radars imageurs/Radars non imageurs .....                     | 17   |
| II.3 Plages des fréquences et domaine d'application des radars ..... | 17   |
| II.4 Domaine d'application des radars .....                          | 18   |
| II.5 Conclusion .....                                                | 19   |

### **Chapitre III : Radar Secondaire et ses évolutions**

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| III.1 Introduction .....                                            | 20 |
| III.2 Principe du radar secondaire .....                            | 20 |
| III.2.1 Interrogation du sol .....                                  | 22 |
| III.2.2 Transpondeur dans l'avion .....                             | 22 |
| III.2.3 Retour à l'interrogation au sol .....                       | 23 |
| III.3 Fonctions radar secondaire .....                              | 23 |
| III.4 Principes des traitements la réception radar secondaire ..... | 24 |
| III.5 Structure des interrogations .....                            | 25 |
| III.5.1 Formats d'interrogation .....                               | 25 |
| III.5.2 Structure de la réponse .....                               | 28 |
| III.6 Résumé sur la structure des codes .....                       | 29 |
| III.7 Les phénomènes parasites .....                                | 31 |
| III.7.1 Les réponses sur lobes secondaires .....                    | 31 |
| III.8 Problèmes d'interférences pour le radar secondaire .....      | 32 |
| III.8.1 Le Fruit .....                                              | 32 |
| III.8.2 L'enchevêtrement (Garbling) .....                           | 34 |
| III.8.3 Les réponses en deuxième récurrence.....                    | 35 |
| III.8.4 Les réflexions .....                                        | 36 |
| III.9 Conclusion .....                                              | 37 |

### **Chapitre IV : Techniques de suppression des réponses sur les lobes secondaires**

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| IV.1 Introduction .....                                          | 38 |
| IV.2 Le radar secondaire monopulse.....                          | 38 |
| IV.2.1 Le principe du monopulse.....                             | 38 |
| IV.2.2 La technique d'écartométrie .....                         | 40 |
| IV.2.3 Le signal reçu en monopulse.....                          | 41 |
| IV.2.4 Antenne monopulse ALE-9 .....                             | 42 |
| IV.2.5 Présentation des diagrammes de l'antenne ALE-9 .....      | 44 |
| IV.2.6 Le garbling en monopulse .....                            | 46 |
| IV.2.7 Elimination des réponses asynchrones .....                | 46 |
| IV.3 Suppression des réponses sur lobes secondaires .....        | 47 |
| IV.3.1 Suppression des lobes secondaires à l'interrogation ..... | 47 |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| IV.3.2 Suppression des lobes secondaires à la réception .....                  | 49 |
| IV.3.2 Les Lois Gain variable avec le temps .....                              | 50 |
| IV.3.3 Suppression des réflexions par la technique IISLS (Improved ISLS) ..... | 50 |
| IV.4 La sectorisation .....                                                    | 52 |
| IV.5 Radar mode " S" .....                                                     | 53 |
| IV.5.1 Avantages attendus .....                                                | 53 |
| IV.5.2 Contraintes liées au mode S .....                                       | 54 |
| IV.5.3 Structure des signaux .....                                             | 54 |
| IV.6 Conclusion .....                                                          | 56 |
| Conclusion générale .....                                                      | 57 |
| Bibliographie                                                                  |    |

## **Abréviations**

|       |                                                             |
|-------|-------------------------------------------------------------|
| FRUIT | False Replies Un-synchronised In Time                       |
| FRUIT | False Replies Un-synchronised to Interrogation Transmission |
| IFF   | Identification Friend or Foe                                |
| IISLS | Improved Interrogation Side Lobe Suppression                |
| ISLS  | Interrogation Side Lobe Suppression                         |
| MSSR  | Monopulse Secondary Surveillance Radar                      |
| MTL   | Minimum threshold level                                     |
| OBA   | Off Boresight Angle                                         |
| OACI  | Organisation de l'Aviation Civil International              |
| PPI   | Plan Position Indicator                                     |
| PRF   | Pulse Repetition Frequency                                  |
| PSR   | Primary Surveillance Radar                                  |
| RADAR | Radio Detecting And Ranging                                 |
| RSLS  | Replay path Side Lobe Suppression                           |
| SIR-M | Secondary Surveillance Radar Monopulse                      |
| SLS   | Side Lobe Suppression                                       |
| SPI   | Special Purpose Identification                              |
| SSR   | Secondary Surveillance Radar                                |
| STC   | Sensitivity Time Control                                    |

## **Liste des tableaux**

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| Tableau 2.1 Plage de fréquences radar.....           | 17 |
| Tableau 3.1 Structure des modes d'interrogation..... | 26 |
| Tableau 3.2 Exemples de codes.....                   | 30 |
| Tableau 4.1 Interrogations mode S.....               | 54 |

## Liste des Figures

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1.1 Schéma de principe d'un radar .....                                     | 5  |
| Figure 1.2 Schéma du parcours de l'onde dans le radar primaire .....               | 6  |
| Figure 1.3 Schéma bloc du système radar .....                                      | 8  |
| Figure 2.1 Différentes classes des systèmes radars .....                           | 11 |
| Figure 2.2 Antenne radar primaire.....                                             | 12 |
| Figure 2.3 Radar à impulsions.....                                                 | 13 |
| Figure 2.4 Principe du radar à onde continue .....                                 | 13 |
| Figure 2.5 Principe des radars à onde continue non modulée .....                   | 14 |
| Figure 2.6 Antenne radar secondaire.....                                           | 15 |
| Figure 2.7 Radar bistatique .....                                                  | 16 |
| Figure 3.1 Principe du radar secondaire.....                                       | 20 |
| Figure 3.2 Transpondeur moderne.....                                               | 21 |
| Figure 3.3 Forme de signal d'Interrogation.....                                    | 25 |
| Figure 3.4 Structure des réponses .....                                            | 29 |
| Figure 3.5 Réponses sur lobes secondaires.....                                     | 30 |
| Figure 3.6 Présentation fruit.....                                                 | 32 |
| Figure 3.7 Garbling.....                                                           | 33 |
| Figure 3.8 Réponse garblés.....                                                    | 33 |
| Figure 3.9 Réponses en deuxième récurrence.....                                    | 35 |
| Figure 3.10 Les réflecteurs.....                                                   | 35 |
| Figure 4.1 Principe monopulse .....                                                | 38 |
| Figure 4.2 Diagramme de ( $\Sigma$ ), ( $\Delta$ ) et ( $\Omega$ ) en azimut ..... | 38 |
| Figure 4.3 La technique d'écartométrie.....                                        | 39 |
| Figure 4.4 Courbe écartométrie (OBA) .....                                         | 40 |
| Figure 4.5 signal reçu en monopulse .....                                          | 40 |
| Figure 4.6 Antenne monopulse ALE-9 .....                                           | 42 |
| Figure 4.7 Distribution électrique de l'antenne monopulse ALE-9.....               | 43 |
| Figure 4.8 Diagramme en azimut de ( $\Sigma$ ) .....                               | 43 |
| Figure 4.9 Diagramme en azimut de ( $\Sigma$ ) et ( $\Delta$ ) .....               | 44 |
| Figure 4.10 Diagramme en azimut de ( $\Sigma$ ) et ( $\Omega$ ) .....              | 44 |
| Figure 4.11 Principe de l'ISLS .....                                               | 48 |

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 4.12 Diagramme de STC.....                                                                                      | 49 |
| Figure 4.13 Diagramme montrant la trajectoire parcourue par les impulsions directes et<br>subissant une réflexion..... | 50 |
| Figure 4.14 Principe d’ISLS.....                                                                                       | 51 |
| Figure 4.15 Principe de la sectorisation .....                                                                         | 52 |
| Figure 4.16 format d'interrogation Mode S .....                                                                        | 53 |

## **Résumé**

Les radars secondaires sont utilisés dans un environnement plein de constructions causant des réflexions, en particulier dans les aéroports (hangars, aérodrome, clôtures, etc.). Le message d'interrogation et la réponse des appareils en vol peuvent être chacune réfléchies par ces surfaces avec assez de puissance pour s'ajouter aux signaux directs, causant des fantômes sur l'écran radar à une distance et un azimuth erronés. Bien sûr, la meilleure façon de prévenir ce problème serait de positionner le radar secondaire loin de tout obstacle pouvant causer des réflexions mais ceci est impossible dans la plupart des cas. D'autre part, les bâtiments pourraient être faits de matériaux peu réfléchissant, ou même absorbant, mais cela est très coûteux et difficile à construire. Une solution plus pratique est d'utiliser une méthode appelée suppression améliorée des lobes secondaires à l'interrogation (IISLS). Cette technique assure que le transpondeur ne répond pas à l'interrogation et se met hors-circuit durant un certain laps de temps (habituellement 35  $\mu$ s). Pendant ce temps, les impulsions du faisceau principal, qui auraient pu être réfléchies par des obstacles et arriver en retard à l'avion, ne recevront aucune réponse. Cette méthode est très efficace pour éliminer les réponses fantôme venant des réflexions.

### **Mots clés :**

Radar secondaire, Réflexions, Interrogation, Réponse, azimuth, IISLS, Lobe secondaire, Transpondeur.

## **Abstract**

Secondary radars (SR) are often located in the vicinity of buildings with reflecting surfaces, in particular at airports (e.g. hangars, terminal buildings, metal boundary fences). Interrogations from the SR may be reflected from a surface with sufficient power so that an aircraft in the reflected direction receives the interrogations and, to them. Similarly, on the return path, the replies are reflected back to the ground receiver of the SR. Hence, the SR interrogator will form a false target (image) at a completely different azimuth and different range (detour) from the real aircraft. Subsequently, when the interrogator antenna points in the direction of the real aircraft the real target will be detected as well. The first solution to avoid reflection is to place the SR antenna away from reflective surfaces, but this is not always possible at sites such as airports. Buildings can be made to be less reflective, including coating existing buildings with absorbent material; however this is expensive and not often practicable. One way of reducing reflection is to use Improved Interrogator Side Lobe Suppression (IISLS) technique in order to disabled the aircraft transponder from replying to any interrogations for a certain period (35 $\mu$ s). Consequently, when the reflected interrogation arrives a little time later due the extra path length via the reflecting object, the transponder does not reply and so no false target is produced. This technique is very effective in removing phantom responses from reflections.

## **Keywords :**

Secondary radars, reflection, Interrogations, replies, Azimuth, Side Lobe, IISLS, transponder

## **Introduction générale**

On désigne sous le nom de radar (*Radio Détection and Ranging*) un système qui illumine une portion de l'espace avec une onde électromagnétique et reçoit les ondes réfléchies par les objets qui s'y trouvent, ce qui permet de détecter leur existence et (sauf exception rare) de déterminer certaines caractéristiques de ces objets. Ces caractéristiques sont variables : il peut s'agir de la position horizontale des objets, de leur altitude, de leur vitesse et parfois de leur forme. La détermination de ces données permettant au radar de renseigner l'utilisateur, mais aussi d'éliminer un grand nombre d'objets indésirables pour ne conserver que les « cibles » intéressantes.

Les applications du radar dans différents domaines sont nombreuses et variées : militaires, maritime, météorologique, sécurité routière, télédétection et essentiellement pour le contrôle du trafic aérien. On distingue deux types de radar qui sont utilisés en contrôle aérien, le radar primaire de surveillance PSR (Primary Surveillance Radar) et le radar secondaire de surveillance ou SSR (Secondary Surveillance Radar).

Le radar primaire est basé sur le principe d'émission d'un signal et attendre la réflexion de son propre signal (écho) par la cible (dite passive ou non coopérative) pour des informations fiables de direction, de hauteur et de distance, mais il utilise une puissance élevée due au parcours du signal aller- retour pour avoir une portée faible de centaine de kilomètre aussi bien il ne peut pas savoir l'identification de la cible (ami ou ennemie).

Le radar secondaire est un dispositif qui interroge l'avion équipé d'un transpondeur répond (la cible est dite active ou coopérative). Le récepteur du radar secondaire analyse les informations contenues dans la réponse et connaît la position, l'altitude, l'identité de la l'avion et son azimut.

Le radar secondaire a plusieurs avantages, seuls les avions équipés de ceux-ci seront visualisés les obstacles ou les oiseaux qui n'apparaîtront pas et également réduction de la puissance émise. De plus, le fait que des données peuvent être transmises au système radar, l'avion peut envoyer des informations sur une perte radio, détournement d'avion...etc.

Le radar secondaire a été amélioré pour un usage civil après la deuxième guerre mondiale et a donné naissance aux transpondeurs (interrogation par radar secondaire en mode A, B, C et S vu plus loin). Suivant le mode utilisé, l'opérateur radar au sol peut identifier un appareil par

un code attribué à l'avance. Les transpondeurs des avions qui sont à sa portée lui répondent. Les réponses des avions sont capturées par l'antenne du radar secondaire, analysées et traitées électroniquement et par la suite visualisées sur les écrans des contrôleurs aériens.

Plusieurs problèmes affrontent le développement du SSR, parmi lesquels ; l'enchevêtrement des réponses, les réflexions et les réponses sur lobes secondaires.

Dans ce mémoire on s'intéresse aux techniques de suppression des réponses sur lobes secondaires et en particulier la technique de IISLS (Improved Interrogation Side Lobe Suppression) qui est la meilleure méthode utilisée pour résoudre le problème des fantômes sur l'écran radar due à la réflexion des réponses des avions sur les constructions environnantes du radar. Pour cela notre mémoire va être structuré autour de quatre chapitres organisés comme suit :

Le premier chapitre concerne une description générale d'un radar, son principe de fonctionnement et une présentation des différentes composantes d'un système radar.

Les différentes classes des systèmes radar, leurs propriétés, principe de fonctionnement de chaque type de radar, leurs performances et également leurs domaines d'applications vont être décrits dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du radar secondaire et ses évolutions en montrant son principe et quelques définitions. Les phénomènes parasites rencontrés et les différents modes d'interrogation et leurs réponses vont être présentés.

L'objectif du dernier chapitre est de présenter les techniques de suppression des réponses sur les lobes secondaires. Nous décrirons le principe de fonctionnement de l'antenne monopulse et les solutions pour les différents parasites rencontrés. Les différentes techniques de suppression des réponses sur les lobes secondaires, en particulier la technique IISLS, leurs avantages et leurs inconvénients. La présentation du radar secondaire mode S (sélective) et son rôle pour surmonter aux inconvénients des techniques précédentes.

# ***CHAPITRE I***

## ***Généralité sur le radar***

## I.1 Historique

Le **RADAR** est l'une des merveilles du vingtième siècle. C'est un système électromagnétique utilisé pour détecter la présence des objets mobiles et déterminer leur trajectoire, leur vitesse, leur point de contact le plus proche, et d'autres données, tout en transmettant des ondes radioélectriques. Il en extrait alors l'information nécessaire sur la cible à partir du signal échoïque [1-5].

Donc il serait vain de chercher à attribuer l'invention du Radar à un savant en particulier, ou à une nation unique. On doit plutôt considérer le « **Radar** » comme le résultat de l'accumulation de nombreuses recherches menées antérieurement, et auxquelles les scientifiques de plusieurs pays ont parallèlement participé. Au fil de cette histoire il existe néanmoins des points de repères qui correspondent à la découverte de quelques grands principes de base ou à des inventions importantes [6-8]

En **1864**, le physicien anglais James Clerk Maxwell développe sa théorie de la lumièreélectromagnétique (Description de l'onde électromagnétique et de sa propagation [1-3])[6, 9,10, 11].

En **1886**, le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz démontra l'existence physique des ondes électromagnétiques qui confirment ainsi la théorie de Maxwell [1, 2, 6, 9,11].

En **1904**, le technicien allemand spécialiste des ondes hertziennes, Christian Hülsmeier, invente le «Télémobilscope», appareil de prévention des collisions en mer. Il mesure le temps de parcours de l'onde électromagnétique, sur le trajet aller-retour, entre l'antenne et un objet métallique (navire). Un calcul de la distance est donc possible. Il s'agit du premier test pratique d'un appareil qui suit les principes de ce que sera le radar plus tard. Hülsmeier dépose un brevet de son invention en Allemagne, en France et au Royaume-Uni [1,2, 6, 9,11].

En **1921**, Albert Wallace Hull développe un oscillateur à haut rendement, le magnétron, qui servira plus tard comme source de l'onde radar[1, 2, 6,9,11].

En **1922**, A. H. Taylor et L. C. Young, du Naval Research Laboratory (USA), détectent pour la première fois un navire en bois dans une expérience assez similaire à celle de Hülsmeier [1-3][6, 9,11].

En **1930**, L. A. Hyland, également du Naval Research Laboratory, réalise la première détection d'un aéronef [1, 2, 6,9].

En **1934**, faisant suite à une étude systématique du magnétron, des essais sur des systèmes de détection par ondes courtes sont menés en France par la CSF (16 et 80 cm de longueur d'onde) selon les principes de Nicolas Tesla. Un brevet est déposé (brevet français n° 788795). Le premier équipa en 1934 le cargo Orégon, suivi en 1935 par celui du paquebot Normandie [1, 2, 6,9].

En **1935**, faisant suite à un brevet déposé par Robert Watson-Watt (l'inventeur dit « officiel » du radar) (brevet anglais GB593017), le premier réseau de radars est commandé par les Britanniques et portera le nom de code Chain Home[1, 2, 6, 9,11].

En **1936**, Metcalf et Hahn développent le klystron. Utilisé comme amplificateur ou oscillateur, il sera un autre équipement important du radar.

Différents équipements radar sont développés aux USA, en Russie, en Allemagne, en France et au Japon, accélérées par la montée en puissance vers une guerre qui semble inévitable, et par le développement général de l'arme aérienne.

Les recherches dans le domaine de la technologie radar génèrent des avancées techniques significatives durant la seconde guerre mondiale. Pendant la guerre froide, des radars sont déployés en grande quantité de part et d'autre du «rideau de fer», et en particulier le long des frontières allemandes [1, 2, 6, 9,11].

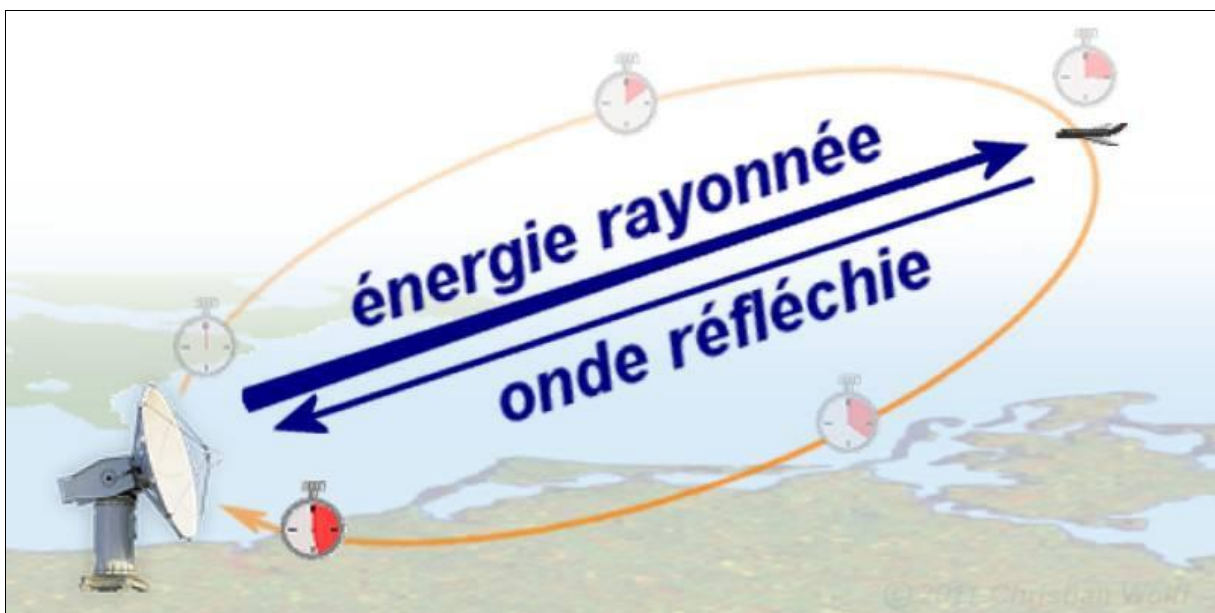
D'autre part, le radar fait son apparition dans le domaine civil après le conflit. En premier, c'est le domaine de l'aviation civil qui en est équipée, permettant un rapide développement du contrôle aérien. Il se répand ensuite dans des domaines aussi divers que la détection des précipitations en météorologie, l'étude des planètes en astronomie, le contrôle de la vitesse sur les routes et la détection des artefacts archéologiques dans le sol[8, 11].

## **I.2 Principe de base d'un radar**

Le principe de ce système est basé sur les propriétés des ondes radio, qui se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière. Un émetteur diffuse, au moyen d'une antenne, un faisceau

d'ondes électromagnétiques concentré dans une direction souhaitée. Lorsque ces ondes rencontrent un objet (cible), elles se réfléchissent toutes ou en partie, formant ce qu'on appelle un écho radar. Cet écho, renvoyé vers le radar, est capté par l'antenne qui joue alors, cette fois-ci, le rôle du récepteur. Le signal réfléchi, après avoir été amplifié, est numérisé et transformé sous forme de spots (plots) lumineux visualisables sur un écran qui donne une représentation polaire plane de l'espace balayé par le radar[1,3,4,6,11].

Le terme **RADAR** est l'acronyme de **Radio Detecting And Ranging**. Le principe utilisé par les radars est voisin de celui de la réflexion des ondes sonores. Lorsque vous criez dans la direction d'un objet qui peut réfléchir le son de votre voix (dans un canyon ou dans une grotte par exemple), vous en entendez l'écho. Si vous connaissez la vitesse du son dans l'air, vous pouvez alors estimer la distance et la direction générale de l'objet. Le temps nécessaire à l'aller et au retour du son vers vous peut être converti en distance si vous connaissez sa vitesse[2, 8, 9, 11,12].



**Figure 1.1 schéma de principe d'un radar[8]**

Le radar utilise des impulsions d'énergie électromagnétique à peu près de la même manière, comme le montre la Figure 1.1

Le signal hyperfréquence est émis en direction de la cible. Une petite partie de l'énergie transmise est réfléchiée par la cible dans la direction du radar. Cette énergie renvoyée par la cible jusqu'au radar est appelée ECHO, exactement comme lorsque l'on considère les ondes

sonores. Un radar utilise l'écho afin de déterminer la direction et la distance de l'objet qui a réfléchi son signal.

Le schéma ci-dessous illustre le principe de fonctionnement du radar primaire. Le signal transmis par le radar est généré par un émetteur puissant puis passe par un duplexeur qui l'aiguille vers l'antenne émettrice. Chaque cible réfléchit le signal en le dispersant dans un grand nombre de directions ce qui se nomme la diffusion. La rétrodiffusion est le terme désignant la partie du signal réfléchi diffusée dans la direction opposée à celle des ondes incidentes (émises). L'écho ainsi réfléchi par la cible vers l'antenne sera aiguillé par le duplexeur vers un récepteur très sensible. Les échos détectés par le radar peuvent être finalement visualisés sur un écran traditionnel de type PPI (*Plan Position Indicator*) ou sur tout autre système de visualisation plus élaboré. L'écran type PPI permet de visualiser un vecteur dont l'origine est la position actuelle du radar et la direction de l'axe de l'antenne. Ce vecteur fait le tour de l'écran à la vitesse de rotation de l'antenne, et la position de l'axe de l'antenne au moment où un écho est détecté correspond donc à la direction dans laquelle se trouve cet écho [1,2, 6, 8].

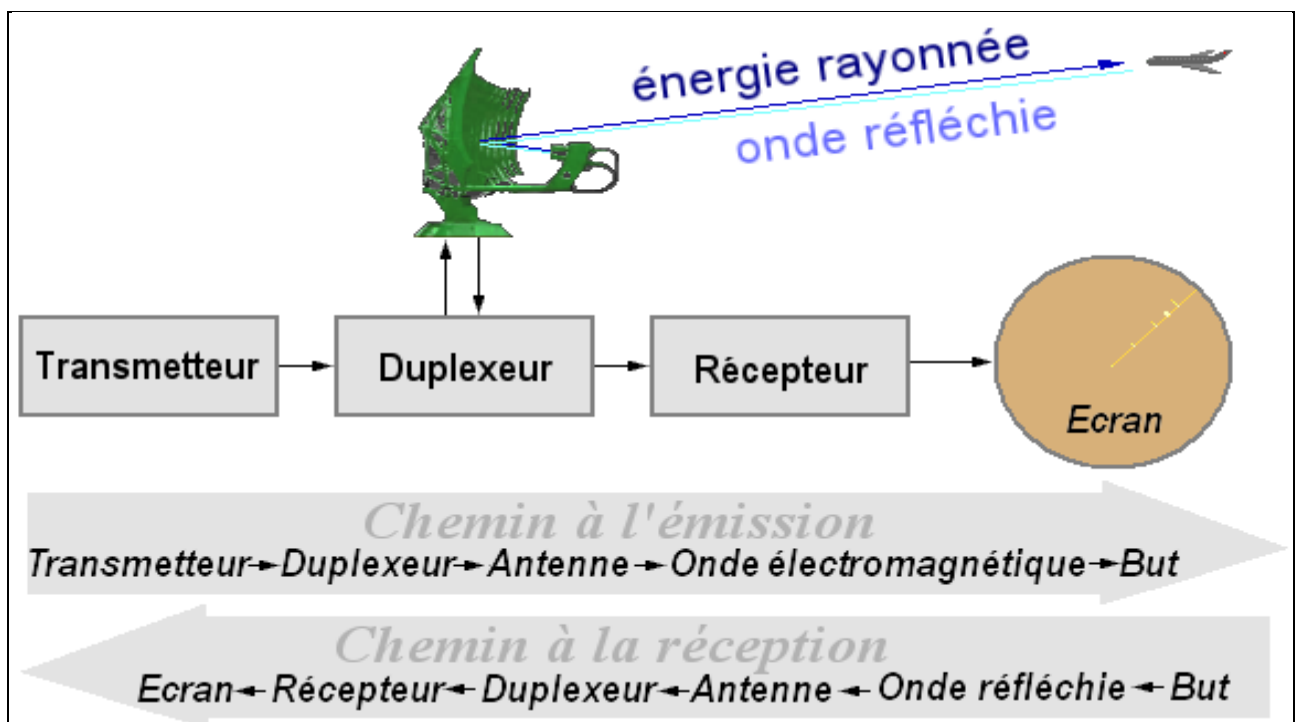


Figure 1.2 Schéma du parcours de l'onde dans le radar primaire [8]

Le principe de base du fonctionnement d'un radar primaire est donc très simple à comprendre, bien que la théorie puisse être assez complexe. Sa connaissance est cependant indispensable à

la définition exacte et à l'utilisation de tout système radar. La réalisation et la mise en œuvre de radars primaires recourent à un large éventail de disciplines dans des domaines variés tels que le bâtiment, la mécanique, l'électricité, l'électronique, les micro-ondes de forte puissance, le traitement du signal et le traitement rapide de grands volumes de données numériques. Pourtant, quelques lois physiques sont de la plus grande importance.

La mesure de la distance par un radar est possible du fait des propriétés de l'énergie électromagnétique :

Cette énergie circule normalement dans l'espace **en ligne droite et à vitesse constante**.

Elle peut être soumise à des variations minimales dues aux conditions météorologiques et atmosphériques. Cependant, lors de la discussion sur la mesure de distance, ces effets seront temporairement ignorés [6,8].

L'énergie électromagnétique se déplace dans l'air approximativement à la **vitesse de la lumière** soit :

-300 000 kilomètres par seconde

-186 000 miles (anglo-saxons) par seconde

-162 000 milles nautiques par seconde.

### **Réflexion des ondes électromagnétiques**

Les ondes électromagnétiques sont réfléchies lorsqu'elles rencontrent une surface conductrice. Si après l'émission d'un signal, on est capable de recevoir une partie de son énergie qui retourne vers la source, alors on a la preuve qu'un obstacle se trouve dans la direction de sa propagation [8].

### **I.3 Composantes d'un système radar**

Comme présentée dans la figure I.3, le radar est formé de différentes composantes [1-3][6, 9,13]

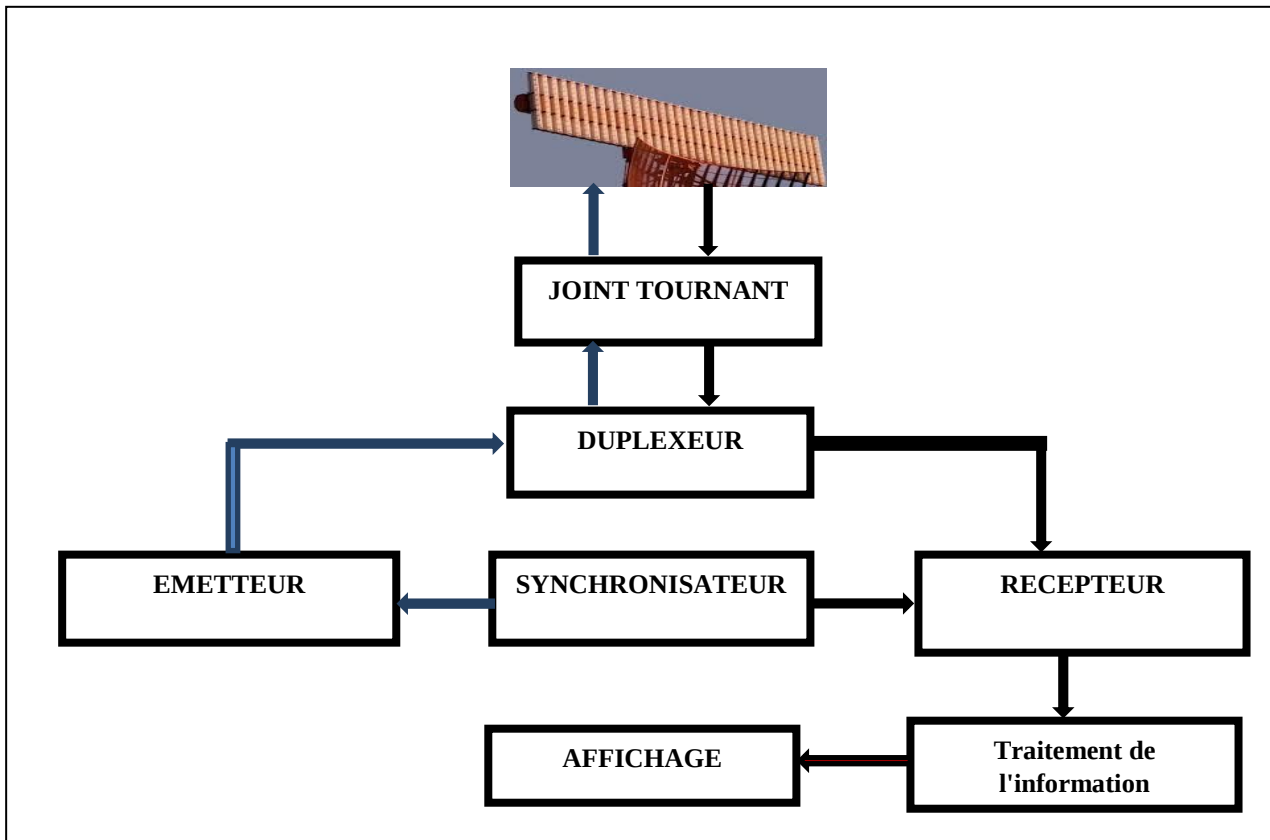


Figure 1.3 : Schéma bloc du système radar

### I.3.1 L'émetteur

L'émetteur est un appareil électronique qui génère une impulsion électromagnétique de la gamme des ondes radio qui sera envoyé à l'antenne pour diffusion [9,11, 13].

### I.3.2 Le duplexeur

C'est un commutateur électronique qui permet, d'une part au signal émis d'être dirigé vers l'antenne avec une perte minimale tout en isolant convenablement le récepteur ; et d'autre part au signal reçu d'être dirigé en totalité vers le récepteur, sans dérivation vers l'émetteur et toujours avec une perte minimale quand on utilise un radar monostatique. Il permet donc d'utiliser la même antenne pour les deux fonctions. Il est primordial qu'il soit bien synchronisé, puisque la puissance du signal émis de l'ordre du mégawatt ce qui est trop important pour le récepteur qui, lui, traite des signaux d'une puissance de l'ordre de quelques nano-watts. Au cas où l'impulsion émise serait dirigée vers le récepteur, celui-ci serait instantanément détruit [1, 3,4, 11, 13,14].

### **I.3.3 L'antenne Radar :**

C'est l'élément le plus visible du radar et également le plus connu du profane. Son rôle est de concentrer l'énergie émise par le radar dans un angle solide déterminé. L'antenne radar est dessinée de façon à concentrer l'énergie des impulsions émises en un faisceau horizontal étroit. Pour repérer les cibles, Les antennes radar doivent avoir une directivité élevée.

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont celle-ci concentre son rayonnement dans une certaine direction de l'espace pour envoyer un faisceau étroit étant donné que la largeur du faisceau est proportionnelle à la longueur d'onde du rayonnement et inversement proportionnelle à la largeur de l'antenne. Si le faisceau est trop grand, il y a gaspillage d'énergie. Par contre, s'il est trop petit, un objet se trouvant sous la portée de l'antenne, ne peut, en plus, être repéré. Par conséquent, en général, aucune antenne n'est parfaite.

Donc l'antenne radar est un conducteur parcouru par un courant électrique alternatif produit un champ électromagnétique qui rayonne dans l'espace environnant. Ainsi, un ensemble de conducteurs élémentaires, traversé par des courants variables puissants, forme une antenne radio éditrice. Selon l'alignement de ses conducteurs élémentaires, une antenne peut être plus ou moins directive. L'antenne radar exploite les propriétés des ouvertures planes rectangulaires et diffuse l'onde électromagnétique vers la cible avec le minimum de perte. Sa vitesse de déplacement, rotation et/ou balancement, ainsi que sa position, en élévation comme en azimut, sont asservies, soit mécaniquement, mais parfois aussi électroniquement.

L'antenne peut être double afin de permettre indépendamment les fonctions d'émission et de réception. Dans ce cas, il est nécessaire que les deux aériens élémentaires soient orientés à chaque instant dans la même direction. Ils doivent donc être solidaires entre eux ou synchronisés. En outre, leur interférence radioélectrique doit être la plus faible possible afin qu'au moment de l'émission, le signal émis qui est de très grande puissance ne vienne perturber le fonctionnement du récepteur [6, 9, 11,13, 15].

### **I.3.4 Joint tournant**

C'est un dispositif permettant le transfert de l'énergie entre la partie fixe et la partie mobile du radar [13, 16,17].

### **I.3.5 Le récepteur**

C'est l'élément le plus délicat, et souvent le plus complexe du radar. Lui incombent l'amplification et le traitement du signal radar.

Sa sensibilité doit être très grande (jusqu'à  $10^{-15}$  W). Il amplifie les signaux dans de très grandes proportions ( $10^{10}$  à  $10^{14}$ ) et doit le faire sans déformation du signal. Le récepteur doit en outre effectuer le filtrage du signal et tous les autres traitements adaptés à l'information à obtenir (par exemple vitesse, position angulaire...) [9, 11, 13, 14,15].

### I.3.6 Traitement et exploitation des informations

Permettant de traiter le signal brut afin d'en extraire des données utiles à l'opérateur (détection, suivi et identification de cible, extraction de paramètres météorologiques, océanographiques, etc.). Le tout est contrôlé par le système électronique du radar, programmé selon un logiciel de sondage. Les données obtenues sont alors affichées aux utilisateurs.

Le traitement des informations radar est fait à partir des éléments suivants :

- signal vidéo délivré par le récepteur.
- signaux de synchronisation.
- informations de position angulaire du faisceau d'antenne.
- éventuellement autres informations en provenance d'un traitement spécial à la réception, ou de sources extérieures.

Il permet de délivrer les plots radar qui seront pris en compte par le système d'exploitation. Les informations sont présentées à un opérateur sous la forme d'une image radar adaptée à la situation à analyser [1, 3,11].

### I.3.7 Synchronisation

Le synchronisateur est le cœur du système radar. Il délivre les signaux de base qui définissent les instants d'émission, et divers signaux annexes nécessaires à des opérations en temps réel.

Son élément de base est une horloge de très grande stabilité ( $10^{-5}$  à  $10^{-8}$ ) à partir de laquelle sont engendrés les signaux de synchronisation.

Ces signaux sont distribués aux différents éléments à piloter.

Dans les antennes classiques, la position angulaire du faisceau est liée à la position mécanique de l'antenne. Celle-ci doit donc être recopiée et transmise au système d'exploitation des informations.

Les systèmes de copie utilisés sont du type analogique (selsyns) ou numérique (codeurs).

Dans les antennes à balayage électronique, cette information est engendrée et transmise par le calculateur « pointeur » d'antenne [1, 3,11 ,13].

**I.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'historique et les différentes dates d'invention du radar. Nous avons décrit le principe de fonctionnement d'un radar et comment ce dernier utilise le principe de réflexion des ondes électromagnétiques pour détecter les cibles. Ensuite, les différentes composantes d'un système radar ont été données dans la dernière partie afin d'expliquer le rôle de chaque composante.

## ***CHAPITRE II***

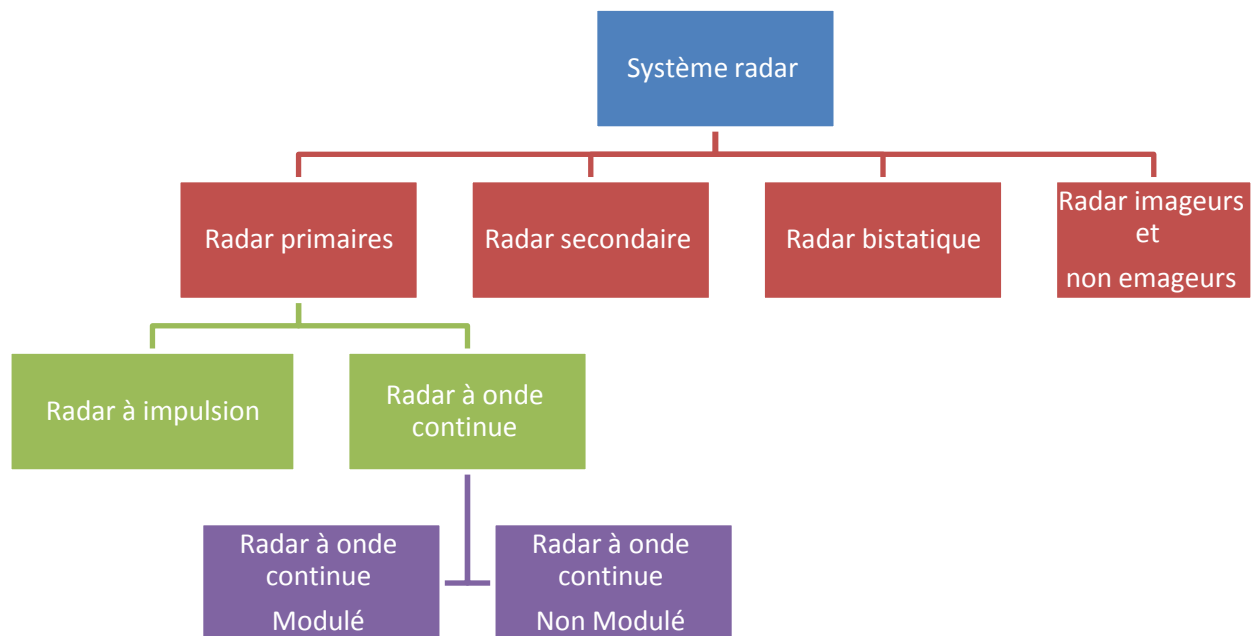
### ***Classification des systèmes radar***

## II.1 Introduction

En fonction des informations qu'ils doivent fournir et de la fréquence d'utilisation ainsi que le domaine d'application, les équipements radars utilisent des qualités et des technologies différentes. Dans ce contexte, nous présentons les différentes classes des systèmes radar dont nous montrons les propriétés de chaque type (directivité, distance, altitude...etc). La description de chaque type de radar, leurs performances et également leurs domaines d'applications sont décrits.

## II.2 Systèmes radar

Les systèmes radar sont classifiés comme montrés sur la figure 2.1



**Figure 2.1 Différentes classes des systèmes radars**

### II.2.1 Radars primaires

Un radar primaire émet des signaux hyperfréquences qui sont réfléchis par les cibles. Les échos ainsi créés sont reçus et étudiés, contrairement à un radar secondaire, un radar primaire reçoit la partie réfléchie de son propre signal

Les radars primaires peuvent être de type deux dimensions (2D) donnant des mesures de distance et d'azimut ou trois dimensions (3D), une mesure complémentaire en angle de site (angle d'élévation dans le plan vertical) est alors disponible.

Pour les radars 2D, l'absence de toute mesure d'angle de site ne permet pas de discrimination en altitude. Ainsi, un avion comme un écho au sol ou un obstacle au sol dans le même azimut et à la même distance seront vus sans distinction[6,11] [18-22].

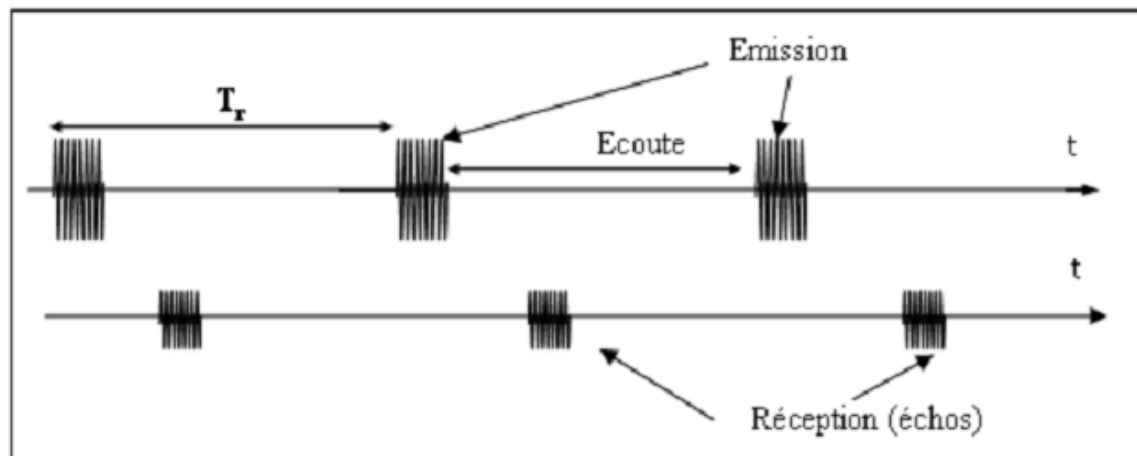


**Figure 2.2 antenne radar primaire [16]**

On distingue deux types de radar primaire :

#### **II.2.1.1 Radars à impulsions**

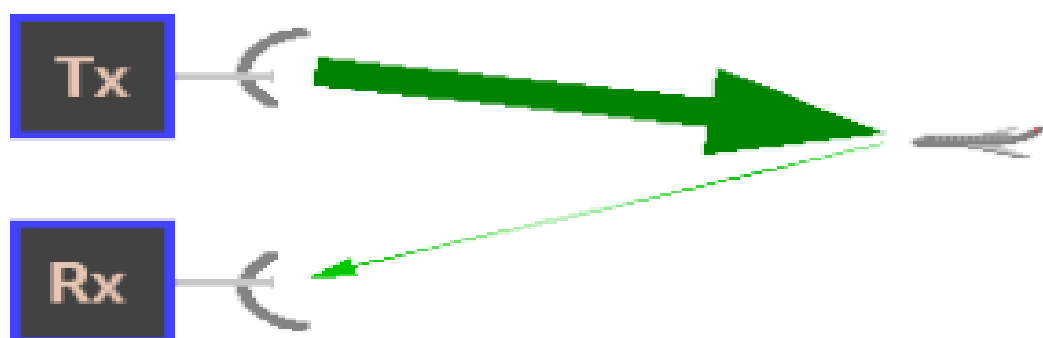
Les radars à impulsions émettent des impulsions de signal hyperfréquence à forte puissance. Chaque impulsion est suivie d'un temps de silence plus long que l'impulsion elle-même, temps durant lequel les échos de cette impulsion peuvent être reçus avant qu'une nouvelle impulsion ne soit émise. Direction, distance et parfois, si cela est nécessaire, hauteur ou altitude de la cible, peuvent être déterminées à partir des mesures de la position de l'antenne et du temps de propagation de l'impulsion émise[1,9, 11, 18,19].



**Figure 2.3 Radar à impulsions**

### II.2.1.2 Radars à onde continue

Les radars à onde continue génèrent un signal hyperfréquence continu. Le signal réfléchi est reçu et traité, mais le récepteur (qui dispose de sa propre antenne) n'est pas tenu d'être au même emplacement que l'émetteur. Tout émetteur de station radio civile peut être simultanément utilisé comme un émetteur radar, pour peu qu'un récepteur relié à distance puisse comparer les temps de propagation du signal direct et du signal réfléchi. Des essais ont montré que la localisation d'un avion était possible par la comparaison et le traitement des signaux provenant de trois différentes stations émettrices de télévision [3, 4, 6, 9, 11,19].



**Figure 2.4 Principe du radar à onde continue**

### II.2.1.2.1 Radars à onde continue non modulée

Le signal émis par ces équipements est constant en amplitude et en fréquence. Spécialisés dans la mesure des vitesses, les radars à onde continue ne permettent pas de mesurer les distances. Ils sont employés par exemple par la gendarmerie pour les contrôles de vitesse sur les routes (cinémomètres radars)[6, 8, 11,19].

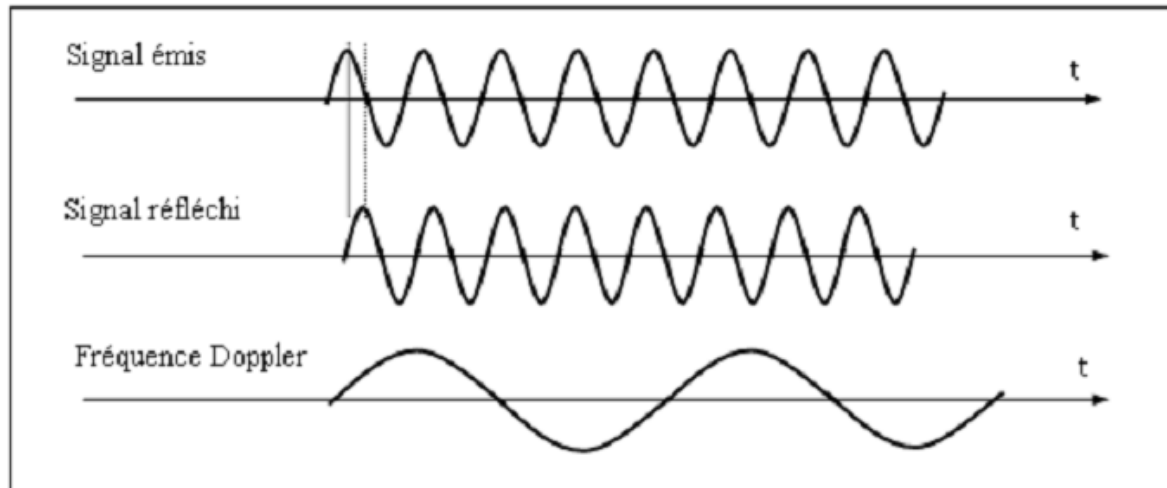


Figure 2.5 Principe des radars à onde continue non modulée

### II.2.1.2.2 Radars à onde continue modulée

Le signal émis est constant en amplitude mais modulé en fréquence. Cette modulation rend à nouveau possible le principe de la mesure du temps de propagation. Un autre avantage non négligeable de ce type d'équipement est que, la réception n'étant jamais interrompue, les mesures s'effectuent en permanence. Ces radars sont utilisés lorsque les distances à mesurer ne sont pas trop grandes et qu'il est nécessaire d'effectuer des mesures ininterrompues (par exemple une mesure d'altitude pour un avion ou un profil de vents par un radar météorologique [6, 11,19].

Un principe similaire est utilisé par des radars à impulsions qui génèrent des impulsions trop longues pour bénéficier d'une bonne résolution en distance. Ces équipements modulent souvent le signal contenu dans l'impulsion afin d'améliorer leur résolution en distance. On parle alors de compression d'impulsion.

### II.2.2 Radars secondaires

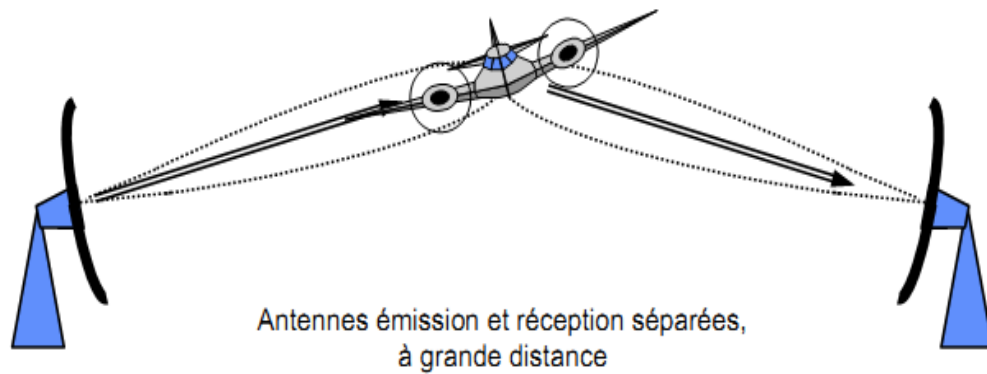
Avec ces radars, l'avion doit être équipé d'un transpondeur (transmetteur répondeur) qui répond à l'interrogation du radar en générant un signal codé. Cette réponse peut contenir beaucoup plus d'informations que celles qu'un radar primaire peut collecter (par exemple l'altitude, un code d'identification, ou encore un rapport de problème à bord comme une panne totale des radiocommunications [1, 6, 18, 19, 22,23]).



**Figure2.6 Antenne radar secondaire El-oued**

### II.2.3 Radars bistatiques

Un radar bistatique se compose de deux installations considérablement éloignée l'une de l'autre. L'un des sites abrite les équipements consacrés à l'émission, l'autre est consacré à la réception (un tel radar utilise donc également deux antennes, une sur chaque site) [1,2, 6,19].



**Figure 2.7 Radar bistatique [1]**

#### II.2.4 Radars imageurs / Radars non imageurs

Un radar imageur permet de présenter une image de l'objet (ou de la zone) observé. Les radars imageurs sont utilisés pour cartographier la Terre, les autres planètes, les astéroïdes et les autres objets célestes. Ils offrent aux systèmes militaires une capacité de classification des cibles [6, 11, 18,19].

Des exemples typiques de radar non imageur sont les cinémomètres radars (les petits, sur le bord de la route...) et le radio altimètres. Ce type de radar est également appelé diffusomètre puisqu'il mesure les propriétés de réflexion de la région ou de l'objet observé.

Les applications des radars secondaires non imageurs sont par exemple les dispositifs d'immobilisation antivols installés sur certains véhicules privés récents [6, 8, 11,18 ,19].

#### II.3 Plage des fréquences et domaine d'application des radars

Les radars peuvent émettre dans une large bande de fréquences. Plus la fréquence d'un radar est haute, plus elle est affectée par des conditions météorologiques telles que la pluie et les nuages. Mais une fréquence plus haute permet d'améliorer la précision de l'équipement radar qui l'émet. Ci-après sont présentées les différentes bandes de fréquences utilisées dans les systèmes radar, ainsi que leurs domaines d'application [9, 11, 18, 25,26].

| <b>Nom de bande</b> | <b>Plage de fréquences</b> | <b>Longueurs d'onde</b> | <b>Commentaires</b>                                                                                                                       |
|---------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| HF                  | 3-30 MHz                   | 10-100 m                | Pour haute fréquence. Utilisée par les radars côtiers et les radars « au-delà de l'horizon ».                                             |
| P                   | < 300 MHz                  | 1 m+                    | Pour précédent : appliquée a posteriori aux radars primitifs                                                                              |
| VHF                 | 50-330 MHz                 | 0.9-6 m                 | Pour très haute fréquence. Utilisée par les radars à très longue portée et par ceux à pénétration de sol.                                 |
| UHF                 | 300-1000 MHz               | 0.3-1 m                 | Pour ultra haute fréquence. Radars à très longue portée pénétration de sol et de feuillage.                                               |
| L                   | 1-2 GHz                    | 15-30 cm                | Utilisée pour le contrôle aérien de longue portée et la surveillance aérienne.                                                            |
| S                   | 2-4 GHz                    | 7.5-15 cm               | Pour court. Utilisée par les radars de trafic aérien local, les radars météorologiques et navals.                                         |
| C                   | 4-8 GHz                    | 3.75-7.5 cm             | Compromis entre les bandes S et X pour les transpondeurs satellitaires et les radars météo.                                               |
| X                   | 8-12 GHz                   | 2.5-3.75 cm             | Pour les radars météo, les radars de navigation, les radars à résolution moyenne de cartographie et la surveillance au sol des aéroports. |
| Ku                  | 12-18 GHz                  | 1,67-2,5 cm             | Fréquence juste sous K pour les radars de cartographie à haute résolution et l'altimétrie satellitaire.                                   |
| K                   | 18-27 GHz                  | 1,11-1,67 cm            | sont utilisées pour la détection des gouttelettes de nuages en météorologie et dans les radars routiers.                                  |
| Ka                  | 27-40 GHz                  | 0.75-1.11 cm            | pour la cartographie, la courte portée, la surveillance au sol des aéroports, les radars routiers (34.300 ± 0.100 GHz).                   |
| mm                  | 40-300 GHz                 | 1 -7,5 mm               | Bande millimétrique subdivisée en quatre parties :                                                                                        |
| Q                   | 40-60 GHz                  | 5 mm -7.5 mm            | Utilisée pour les communications militaires.                                                                                              |
| V                   | 50-75 GHz                  | 6.0 -4 mm               | Très fortement absorbée par l'atmosphère.                                                                                                 |
| E                   | 60-90 GHz                  | 6.0 -3.33 mm            |                                                                                                                                           |
| W                   | 75-110 GHz                 | 2.7 -4.0 mm             | Utilisée comme radar anticollisions automobile et pour l'observation météorologique à haute résolution.                                   |

Tableau 2.1 Plage de fréquences radar

#### II.4 Domaines d'application des radars

Les radars sont utilisés dans plusieurs domaines comme suit [2, 3, 9,11, 18, 21,25] :

➤ **Militaire :**

- ✓ Radars de détection et de surveillance aérienne au sol ou embarqués.
- ✓ Radars de veille surface sur navire de guerre.

- ✓ Identification radar IFF (Identification Friend or Foe).
- ✓ Autodirecteurs de missiles.
- ✓ Brouilleurs radars
- ✓ satellites radar d'observation de la terre
- **Aéronautique :**
  - ✓ contrôle du trafic aérien.
  - ✓ guidage d'approche d'aéroport.
  - ✓ radars d'altimétrie.
  - ✓ radars de navigation.
- **Maritime :**
  - ✓ Radar de navigation.
  - ✓ Radars anti-collision.
  - ✓ Balises radars.
- **Météorologie :**
  - ✓ Détection de précipitations (pluie, neige, grésil, grêle, etc.) et déformations nuageuses.
- **Circulation et sécurité routière :**
  - ✓ Contrôle de la vitesse des automobiles (cinémomètre).
  - ✓ Radars de recul sur automobiles.
- **Radar fixe :**
  - ✓ Détection et mesure de vitesse jusqu'à 300 km/h
  - ✓ Portée de l'ordre de 50 mètres
  - ✓ Précision de vitesse de la classe  $\pm 3$  km/h

## II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une description de chaque classe des systèmes radar duquel on a montré quelques avantages selon les besoins techniques. Ensuite, on a illustré le principe de fonctionnement de chaque classe, les plages des fréquences utilisées et leurs domaines d'applications.

## ***CHAPITRE III***

### ***Radar secondaire et ses évolutions***

### III.1 Introduction

Le radar est né d'un long processus de développement des différentes composantes qui le compose et du concept de télédétection. Ceux-ci furent accélérés par les événements mondiaux qui ont abouti à la Seconde guerre mondiale. La défense anti-aérienne se profilant comme un élément clé de cette guerre, personnel et investissements furent alloués dans de nombreux pays pour la recherche dans ce domaine, en particulier en Grande-Bretagne.

Le radar classique, dit radar primaire, qui en résulte est une technologie ne nécessitant pas la coopération de la «cible». Il sonde l'atmosphère et repère tout ce qui s'y trouve à l'intérieur de sa portée utile. Est-il besoin d'un autre système .

En fait, les cibles peuvent être «amies» ou «ennemies» mais rien dans l'information du radar primaire ne permet de les distinguer. Par contre, si une cible amie peut répondre au faisceau radar par un signal convenu, le radar peut la distinguer des autres cibles. Ce principe connu un premier développement durant la guerre, mais c'est surtout dans l'avion civile d'après la guerre et l'introduction du transpondeur (contraction de transmitting responder) qu'il a vraiment prit son envol.

Le message codé ne permettait à l'origine que de donner l'affiliation de l'appareil et ainsi de reconnaître les avions de sa propre flotte dans un ciel bondé d'avions se pourchassant. Maintenant, le message contient beaucoup plus d'information dont l'altitude, le type d'avion, des détails techniques de fonctionnement, etc.

### III.2 Principe du radar secondaire

Le schéma ci-dessous représente un radar secondaire interrogeant un avion et traduisant les informations reçues sur un écran [1,23,24,27].

Ce système radar secondaire est également désigné par le sigle anglo-saxo SSR secondary surveillance radar .Un système utilisant les mêmes principes, fonctionnant sur les même fréquences mais réalisant des fonctions différentes est exploiter pour des besoins militaire ,il est connu sous l'appellation IFF Identification Friend or Foe [1,23,24,27].

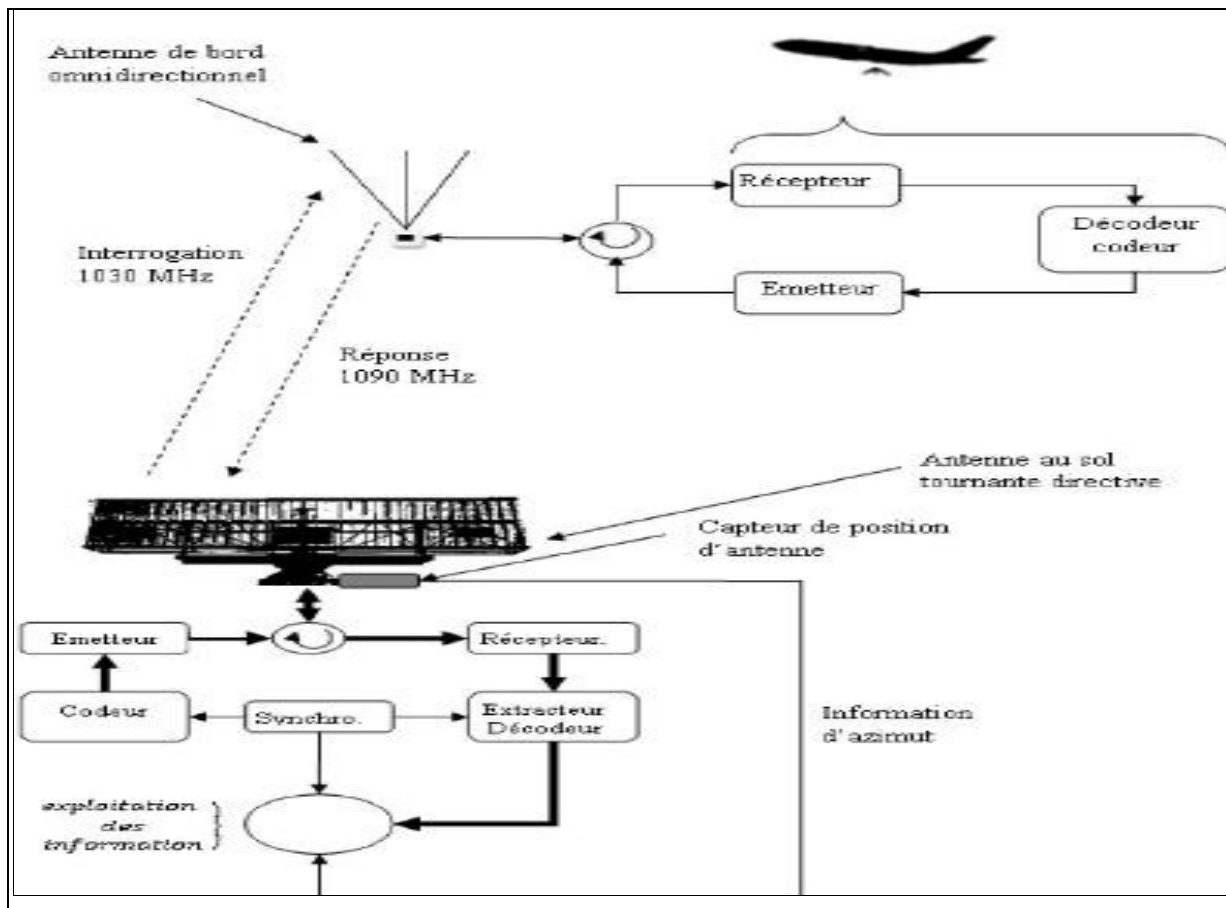


Figure 3.1 Principe du radar secondaire

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.

### ***Qu'est-ce qu'un code?***

Pour les radars secondaires de surveillance (RSS) classiques, non ceux de Mode-S (Selective), le choix de questions à poser à l'appareil en vol est simple: identification et altitude (car le radar primaire de surveillance ne donne que de l'azimut et la distance). Ces questions déterminent le **MODE** opérationnel et le transpondeur répond selon le **CODE** approprié.

### ***Quel est ton niveau de vol ?***

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

### *Qu'est-ce qu'un transpondeur*

Un **transpondeur** est un dispositif électronique qui émet une réponse quand il reçoit une interrogation par radio. En aéronautique, les avions possèdent des transpondeurs pour aider à leur identification par les radars et aussi comme système anti-collision.



Figure 3.2 Transpondeur moderne[8]

#### III.2.1 Interrogation du sol

Le radar secondaire doit agir en synchronisation avec les impulsions du radar primaire. Pour ce faire:

- Les impulsions du radar secondaire contiennent un signal provenant du **codeur** qui indique le mode d'interrogation choisi (le code envoyé correspond à une ou des questions auxquelles l'avion doit répondre[1,24,27]).
- Le **transmetteur** module les impulsions à la radiofréquence d'émission. Celle-ci sera différente de celle de la réponse de l'avion, évitant l'électronique complexe d'un duplexeur.
- L'**antenne** du radar secondaire est habituellement montée au sommet du radar primaire et tourne en même temps que ce dernier permettant la synchronisation spatiale[23,24,27].

#### III.2.2 Transpondeur dans l'avion

L'avion doit être muni d'une antenne de réception et d'un transpondeur. Leurs rôles sont :

- Le **récepteur** amplifie et démodule les impulsions d'interrogation
- Le **décodeur** interprète le code envoyé et le transforme en questions à répondre
- Le **codeur** prend différentes informations demandées à partir des instruments de l'avion et encode la réponse

- Le **transmetteur** amplifie, module et transmet la sortie du codeur à la radiofréquence de réponse[10, 16,19].

### III.2.3 Retour à l'interrogateur au sol

- Le **récepteur** amplifie et démodule les impulsions de réponse. Le brouillage et les interférences sont filtrés en autant que possible.
- À partir du «mode» et du «code», le **décodeur** extrait la réponse de l'avion.
- La position des échos et leur intensité, tirées du radar primaire, sont ajoutées sur l'écran d'affichage à l'information synchrone obtenue par le radar secondaire.

Le problème est donc de coordonner l'interrogation entre l'appareil en vol et le radar secondaire pour obtenir une pleine coopération. Les paramètres des données échangées doivent être reconnus et approuvés par les deux. Ceci n'est pas difficile dans un environnement militaire, car c'est souvent le même manufacturier qui a conçu le radar et le transpondeur. Mais dans le domaine civil, il a fallu établir un protocole standard international afin que les radars secondaires et les transpondeurs fabriqués par des fournisseurs différents puissent se parler[1,24,27].

### III.3 Fonctions radar secondaires

La liaison radar secondaire doit assurer les fonctions de [27]:

1. Detection
  2. Mesure de distance
  3. Mesure d'azimut
  4. Identification de la cible
  5. Report d'altitude
- Les deux dernières fonctions citées nécessitent la coopération ACTIVE de la cible sous la forme de l'envoi d'un répondeur désigné par la suite comme transpondeur.
  - La liaison radar secondaire présente de ce fait une structure tout à fait différente de celle étudiée en radar primaire. Elle se décompose en deux liaisons distinctes et un traitement transpondeur:
    - Liaison radar secondaire –transpondeur : émission par le radar d'une interrogation codée, demande d'identification ou de report d'altitude
    - Liaison transpondeur-radar secondaire : réception de la réponse transpondeur.

- traitement transpondeur : reception, decodage de l'interrogation radar, encodage et emission de la réponse.

### III.4 Pincipes des traitements à la reception radar secondaire

- ✓ **Detection:** reconnaissance d'une structure de réponse donc seule un transpondeur en fonction peut être détecté.

- Avantage: pas de réponses indésirables, sol, perturbation météo...etc.
- Inconvenient: une panne transpondeur empêche l'établissement de la liaison donc toutes fonction radar secondaire.

- ✓ **Mesure de distance :**

Mesure de temps entre émission radar reception radar ,principe identique à celui en œuvre en radar primaire et caractérise par la même équivalence temps distance .Ceci ,au retard systématique prés introduit par le traitement transpondeur.En radar la distance était fonction du temps en utilisant la relation :

$$D = \Delta T / 2 \dots\dots\dots(III.1)$$

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 de 3  $\mu$ s qui sera soustrait par le radar [1,24,27]. D devient:

$$D = C (\Delta t - t_r) / 2 \dots\dots\dots(III.2)$$

- ✓ **Mesure d'azimut:** utilisation d'une antenne directive en azimut la fonction surveillance étant obtenue par exploration panoramique.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[24,27].

- ✓ **Identification et report d'altitude :** décodage de la réponse transpondeur.

L'utilisation de deux fréquences distinctes assure l'indépendance des liaisons radar-transpondeur et transpondeur –radar .En particulier toutes réflexion de l'interrogation sur un obstacle puis retour vers le radar ne génèrera pas la réception des réponses .les fréquences choisies doivent être universelles pour autoriser des liaisons immédiates entre radar et transpondeurs [16,24].

- Fréquence radar - transpondeur 1030 MHZ.

- Fréquence transpondeur - radar 1090 MHZ.

### III.5 Structure des interrogations (modes)

#### III.5.1 Formats d'interrogation

Le format des messages d'interrogation, aussi appelé liaison ascendante, dans le code Mark X standard est très simple et consiste en deux impulsions d'intensité standard (P1 et P3) de 0,8  $\mu$ s de durée et qui sont séparées par un intervalle déterminant le type de question. Le tableau 1 montre le sens de cet intervalle dans les codes militaires et civils.

Le mode militaire **1** est habituellement utilisé pour connaître le rôle de l'appareil, sa mission ou son type (plusieurs avions peuvent donc avoir la même réponse).

Le mode militaire **2** sert à demander l'identificateur particulier de l'appareil, code qui est habituellement assigné à sa cellule avant le décollage.

Le mode **3** et le mode **A** civil sont identiques et sont donc souvent mentionnés ensemble comme **3/A**. Les deux demandent l'identificateur d'un appareil en vol. Comme les transpondeurs sont limités à une réponse de 12 bits (détails plus loin), seulement 4096 identificateurs sont possibles. Ceux-ci sont assignés par les contrôleurs aériens de la région survolée. L'identificateur donné par le contrôleur est entré par le pilote dans son transpondeur sous forme d'un nombre octal de 4 chiffres. Il peut être modifié durant le vol selon les besoins du contrôle aérien[17,24,27,28].

L'autre information essentielle, la pression-altitude, pour le contrôle aérien est obtenue par le mode C. Celle-ci est calculée par la conversion de la pression au niveau de vol en altitude ou par altimètre radar. Les modes civils B et D, bien que définis, ne furent jamais utilisés par le contrôle aérien et les radars secondaires sont souvent décrits comme en mode A/C.

Ce ne sont pas tous les aéronefs qui peuvent répondre aux différents modes d'interrogation. Les transpondeurs des appareils militaires peuvent en général répondre aux modes 1, 2 et 3/A. Seulement certains peuvent aussi répondre au mode C. Les appareils civils ne reconnaissent généralement pas les modes 1 et 2 mais vont réagir au mode 3/A et la plupart au mode C.

Le système d'interrogation au sol va donc utiliser alternativement les différents modes dans une rotation entrelacée. Ainsi les radars secondaires civils vont alterner entre le mode A et le mode C, on parle donc de rotation AC. Les radars militaires vont eux alterner les modes civils (A et C) et militaires (1 et 2), par exemple une rotation entrelacée 1AC2AC.

Certains systèmes militaires de reconnaissance ami-ennemi (IFF) vont aussi inclure le mode 4. Ce mode est fort différent et utilise plusieurs impulsions et des données encryptées que seuls les avions ayant la clé correspondante peuvent déchiffrer.

L'impulsion P2, est utilisé pour la suppression des lobes secondaires et sera décrite plus tard [17,24,27,29].

- L'interrogation est codée par paires d'impulsions notées P<sub>1</sub>-P<sub>3</sub>. ces impulsions ont une largeur de 0.8µs et le temps les separant est représentatif de l'interrogation .

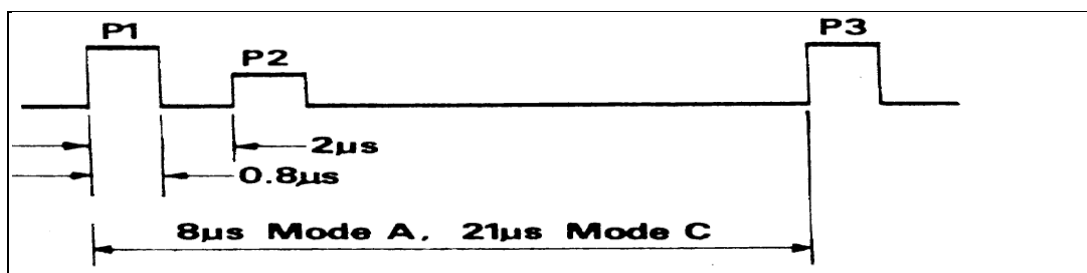


Figure 3.3 Forme de signal d'interrogation

L' Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) a normalisé 4 modes désignés par les lettres :A,B,C et D la structure et les fonctions de ces modes sont présentées [29] ci-dessous:

L'interrogation est periodique de periode fixée par des impératifs de portée :la réponse d'une cible se trouvant en limite de portée doit parvenir avant une nouvelle interrogation ,pour des portées de l'ordre de 200NM , la periode choisie sera proche de 2.5ms,soit une fréquence de répétition de 400HZ .

L'utilisation d'une antenne directive (ouverture à -3dbθ),à exploration panoramique (vitesse de rotation  $V_r$  et d'une interrogation periodique (periode  $T_r$ ),permet de conclure qu'un transpondeur sera frappé de  $N$  interrogation et fournire un nombre équivalent de réponses s'il se trouve dans le volume de détection avec :

$$N = \frac{\theta}{V_r T_r} \dots \dots \dots (III.3)$$

| Mode      |          | Intervalle<br>entre<br>P1 - P3                     | Description                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------|----------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| militaire | civil    |                                                    |                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>1</b>  |          | <b>3 (<math>\pm 0.2</math>) <math>\mu</math>s</b>  | <u>Identification militaire</u><br>Le mode 1 militaire sert comme identifiant pour l'un des 32 codes de mission (type, rôle, etc.), bien que le mot ait 5 bits et puisse donc supporter 4096 codes. Il est peu utilisé en temps de paix. |
| <b>2</b>  |          | <b>5 (<math>\pm 0.2</math>) <math>\mu</math>s</b>  | <u>Identification militaire</u><br>Le mode 2 militaire est similaire au code A civil et sert à demander l'identificateur de l'appareil en vol. Il comporte 4096 valeurs distinctes.                                                      |
| <b>3</b>  | <b>A</b> | <b>8 (<math>\pm 0.2</math>) <math>\mu</math>s</b>  | <u>Identification civile / militaire</u><br>Sert à demander l'identificateur à l'appareil civil ou militaire en vol. Il comporte 4096 valeurs distinctes. C'est le mode le plus courant.                                                 |
|           | <b>B</b> | <b>17 (<math>\pm 0.2</math>) <math>\mu</math>s</b> | <i>Pas en usage</i>                                                                                                                                                                                                                      |
|           | <b>C</b> | <b>21 (<math>\pm 0.2</math>) <math>\mu</math>s</b> | <u>Mode civil pour la pression-altitude</u><br>Le mode C est utilisé pour demander à l'appareil en vol le niveau de vol standard correspondant à la pression extérieure, ou l'altitude exacte si celle-ci est mesurée directement.       |
|           | <b>D</b> | <b>25 (<math>\pm 0.2</math>) <math>\mu</math>s</b> | Jamais utilisé                                                                                                                                                                                                                           |

Tableau 3.1 Structure des modes d'interrogation[8]

**Remarque** : pour les unités habituellement utilisées ;  $\theta$  en degrés ,  $V_r$  en tours par minutes ,  $T_r$  en secondes le nombre de coup en but  $N$  est donné par [16]:

$$N = \frac{\theta}{6V_r T_r} \dots \dots \dots (III.4)$$

Ce potentiel de transactions interrogations-réponses permet de satisfaire toutes les fonctions radar secondaires pendant le passage du faisceau d'antenne devant le transpondeur .Il suffit d'alterner sur plusieurs recurrences les interrogations d'identification et de report d'altitude . La séquence succession des modes dite ``entrelacement des modes`` est déterminé sur 3 ou 4 recurrences succesives le motif ainci défini se repetant périodiquement

### **Exemple**

un entrelacement AAC représente l'émission des modes AACAACAACAAC pour  $N=27$  , on disposera pour le traitement de 18 réponses d'identification et 9 réponses d'altitude .

## **III.5.2 Structure de la réponse**

### **Message de réponse**

Le format de réponse du radar secondaire de surveillance (RSS) est formé de plusieurs impulsions de  $0,45 \mu s (\pm 0,1 \mu s)$  de durée. Les impulsions  $F_1$  et  $F_2$  sont toujours présentes et séparées de  $20,3 \mu s (\pm 0,1 \mu s)$ . Elles sont appelées les parenthèses ou les appuie-livres. Les autres impulsions sont séparées de  $1 \mu s$  et servent à transmettre l'information demandée (ex. en mode A, l'identificateur, et en mode C, la pression-altitude)[17,23,24,27,29].

Les impulsions donnent les bits du code octal (ABCD) correspondant à l'information demandées. L'impulsion en position X est omise. Une impulsion dans les trois positions vides de la figure peut mener certains décodeurs radar à rejeter l'information comme étant de l'interférence [24,28].

Dans le mode A, le **code octal (ABCD)** provident du panneau de contrôle dans le cockpit. Dans le mode C, le niveau de vol est encodé par une forme spéciale du code **Gray** connu comme le code **Gillham**. L'alticodeur donne ainsi l'altitude non corrigée de l'aéronef au transpondeur sous la forme d'une suite de 11 bits. Il change un seul bit à la fois pour marquer un changement de pallier d'altitude standard, réduisant ainsi les risques d'erreurs.

L'impulsion d'identification à usage spécial ou **SPI (Special Purpose Identification)** est utilisée par le contrôleur aérien pour confirmer l'identité de l'appareil en vol (cette fonction a été développée avant le traitement moderne des données qui peut modifier l'affichage à volonté).

Le contrôleur va demander au pilote d'envoyer l'identification de l'appareil grâce à un bouton sur son tableau de bord. Cela ajoute la SPI à la réponse au radar secondaire durant un

certain intervalle de temps ( $18 \pm 1$  s). Elle va être interprétée comme une demande de rehaussement de l'écho de cet avion à l'écran aussi longtemps que le SPI est reçu.

La position décalée de l'impulsion SPI par rapport aux autres impulsions est un peu étrange et introduit une complication supplémentaire au décodage automatique qui sera expliqué plus tard. Selon les normes de l'OACI, l'impulsion SPI ne sera ajoutée qu'en mode A.

Il est possible d'ajouter d'autres questions prédéterminées selon les standards internationaux, mais seulement dans certaines situations.

Il est à noter que l'information codée transmise ne mentionne pas le mode qui est à l'origine de l'interrogation et elle est donc interprétée par le décodeur au sol selon le dernier mode utilisé. Si la réponse à un mode donné arrive au radar secondaire après qu'un autre mode ait été envoyé, il y aura confusion d'interprétation.[1,10 ,24 ,31] Par exemple:

- 7700 en mode 3/A est une urgence aérienne générale
- 7700 en mode C veut dire une altitude de 20000 pieds.

### III.6 Résumé sur la structure des codes

La réponse du transpondeur est constituée d'un train d'impulsions. On distingue :

- deux impulsions dites d'encadrement appelées F 1-F 2. Elles sont espacées de 20,3  $\mu$ s. Ces impulsions sont toujours présentes ; Ce sont elles qui permettent la mesure de distance et d'azimut.
- 12 impulsions d'information situées entre les impulsions F1-F2 ; chaque impulsion code l'information par sa présence ou par son absence .On peut donc coder la réponse sur 12 bites, donc composer 4096 combinaisons [8, 24,27].

Ces 12 impulsions sont rassemblées en 4 groupes de 3 impulsions et sont désignées par

|    |    |    |
|----|----|----|
| A4 | A2 | A1 |
| B4 | B2 | B1 |
| C4 | C2 | C1 |
| D4 | D2 | D1 |

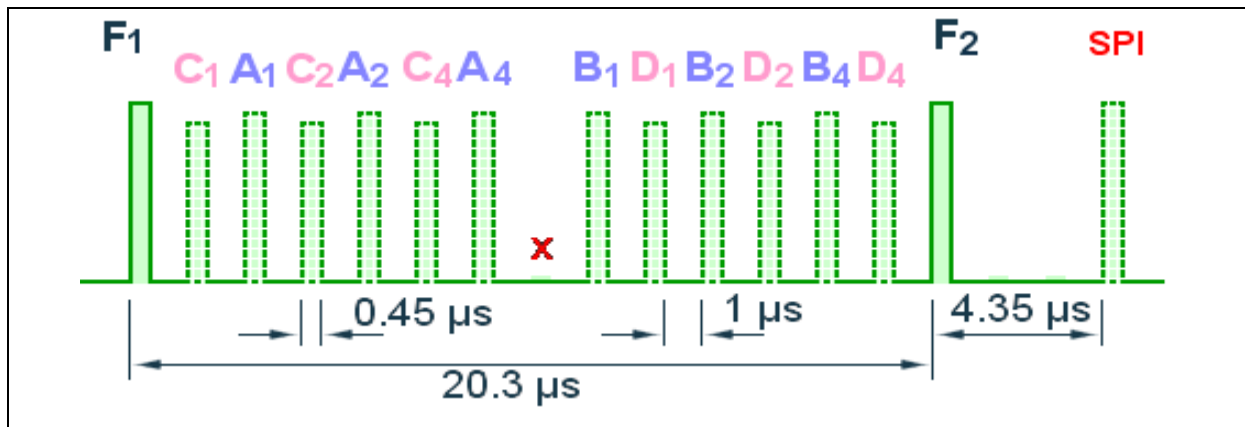
La combinaison de chaque groupe peut être interprétée comme décomposition binaire d'un chiffre de 0 à 7 ce qui justifie le choix des indices 1, 2,4 poids des impulsions consistées sur cette base.

Un code radar secondaire sera donc facilement désigné sous la forme de 4 chiffres de 0 à 7.

Exemple : le code 3256 fera apparaître les impulsions :

|    |    |    |
|----|----|----|
| .  | A2 | A1 |
| .  | B2 | .  |
| C4 | .  | C1 |
| D4 | D2 | .  |

L'emplacement des impulsions être F1 et F2 est représenté ci-dessous



**Figure 3.4 Structure des réponses[8]**

La disposition adoptée laisse un emplacement vacant quel que soit le code. Cet emplacement est désigné sous le terme 'X' : la reconnaissance d'une impulsion à cet endroit est le signe d'un code faux.

Une impulsion spéciale, située à 4,35 µs après F2, peut être présente par action du pilote sur un bouton. C'est l'impulsion SPI (Spécial Pulse Identification). L'émission de l'impulsion SPI est limitée dans le temps (de 15 à 30 secondes).

Sur la face avant du transpondeur, le pilote affiche le code qui va permettre l'identification de l'avion. Cela est réalisé à l'aide de quatre roues codeuses à 8 positions (de 0 à 7).

Quant à l'altitude, elle est transmise automatiquement grâce à l'alticodeur situé à bord de l'avion.

| Code     | Modes        | Interprétation            |
|----------|--------------|---------------------------|
| 7700     | 3/A, B       | Urgence aérienne générale |
| 7600     | 3/A, B       | Perte de radio            |
| 4· frame | 1, 2, 3/A, B | Urgence militaire         |
| 7500     | 3/A          | Détournement d'avion      |

Tableau 3. 2 : Exemples de codes[8]

### III.7 Les phénomènes parasites

#### III.7.1 Les réponses sur lobes secondaires

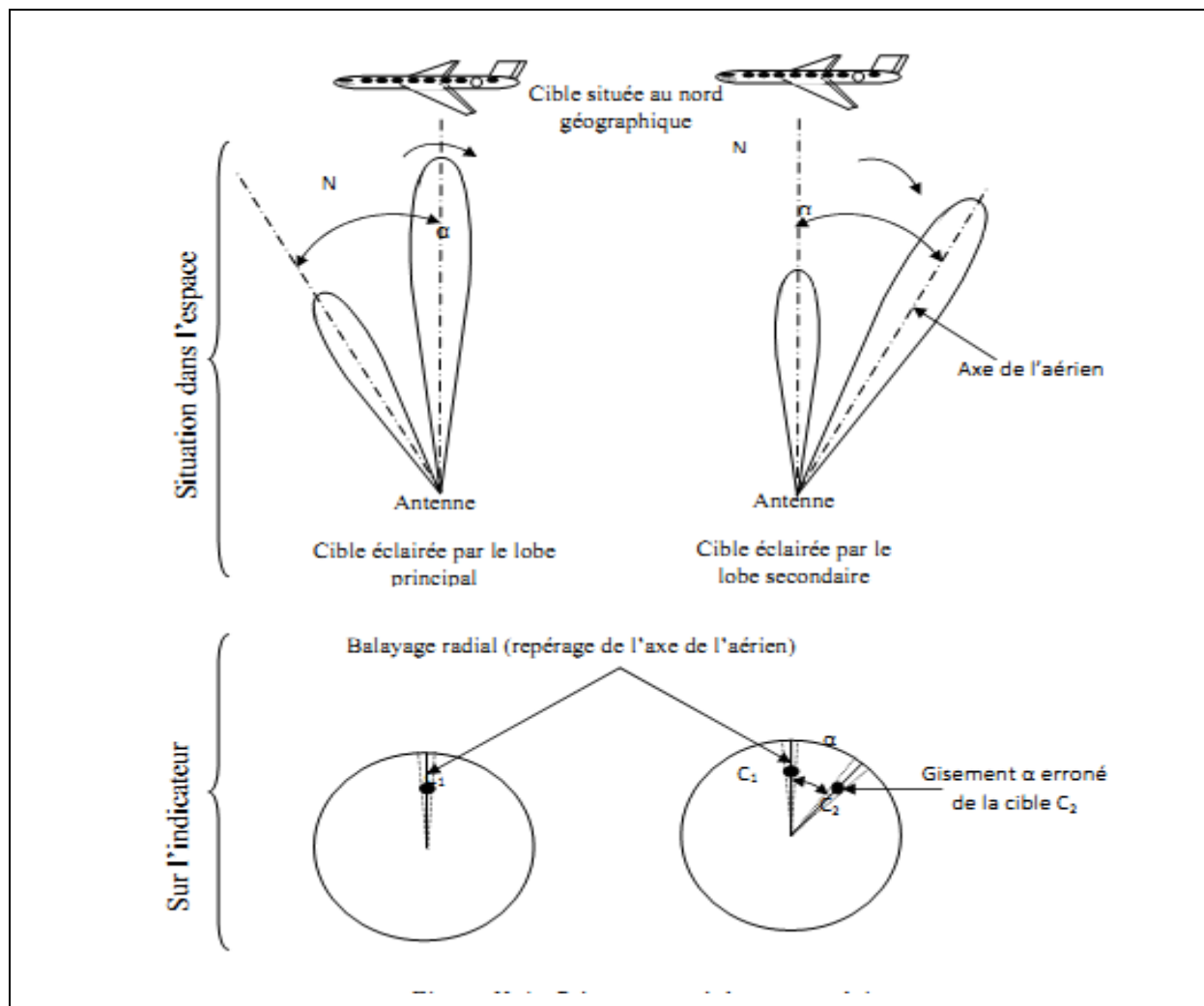


Figure 3.5 Réponses sur lobes secondaires

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[23, 24,27,28].

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

### III.8 Problèmes d'interférences pour le radar secondaire

Comme le récepteur du radar secondaire n'a pas à être aussi sensible que celui d'un radar primaire, le problème principal d'interférences est le brouillage. Il se divise en perturbations synchrones et asynchrones.

Deux types sont souvent désignés de façon mnémotechnique par:

- Fruit: réponses asynchrones provenant du même appareil interrogé par deux radars secondaires différents. Ceci donne des lignes d'échos en forme d'hélices sur un affichage PPI ce qui ressemble aux quartiers d'une orange coupée en deux.
- Enchevêtrement(GARBLING): réponses synchrones qui s'enchevêtrent dans le temps. Ceci se produit quand les réponses des transpondeurs de deux avions très proches l'un de l'autre, en distance ou en azimut, arrivent au radar ensembles. Il est alors impossible de les décoder.

En plus, il y a les interférences, synchrones et asynchrones, provenant de transpondeurs répondant à des interrogations différentes. En général, elles sont filtrées en réduisant automatiquement la sensibilité du récepteur radar et elles sont affichées à l'écran par un clignotement [23,24,27,28].

#### III.8.1 Le fruit

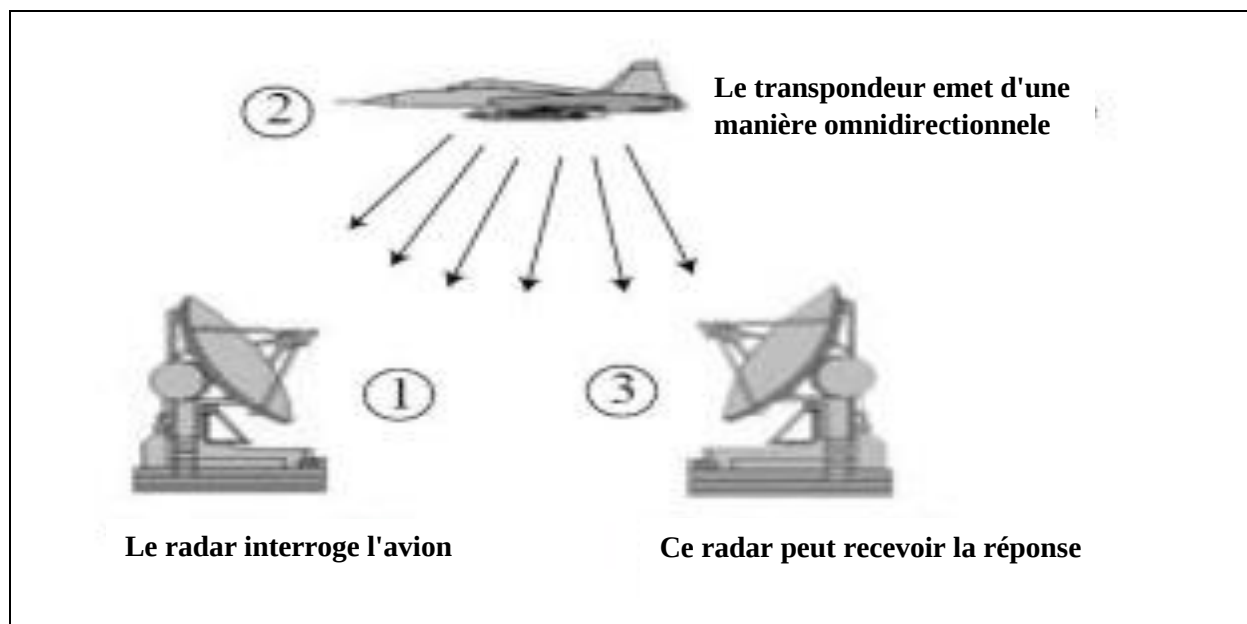
Tous les radars secondaires émettent **1030 Mhz** et les transpondeurs répondent de façon omnidirectionnelle sur **1090 Mhz**. Ces fréquences standards permettent aux avions de pouvoir passer d'une zone de contrôle aérien à une autre sans avoir besoin de changer à chaque fois les paramètres de leur transpondeur.

Cette réponse pourra cependant être captée par tous les récepteurs de radars secondaires ou de stations de contrôle terrestres situés dans la zone de rayonnement de l'émetteur de bord. Ainsi le récepteur d'une station B pourra détecter une réponse à une interrogation d'une station A dès l'instant où la cible C se retrouve dans la zone de recouvrement des couvertures de A et de B. Cette réponse, qui n'a pas de relation avec les interrogations successives de la station B, est appelée: **réponse asynchrone ou fruit**.

Le terme «**fruit**» est un acronyme anglophone ayant deux origines:

- **False Replies Un-synchronised In Time;**
- **False Replies Unsynchronised to Interrogator Transmission.**

Le fruit provient donc de réponses non sollicitées. Plus le trafic aérien avec transpondeurs augmente et que le nombre de stations terrestres se multiplie, plus ces interférences surviennent. Cela augmente le nombre de fausses détections et l'élimination de bonnes détections à cause du filtrage nécessaire pour essayer d'amenuiser son effet [23,24,27,28].



**Figure 3.6 Présentation fruit**

En radar secondaire les fréquences d'interrogation (1030 Mhz) et de réponse (1090Mhz) sont identiques (Normes OACIOrganisation de l'Aviation Civile Internationale). Le Radar 3 va recevoir et décoder les réponsesdu transpondeur 2 aux interrogations du radar [30,31].

### III.8.2 L'enchevêtrement (Garbling)

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[8,24,27].

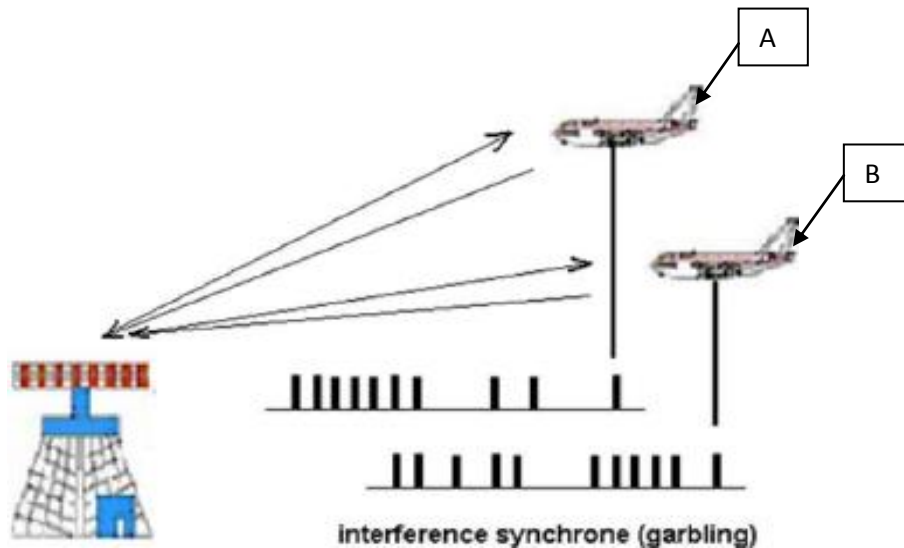


Figure 3.7 Garbling

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

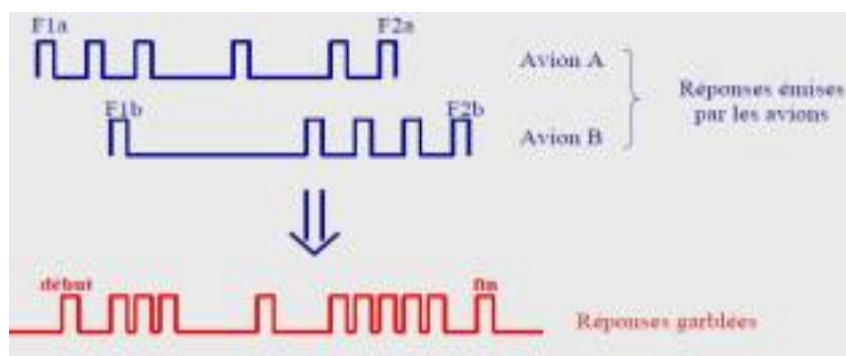


Figure 3.8 Réponse garblées

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 3km 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.

### **III.8.3 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.

Si l'on n'en prend pas garde la réponse à la première interrogation sera associée à la deuxième. La distance correspondra au  $\Delta t$  entre la deuxième interrogation et la réponse[24,27,28].

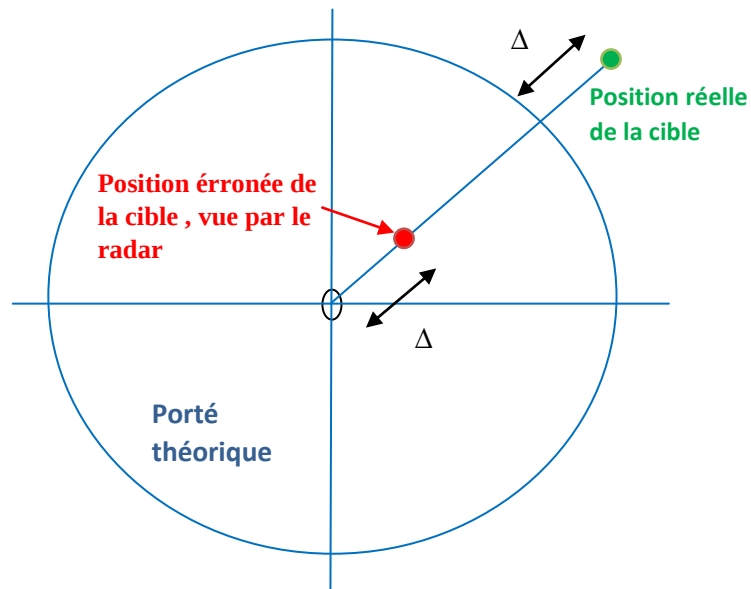


Figure 3.9 Réponses en deuxième récurrence

### III.8.4 Les réflexions

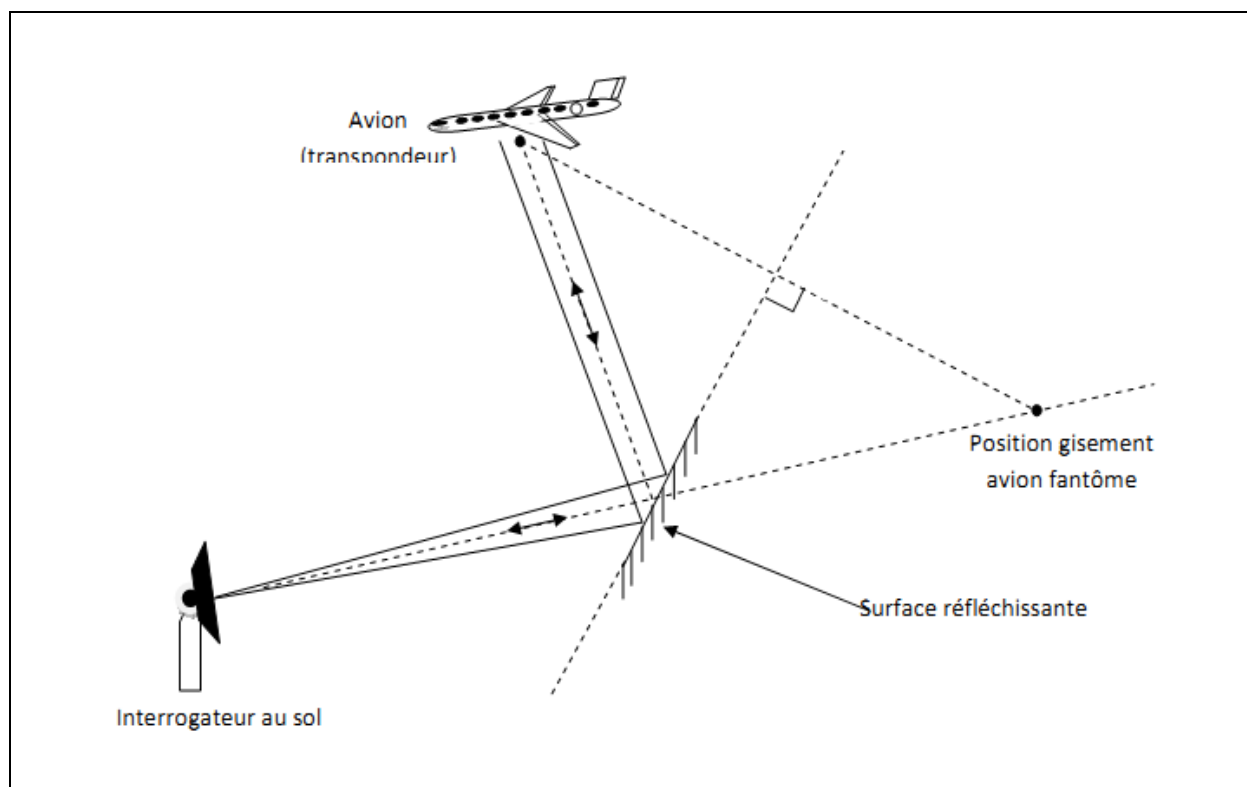


Figure 3.10 Les réflecteurs

Les signaux détectés par l'intermédiaire d'un réflecteur, donnent des mesures fausses en azimuth 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 trajectoire directe. Les réflecteurs produisent, à partir d'une cible vraie, une deuxième cible qu'il faut éliminer[24,27,28].

### III.9 Conclusion

Durant la seconde guerre mondiale le radar primaire a joué un rôle principal à la détection des cibles sans leur collaboration mais aussi sans permettre la différence entre cible amie ou ennemie d'où la nécessité d'avoir un autre système qui peut identifier les cibles. Ce système est appelé radar secondaire, son principe basé sur l'interrogation par une station au sol et une réponse par un équipement à bord appelé transpondeur. Dans cette partie, on a vu l'avantage du radar secondaire par rapport à celui du radar primaire en termes de la diminution d'énergie avec la distance et les informations fournies. Ensuite, nous avons expliqué les différents modes d'interrogation et les réponses du transpondeur. Finalement, on a présenté les phénomènes parasites rencontrés sur le radar secondaire comme les réponses sur lobes secondaires.

## ***CHAPITRE IV***

### ***Techniques de suppression des réponses sur les lobes secondaire***

### IV.1.Introduction

L'inconvénient majeur pour un radar secondaire classique est d'attendre plusieurs coups au but afin d'obtenir une information d'azimut d'où la nécessité de travailler avec des PRF (**P**ulse **R**epetition **F**requency) élevées, donc surcharge des calculateurs sol et à bord et par ricochet une augmentation des cas de FRUIT et même de GARBLING. Pour y remédier une technique révolutionnaire dénommée système monopulse est apparue [16].

### IV.2 Radar secondaire monopulse

Le système monopulse permet de récupérer l'information d'azimut sur une seule impulsion du code de réponse et par conséquent d'abaisser la valeur de la PRF à une centaine de Hertz.

Par ailleurs la précision en azimut se voit considérablement améliorée.

L'information d'azimut sera fournie à la fois par la position de l'axe d'antenne et par une information supplémentaire d'écart par rapport à cet axe [23, 24, 27,28].

#### IV.2.1 Principe du monopulse

L'idée de la monopulse consiste à exploiter la réponse d'une cible sur deux diagrammes différents un diagramme directif  $\Sigma$  (somme) est adjoint un diagramme supplémentaire  $\Delta$  (différence) 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.

La mesure monopulse est donc une mesure d'écart angulaire entre la direction de la réception et l'axe de l'antenne. Cette mesure se fait dans l'ouverture du lobe principal du diagramme directif [17,24, 27]. Cela correspond à la caractéristique de l'antenne. La mesure d'azimut (position de l'axe + écart) peut se faire sur une seule impulsion : d'où l'expression« monopulse »

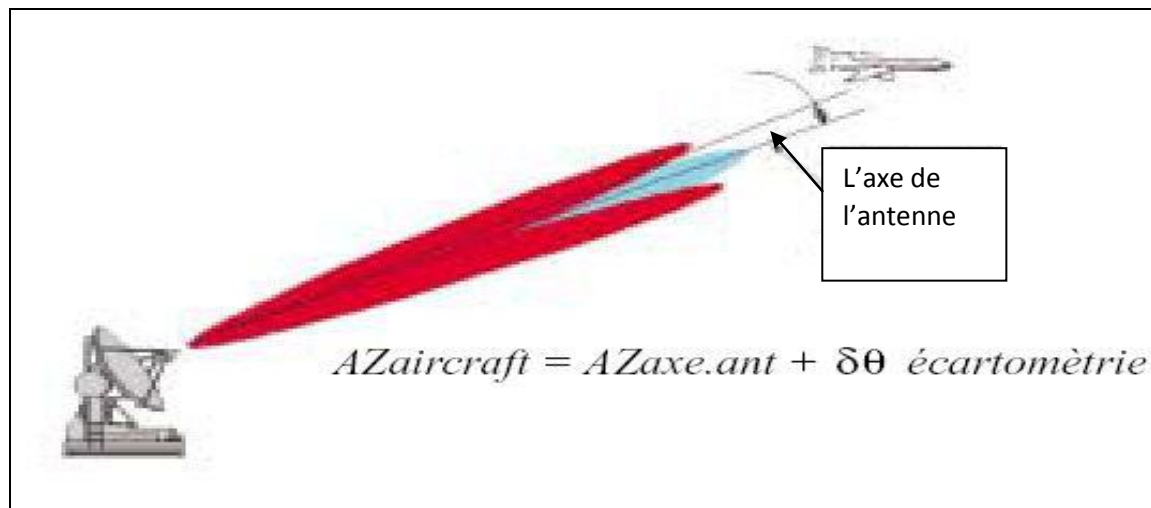
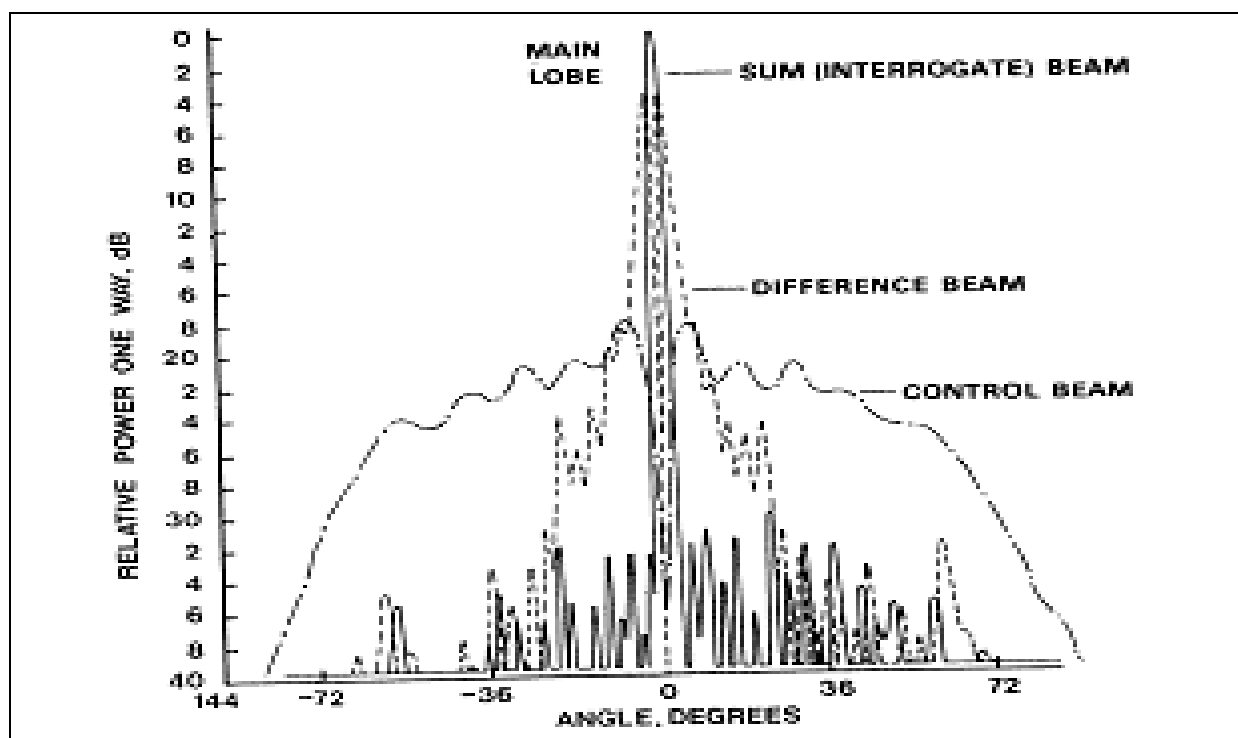


Figure 4.1 Principe monopulse [16]

Figure 4.2 Diagramme de  $(\Sigma)$ ,  $(\Delta)$  et  $(\Omega)$  en azimut [24]

### IV.2.2 La technique d'écartométrie :

La technique monopulse calcule l'écart entre l'axe de l'antenne et la position réelle de l'avion. L'information d'écart, notée  $\theta$ , et appelée couramment information d'« écartométrie » est fonction du rapport des champs (en module et en phase) des signaux électromagnétiques des réponses reçues dans les voies  $\Delta$  et  $\Sigma$  (figure 4.3).

Cette information est dotée d'un signe algébrique par le fait que:

- Le signal reçu issu du lobe  $\Delta+$  est en phase avec le signal reçu issu du lobe  $\Sigma$
- le signal reçu issu du lobe  $\Delta-$  est en opposition de phase avec le signal reçu issu du lobe  $\Sigma$

Les mesures d'écartométrie ne sont possibles qu'entre  $\pm 1,2^\circ$  par rapport à l'axe d'antenne, les limites étant obtenues lorsque le module de  $\Delta$  est égal au module de  $\Sigma$ .

Si le module de  $\Delta$  devient supérieur au module de  $\Sigma$ , on dit que le système d'écartométrie est saturé; il n'est plus pris en compte pour la mesure (figure 4.4).

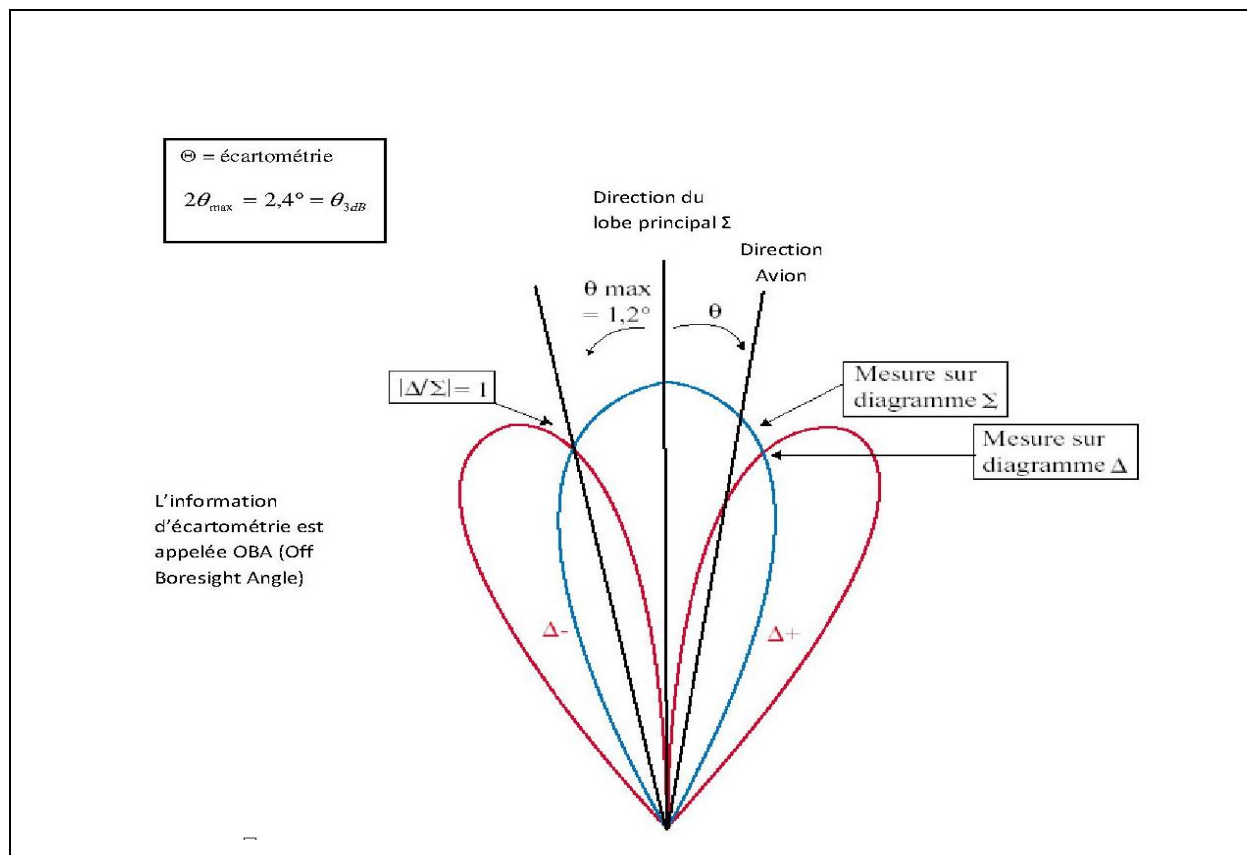
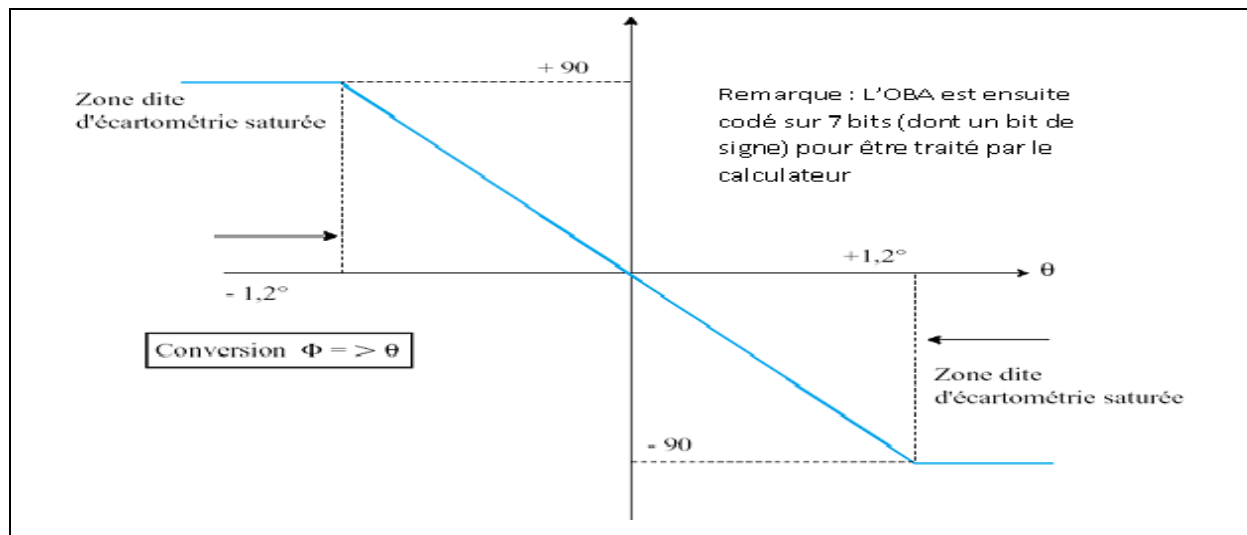


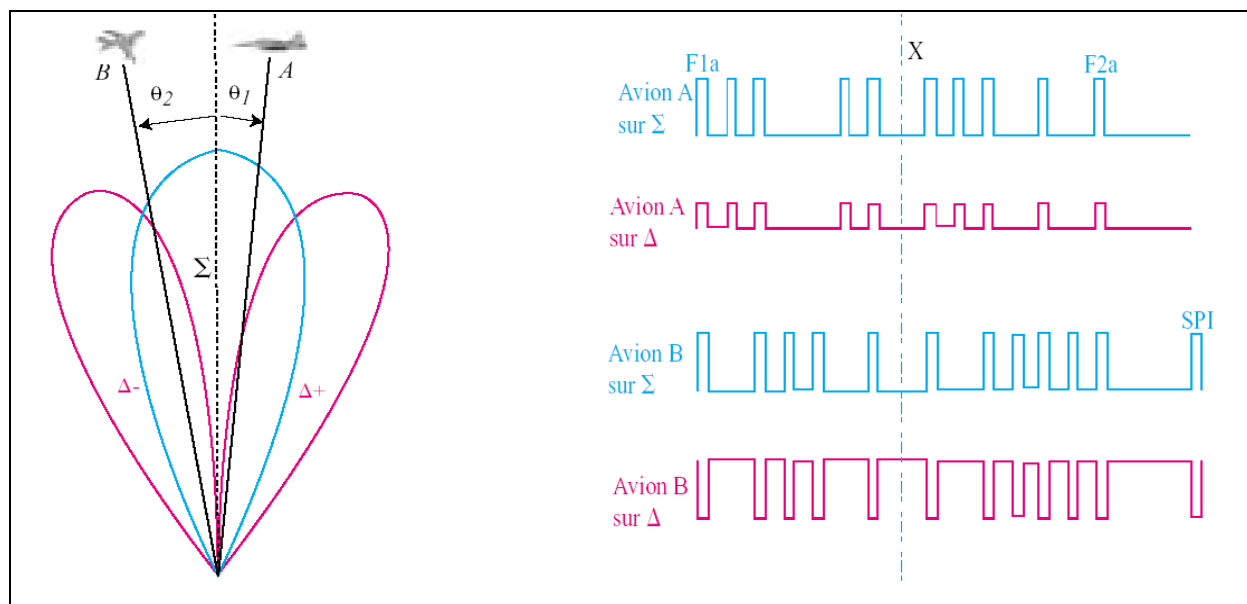
Figure 4.3 La technique d'écartométrie [16]



**Figure 4.4 Courbe écartométrie Off Boresight Angle (OBA)**

#### IV.2.3 Le signal reçu en monopulse

Les séquences d'interrogation du radar et les réponses du transpondeur seront identiques en monopulse Monopulse Secondary Surveillance Radar (SSR) qu'en secondaire Secondary Surveillance Radar (SSR). Seul la réception change avec l'apparition des antennes réseaux et le traitement de l'information  $\Delta$  [17,24,27,28].



**Figure 4.5 signal reçu en monopulse [16]**

On va résumer les associations d'éléments  $\Sigma$ ,  $\Delta+$ ,  $\Delta-$  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.

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

#### IV.2.4 Antenne monopulse ALE-9 (Alenia -9)

L'antenne ALE-9 qui est un réseau d'antennes secondaire monopulse type largement utilisé. Initialement commandé par le Selenia à une société australienne spécialisée dans les antennes de type réseau (Interscan), il a été perfectionné et adapté en Italie pour travailler avec des équipements de radar secondaire SIR-M (SECONDARY INTERROGATOR RECEIVER MONOPULSE) avant et récemment, avec des appareils fonctionnant en données Mode S sélective (SIR-S). L'antenne dispose de 35 radians plusieurs colonnes et une colonne arrière de back-rayonnement qui permet, grâce à un système hybride qui guide glisser à travers les signaux de transmission et de réception (différence de somme), pour fournir une seule barre (monopulse) l'emplacement exact, la direction et la distance de la cible, par rapport aux systèmes secondaires précédents qui avaient besoin de plus de répliques d'avion pour déterminer l'emplacement exact de la cible. Le dipôle de back-rayonnement transmet également un signal omnidirectionnelle sur le terrain (dit omega) qui sert à inhiber la réponse de l'aéronef monté transpondeur sur le centre de gravité de l'antenne, donc d'effectuer également la fonction SLS (Side Lobe Suppression) figure 4.7.

Donc une antenne ALE-9 est constituée d'un alignement de (35 +1) colonnes, chaque colonne contient 11 dipôles élémentaires (figure 4.9). de 1.9m d'hauteur , 8.4m de longueur et de poids de 430kg [17,24,27] .

L'antenne ALE-9 est utilisée pour transmettre les interrogations et recevoir les réponses des aéronefs, elle est divisée en trois sections.

- ✓ Parties latérales constituées de 8 colonnes.
- ✓ Partie centrale de 19 colonnes.
- ✓ Back-fill radiateur.

Les diagrammes  $\Sigma$ ,  $\Delta$  et  $\Omega$  correspondent à trois source rayonnant sous combinaisons différentes de ces éléments Ce qui est le plus caractéristique d'une antenne monopulse est leur organisation pour générer les diagrammes  $\Sigma$  et  $\Delta$  et  $\Omega$ .

- ✓  $\Sigma$  diagramme principal centré avec gain élevé (émission/réception).
- ✓  $\Delta$  diagramme monopulse procure l'information azimutale (réception).
- ✓  $\Omega$  diagramme SLS presque omnidirectionnelle (émission/réception)

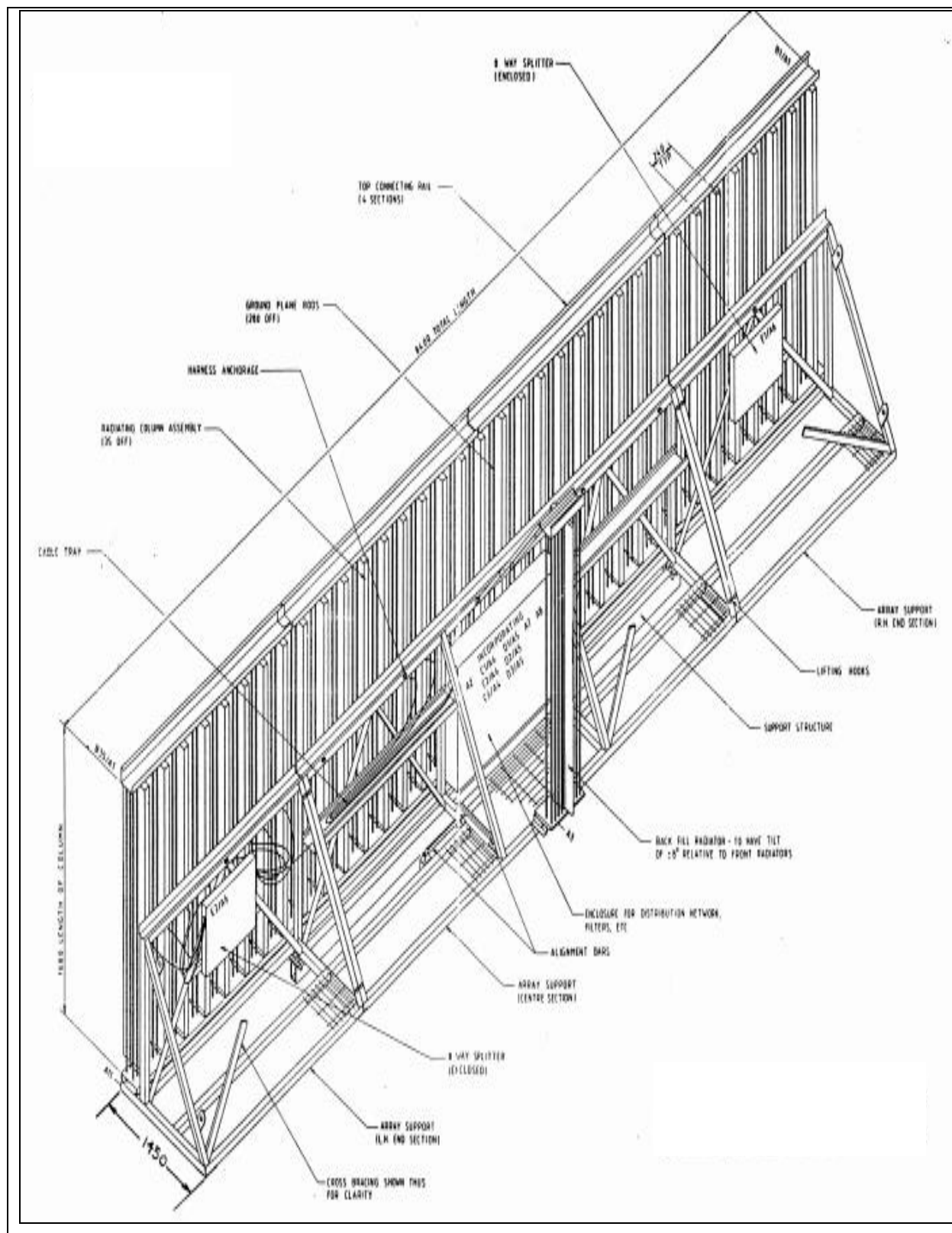


Figure 4.6 Antenne monopulse ALE-9 [17]

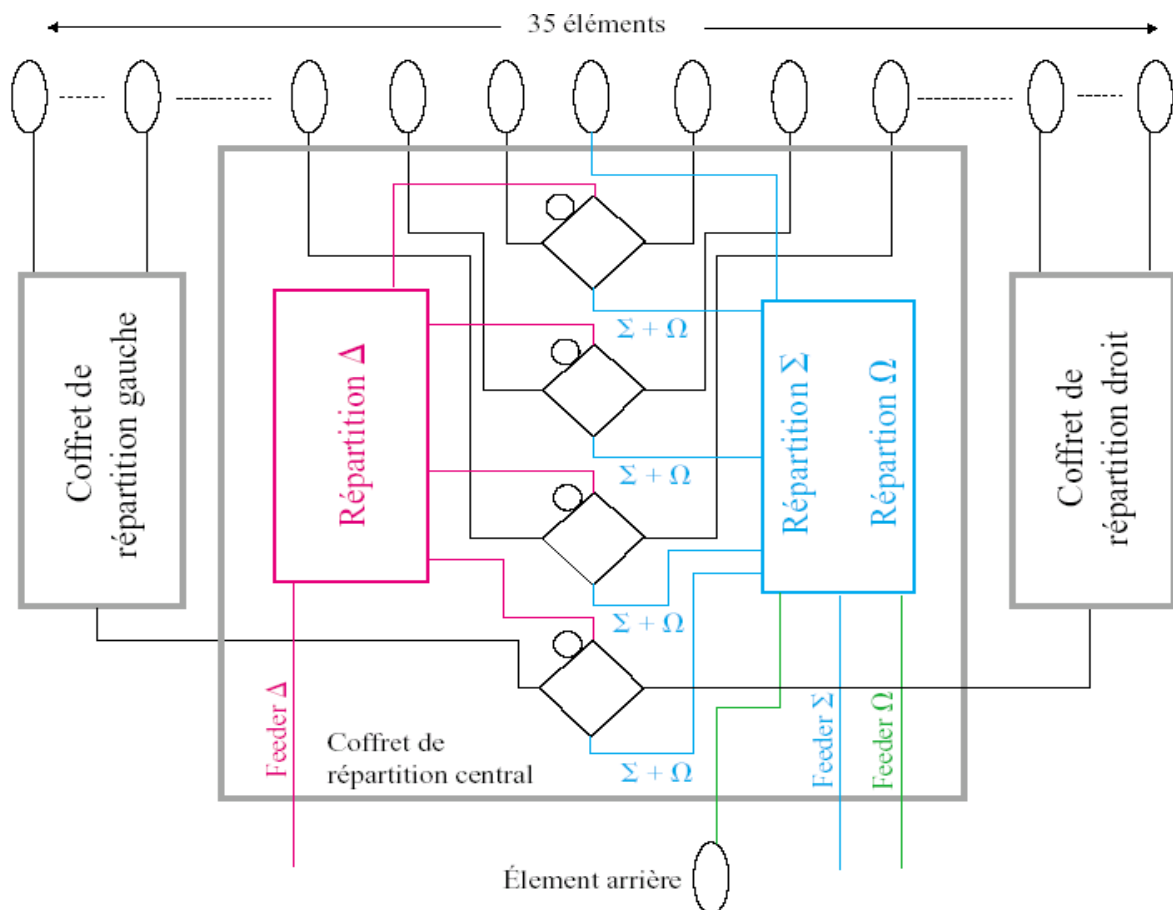


Figure 4.7 Distribution électrique de l'antenne monopulse ALE-9 [17]

#### IV2.5 Présentation des diagrammes de l'antenne ALE-9

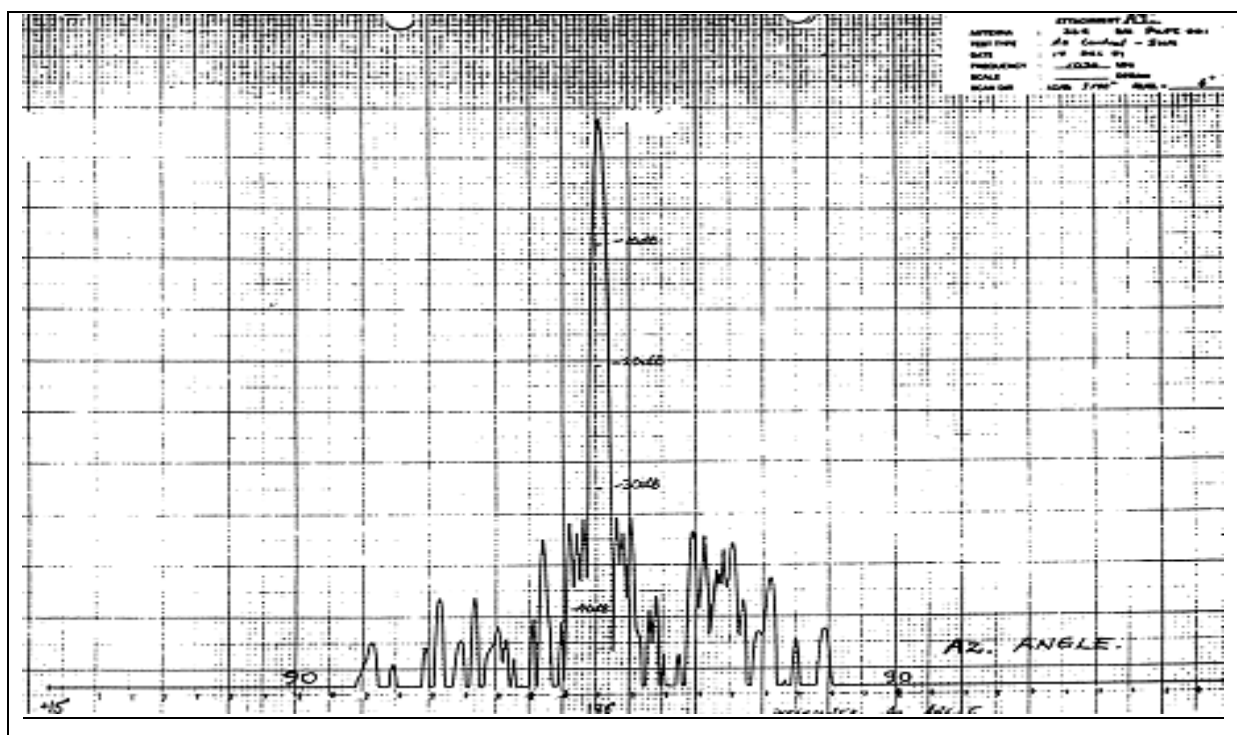
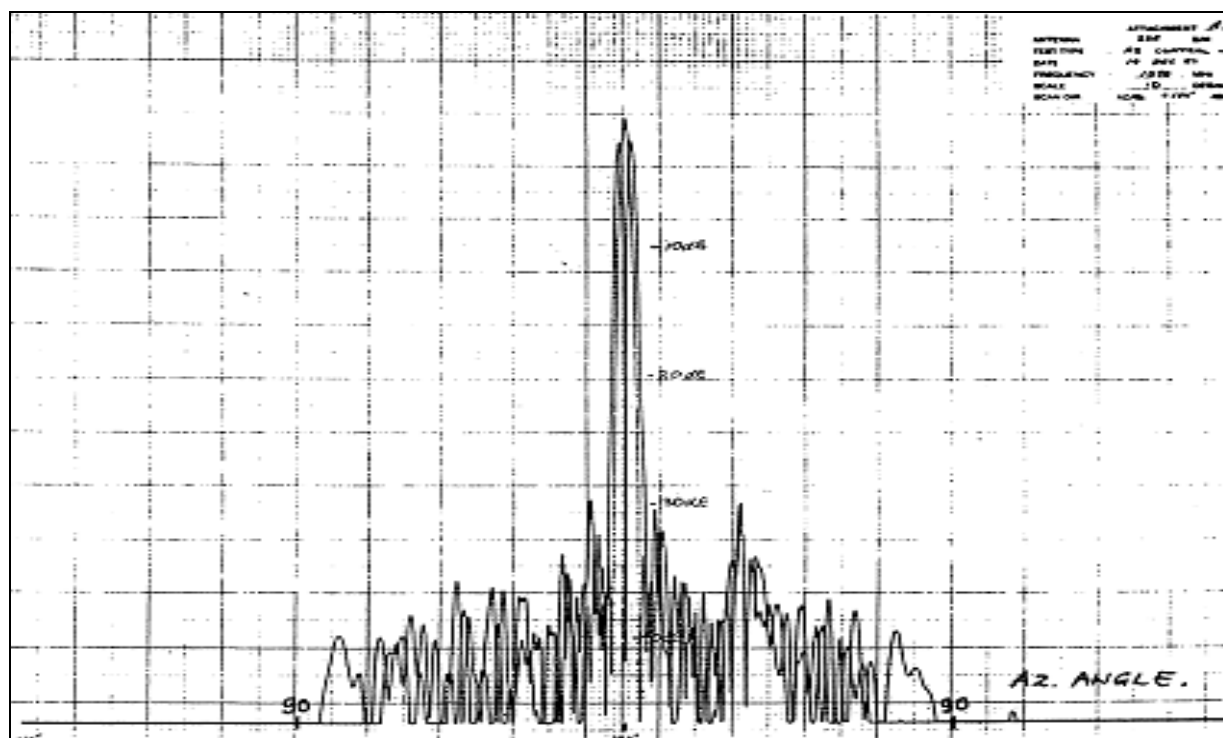
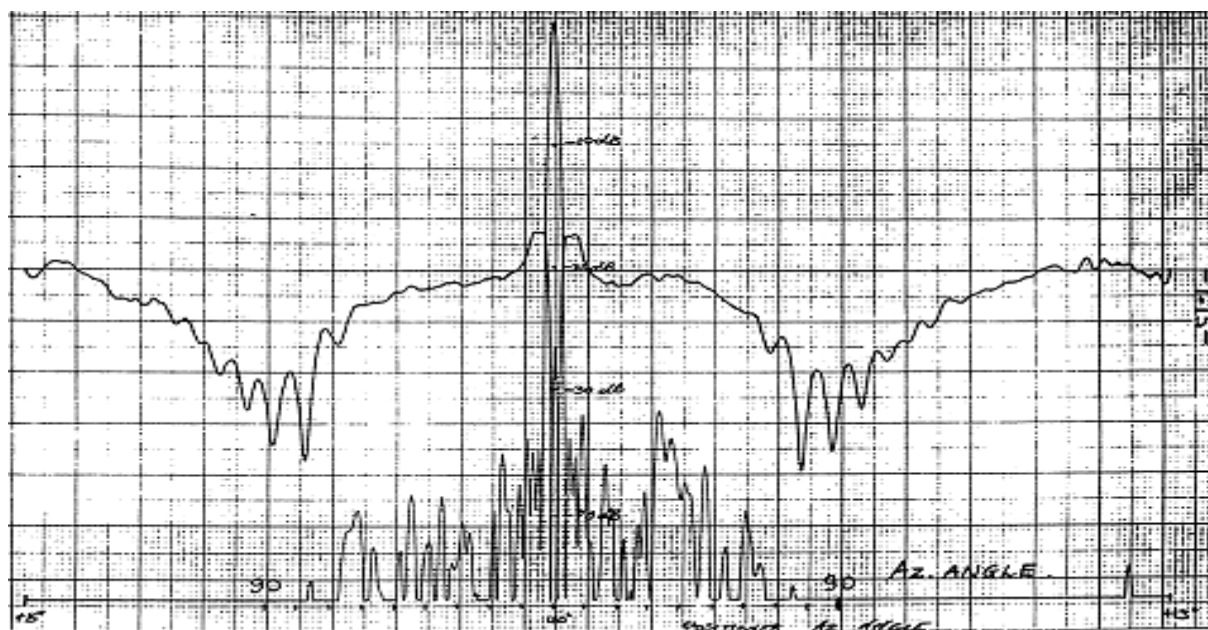


Figure 4.8 Diagramme en azimut de ( $\Sigma$ ) [17]

Figure 4.9 Diagramme en azimut de ( $\Sigma$ ) et ( $\Delta$ ) [17]Figure 4.10 Diagramme en azimut de ( $\Sigma$ ) et ( $\Omega$ ) [17]

#### IV.2.6 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 reçues les valeurs :  $\log \Sigma$ ,  $\log \Delta$  et surtout  $\Delta / \Sigma$  [17, 23, 24, 27, 28]. 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 garblées, 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" .

#### IV.2.7 Élimination des réponses asynchrones

##### *Defruiteur*

À chaque fois que le faisceau d'un radar secondaire rencontre une cible, le transpondeur de celle-ci transmet une réponse dans toutes les directions. Si la cible reçoit une interrogation d'un autre radar, une seconde réponse arrivera au premier radar à un temps différent et aléatoire. Comme le temps d'illumination de la cible par le premier radar dure un certain nombre d'impulsions, la situation peut se reproduire un grand nombre de fois. Toutes les réponses pour cet aéronef sont emmagasinées dans un appareil appelé un éliminateur de signaux non synchronisés ou défruiteur [8, 24, 27, 28].

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

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

Le premier radar détecte l'avion à une distance  $d$ . Le deuxième radar reçoit aussi cette même réponse. Mais sa synchro étant différente, d'où la distance vue sera 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 (STAGGER)**

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  $\Delta t$  on va briser ce synchronisme et se ramener au cas précédent.

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[24,27,28].

### **IV.3 Suppression des réponses sur lobes secondaires**

Dans le module précédent, il est montré l'avantage du radar secondaire sur le radar primaire quand il s'agit de la diminution d'énergie avec la distance. Malheureusement, cela s'applique aussi aux lobes secondaires de l'antenne ce qui crée un effet très nuisible. En effet, les impulsions envoyées par le radar se retrouvent non seulement dans la direction du faisceau principal mais également à un degré moindre dans la direction de ces lobes.

Le signal d'interrogation d'un ou plusieurs lobes secondaires a de bonnes chances d'être perçu par l'antenne d'un aéronef en vol et va alors déclencher l'opération du transpondeur qui répondra à l'interrogation de chaque lobe assez intense. La réponse revenant de chacun des lobes secondaires sera faussement placée dans la direction où se trouve le faisceau principal à ce moment-là et ce, à la même distance du radar [9,24,27,28].

Il semblera à l'opérateur radar qu'il y a donc plusieurs cibles équidistantes autour du radar. Dans le cas extrême où l'avion est très proche du radar, le transpondeur sera continuellement sollicité durant un tour complet de l'antenne et ses réponses formeront un anneau sur un l'affichage radar .

Il y a deux méthodes simples assez similaires pour la suppression des lobes secondaires (abrévié par **SLS** pour **Side Lobe Suppression**) [1,24 ,27]:

- Suppression des **L**obes **S**econdaires à l'**I**nterrogation (en anglais **ISLS**)
- Suppression des **L**obes **S**econdaires à la **R**éception (en anglais **RSLS**).

Une autre technique existe pour réduire l'influence des fausses réponses causées par la réflexion multiple du faisceau radar:

- Suppression améliorée des lobes secondaires à l'interrogation (en anglais **IISLS**).

### IV.3.1 Suppression des lobes secondaires à l'interrogation (ISLS : Interrogations avec Suppression de Lobes Secondaires)

Le but est d'empêcher le transpondeur de répondre s'il est interrogé sur lobe secondaire.

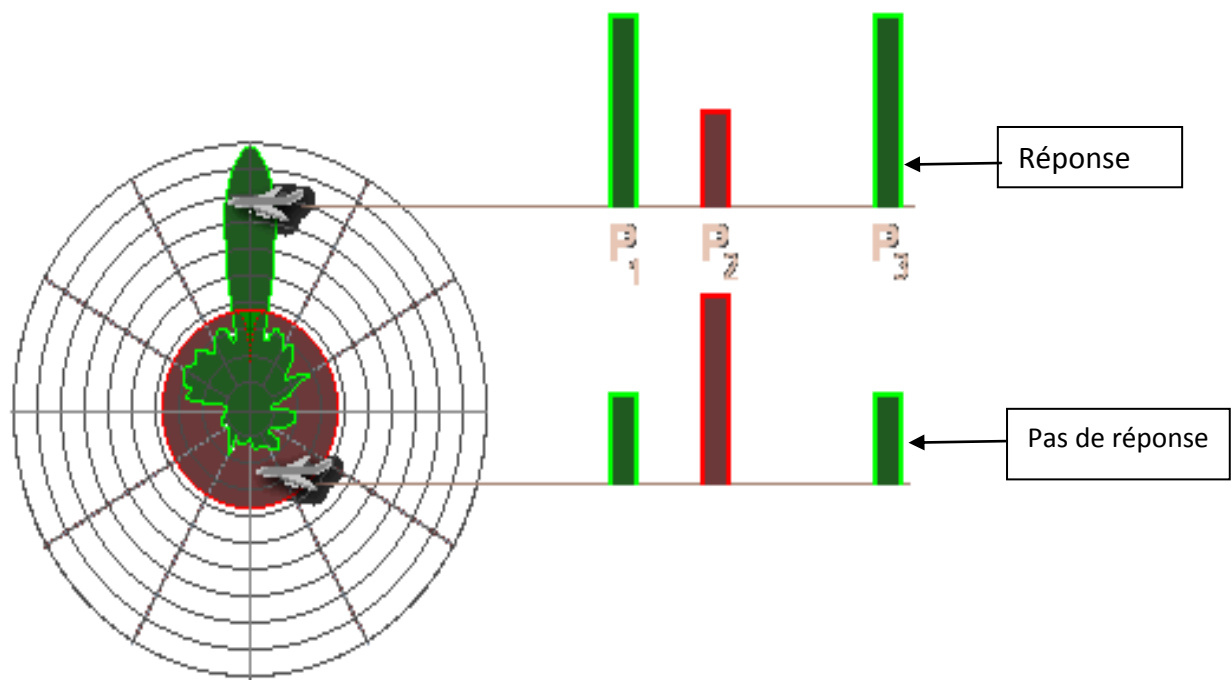
Un deuxième diagramme de rayonnement  $\Omega$  dit "de contrôle" sur lequel on va émettre une impulsion  $P_2$  retardée de  $2\mu s$  par rapport à  $P_1$ .  $\Omega$  doit être conçu pour qu'un avion interrogé sur lobe secondaire de  $\Sigma$  reçoive une amplitude sur  $P_2$  supérieure à celle reçue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

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

Un radar secondaire a généralement deux antennes: l'antenne principale directionnelle et une seconde omnidirectionnelle. La première émet deux impulsions en mode interrogation ( $P_1$  et  $P_3$ ) dont l'espacement temporel correspond à la question posée. Cette antenne a un faisceau principal mince (ou un faisceau somme mince dans le cas d'une antenne monopulse), de l'ordre de 2 à 3 en azimut, où elle concentre son énergie.

L'antenne omnidirectionnelle émet une impulsion de «contrôle»  $P_2$  de façon isotrope, juste après l'impulsion  $P_1$ . Il peut s'agir d'un dipôle ou de la partie en opposition de phase dans une antenne monopulse . Cette impulsion doit être au moins 9dB plus faible que les impulsions  $P_1$  et  $P_3$  dans le faisceau principal.

- Il a été déjà mentionné que les impulsions  $P_1$  et  $P_3$  sont aussi émises dans les lobes secondaires mais avec une intensité beaucoup moindre. Il en découle que le rapport entre les intensités de  $P_1$  et  $P_2$  sera donc plus faible que 9dB si un avion les reçoit à partir de la direction d'un lobe secondaire. Ce rapport sera de plus en plus faible à mesure qu'on s'éloigne de l'axe principal et  $P_2$  pourra même devenir plus intense que  $P_1$  après un certain angle [8,24,27, 28].



**Figure 4.11 principe de l'ISLS [8]**

### IV.3.2 Suppression des lobes secondaires à la réception (RSLS)

Il est également possible de supprimer les réponses déclenchées par les lobes secondaires à la réception. Le principe est similaire à celui de la suppression à l'interrogation. Il faut encore une fois deux antennes: l'antenne directionnelle  $\Sigma$  et une autre omnidirectionnelle  $\Omega$ . Dans ce cas, il faut deux récepteurs identiques, chacun branché sur une des antennes, et un comparateur[24,27,28].

Les signaux envoyés par le transpondeur d'un avion seront plus intenses s'ils sont captés par le lobe principal de l'antenne directionnelle que par ses lobes secondaires. D'autre part, l'intensité sera la même dans toutes les directions pour l'antenne omnidirectionnelle. En comparant l'amplitude du signal venant des deux récepteurs, il est donc possible de différencier les réponses provenant des lobes secondaires de celle du lobe principal.

Comme dans l'exemple de la suppression à l'interrogation, une différence de 9dB est utilisée entre la sensibilité du lobe principal et celui de l'antenne omnidirectionnelle:

Cette technique permet non seulement de supprimer les réponses générées par une interrogation provenant d'un lobe secondaire mais également de filtrer d'autres interférences

appelées «Fruit». L'une de celle-ci est l'élimination des réponses qui arrivent au radar secondaire par réflexion sur le sol ou des obstacles[23,24, 27 ,28].

#### IV.3.3 Les Lois Gain variable avec le temps (GVT) (STC : sensitivity time control)

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 [1,24,27,28].

Plus les cibles sont proches, plus les signaux reviennent avec une amplitude élevée. Le seuil décroît en  $1/R^2$  pour les radars secondaires.

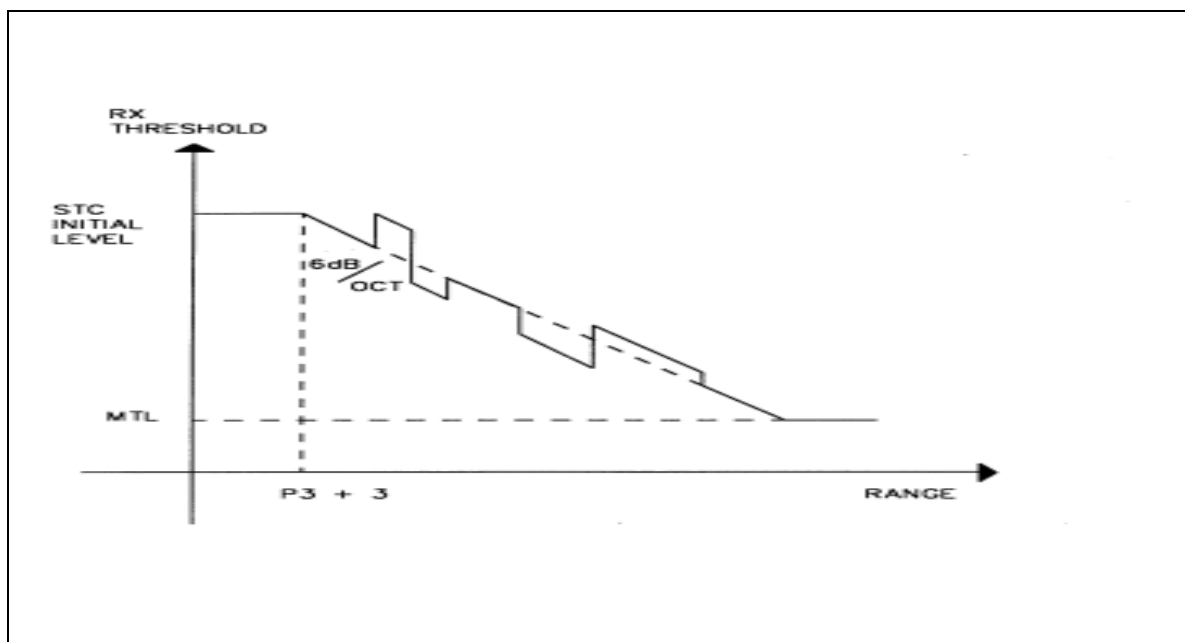


Figure 4.12 Diagramme de STC [28]

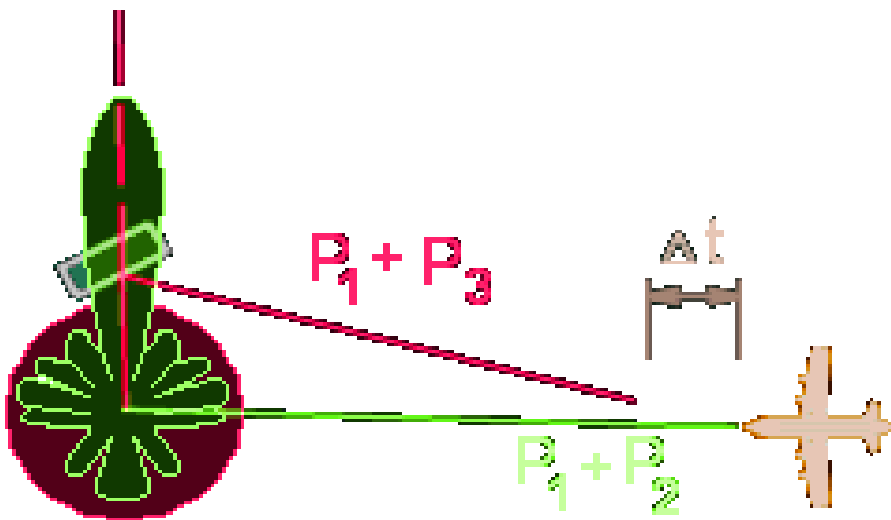
#### IV.3.4 Suppression des réflexions par technique L'IISLS

Dans certains cas, il arrive que l'ISLS, les lois GVT 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. Cette méthode est très efficace pour éliminer les réponses fantôme venant des réflexions. Par contre, à l'intérieur de la portée de l'antenne de contrôle (typiquement 40 milles nautiques), le transpondeur est presque constamment hors-circuit, ne pouvant répondre qu'à l'interrogation du faisceau principal du radar secondaire associé à l'antenne de contrôle. En effet, il reçoit constamment des impulsions  $P_1$  et  $P_2$  égales, sauf dans le faisceau principal, au contraire de l'ISLS où ce serait juste dans la direction des lobes secondaires qu'il pourrait être mis hors-circuit. [23,24, 27,28].

Ceci est un désavantage majeur qui élimine la possibilité de toutes les interrogations venant d'autres radars plus éloigné couvrant la même zone mais non affecté par les réflexions du radar initial. Dans un espace aérien achalandé cela réduit considérablement le temps disponible pour l'interrogation des cibles et le recoupement des données dans un réseau local de radars de surveillance, ce qui est jugé inacceptable.



**Figure 4.13: Diagramme montrant la trajectoire parcourue par les impulsions directes et subissant une réflexion[8].**

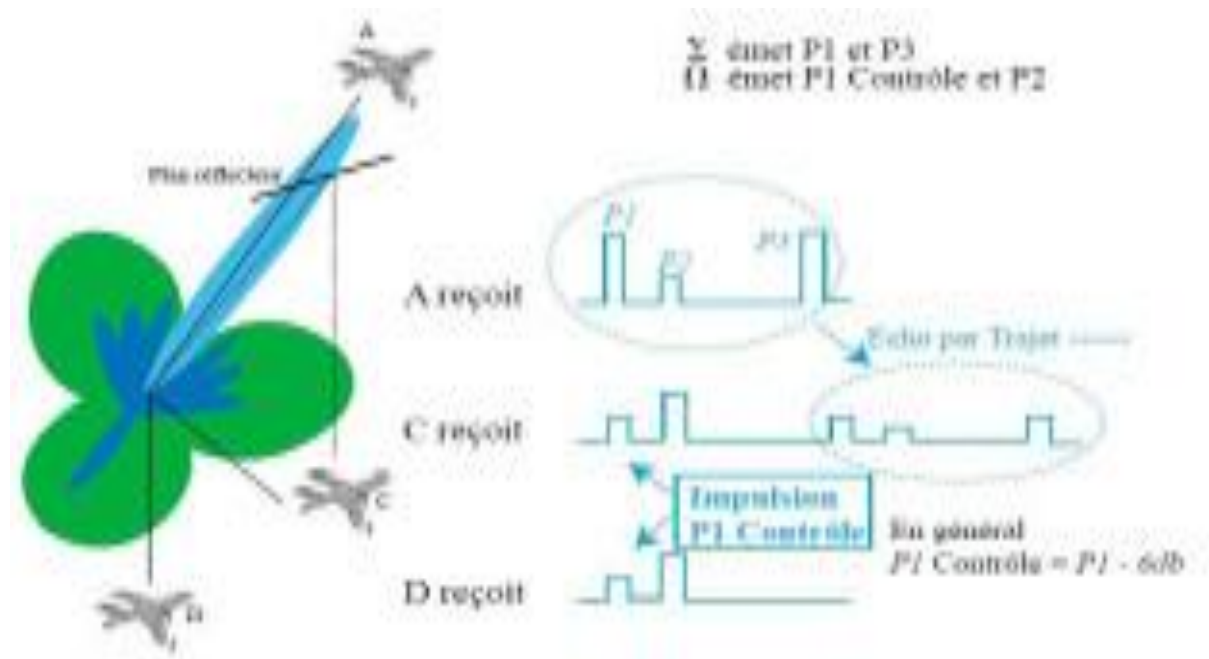


Figure 4.14 Principe d'IISLS

L'avion C reçoit le tandem d'impulsions P1 Contrôle - P2 émis par  $\Omega$  qui va bloquer son transpondeur pendant  $35\mu s$ . Ceci devrait permettre de laisser passer l'écho de l'interrogation sur  $\Sigma$  pour être certain que dans tous les cas possibles  $P1 \text{ Contrôle} < P2$ . On prendra  $P1 \text{ Contrôle} = P1 - 6db$

#### Avantages:

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

#### Inconvénients :

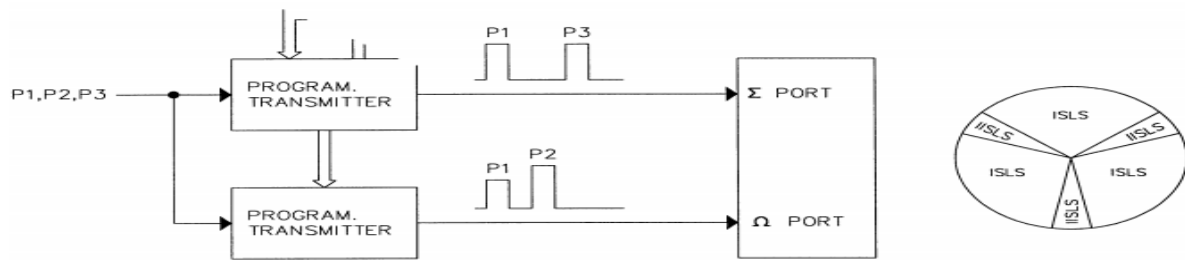
- L'avion D qui est là par hasard va lui aussi recevoir le tandem d'impulsions P1 Contrôle - P2 qui va à lui-aussi lui bloquer son transpondeur pendant  $35\mu s$ .

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

#### IV.4 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  $1^\circ$ . Dans ce cas par exemple on ajuste les lois GVT et l'IISLS pour s'affranchir de réflecteurs parasites.



**Figure 4.15 Principe de la sectorisation [28]**

### IV.5 Radar mode "S" :

Dans les zones à trafic dense, il existe encore de nombreux problèmes dus aux cas de chevauchement non résolus ainsi qu' à la limitation due au nombre de codes qu'il est possible d'allouer (4096 codes ne sont pas suffisants dans certains cas).

Une autre technique visant l'amélioration du radar secondaire, est aujourd'hui en cours de normalisation à l'OACI, il s'agit du radar mode "S" (SELECTIF).

Le mode S a été conçu pour être entièrement compatible avec le radar secondaire actuel et, de plus, il utilise la technique de mesure de l'azimut par monoimpulsion.

Avec le mode S, chaque avion, équipé d'un transpondeur spécial "mode S", peut être interrogé séparément des autres avions qui sont également dans le faisceau de l'antenne. Ceci est réalisé en affectant à chaque avion une adresse unique. Cette adresse est composée de 24 bits ; ainsi 16 million d'adresses sont disponibles dans le monde.

Chaque interrogation mode S contient l'adresse de l'aéronef auquel elle est destinée.

Recevant une telle interrogation, un transpondeur mode S compare l'adresse reçue à sa propre adresse et répond à l'interrogation si les deux adresses correspondent ; sinon, il ignore l'interrogation[2,8,24,27].

#### IV.5 .1 Avantages attendus

- La mise en œuvre de ce principe élimine tout Garbling.
- Il est possible d'envisager un allongement des transactions entre le radar et le transpondeur ; ceci permettra d'introduire de véritables fonctions de "liaisons de données".
- L'identification sera directe et sans ambiguïté avec la possibilité d'affichage direct d'informations sur l'écran du contrôleur : indicatif avion ou numéro de vol. - de plus, les informations classiques (altitude et distance) pourront se faire sur un seul échange ce qui

entraîne une forte réduction de l'encombrement électromagnétique.

#### IV.5.2 Contraintes liées au mode S

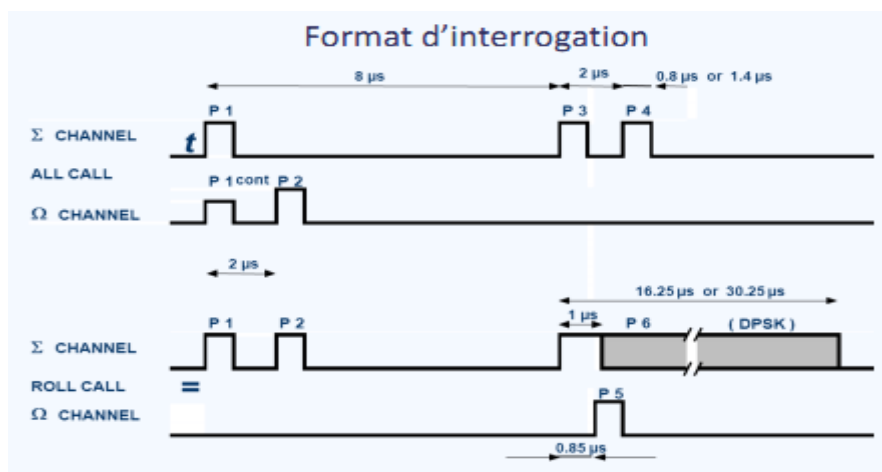
- Il faut d'abord prévoir une phase d'acquisition entre le radar et le transpondeur.
- Il faut assurer la compatibilité radar secondaire mode S de façon à faciliter en ménageant les problèmes techniques et économiques des états (installation des stations radar mode S) et des compagnies (installation des transpondeur).

#### IV.5.3 Structure des signaux

Un radar secondaire classique émettra une interrogation en mode A, puis en mode C ou dans un autre mode. Cette séquence se répétera en continu à un taux rapide afin de suivre les appareils dans la zone de contrôle aérien (position et identification) à chaque balayage de l'antenne[24,27].

En mode S, la station au sol peut émettre une plus grande variété d'interrogations, classées en deux groupes:

- Interrogations générales (ALL CALL)
- Interrogations par appel nominal (ROLL CALL).



**Figure 4.16 format d'interrogation Mode S**

Tous les appareils en vol doivent répondre aux interrogations générales lorsqu'ils sont balayés par le faisceau principal du radar, sauf si le transpondeur est «hors-circuit» en certaines circonstances commandées antérieurement par le mode S. Les interrogations par appel nominal s'adressent à un seul appareil en utilisant son indicatif particulier de 24 bits. Seul cet aéronef répondra.

La première tâche du système en mode S est donc d'identifier les appareils en vol, ce qui permettra de faire des interrogations individuelles. Donc les interrogations générales se répètent régulièrement pour repérer les nouveaux arrivants et les avions qui quittent la zone de contrôle.

| Largeur de l'impulsion $P_4$                                    | <b>Interrogations en mode S</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>0.8 <math>\mu</math>s</b>                                    | Pas de réponse                  | Cette impulsion courte d'appel général du mode S ne peut être reçue que par les avions munis d'un transpondeur de mode S. Ceux qui répondent donc à l'interrogation seront ensuite questionnés uniquement en mode S par appel nominal.                                                                                                                                            |
| <b>1.6 <math>\mu</math>s</b>                                    | Réponse générale                | Même cette impulsion $P_4$ longue peut être utilisée dans un appel général, son utilisation est plutôt restreinte. Cela est dû en particulier au fait que le code d'identification et le verrouillage d'appel général associé en mode S ne sont pas pertinents pour ce mode d'interrogation.                                                                                      |
| <b>Pas de <math>P_4</math></b>                                  | Réponse en mode A               | Cette requête est envoyée en compatibilité descendante pour les transpondeurs non-conformes en Mode S.                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Pas de <math>P_4</math> mais un <math>P_2</math> intense</b> | Réponse en mode S               | L'interrogateur envoie une impulsion $P_2$ de même amplitude que la $P_1$ . Les transpondeurs en mode S s'attendent ensuite à recevoir une impulsion $P_6$ contenant une information spécifique. Par contre, les vieux transpondeurs en mode A/C, qui appliquent la routine de suppression des lobes secondaires à l'interrogation, seront mis en veilleuse et ne répondront pas. |

**Tableau 4.2 interrogations mode S**

#### **IV .6 Conclusion**

Il est à noter que grâce au radar monopulse, des améliorations très importantes nous permettaient d'une part de traiter certains cas de chevauchement et d'autre part de réduire la fréquence de répétition et d'augmenter la précision en azimuth. Nous avons décrit le principe de fonctionnement de l'antenne monopulse et les solutions pour les différents parasites rencontrés. Les différentes techniques de suppression des réponses sur les lobes secondaires, à l'émission (au niveau du transpondeur de l'avion appelé ISLS), à la réception (au niveau de l'antenne radar appelé RSLS) et la technique IISLS ont été présentées. La limitation de ces techniques dans quelques cas nous a ramené à présenter le radar secondaire mode S.

## **CONCLUSION GENERALE**

L'objectif de ce travail est d'étudier le radar secondaire monopulse et de montrer ses évolutions ainsi que ses avantages par rapport au radar primaire. En outre, l'invention des techniques avancées pour l'élimination des phénomènes parasites en particulier les réponses prévenant des lobes secondaires dus aux obstacles aux alentours du radar. La technique IISLS (Improved Interrogation Side Lobe Suppression) est la meilleure solution pour résoudre ces problèmes.

Pour cela nous avons présenté au premier chapitre un aperçu historique sur le système radar auxquelles les scientifiques de plusieurs pays ont parallèlement participé afin d'arriver au modèle radar de nos jours, aussi bien son principe général de fonctionnement, ses différentes composantes et le rôle de chacune ont été montrés.

Le deuxième chapitre est consacré à la classification des systèmes radar. Nous avons expliqué le principe de fonctionnement de chaque radar montrant l'avantage selon le domaine vaste d'application (militaire, aéronautique, maritime ... etc.) et les plages de fréquences utilisées pour chaque domaine.

Dans le chapitre III, nous avons exposé le radar secondaire et ses évolutions. Ce type de radar permet de déterminer, comme tous les radars, la position de l'avion à l'aide d'un gisement et d'une distance relatifs à l'antenne. Comme un transpondeur est nécessaire pour être détecté par un radar secondaire, seuls les plots pertinents seront visualisés, et les obstacles ou les oiseaux n'apparaîtront pas. Un autre avantage est le fait que des données peuvent être transmises au système radar. Les données dépendent du mode d'interrogation utilisé mode A (identification de la cible), mode C (altitude de la cible). Ce radar secondaire a généralement deux antennes : l'antenne principale directionnelle et une seconde omnidirectionnelle. La première émet deux impulsions en mode interrogation dont l'espacement temporel correspond à la question posée. L'antenne omnidirectionnelle émet une impulsion de « contrôle » utilisée pour l'élimination des réponses sur lobes secondaires. Les différents phénomènes parasites rencontrés ont été cités.

Le dernier chapitre est destiné à l'explication du principe de monopulse et ces avantages, la représentation des diagrammes de l'antenne ALE-9 où on a vu la méthode de déterminer la position de la cible avec une seule impulsion. Par la suite on a abouti aux solutions pour les phénomènes parasites décrites auparavant tels que la suppression des réponses sur lobes

secondaire. Cette dernière assure que la réponse provenant de l'interrogation par les lobes secondaires ne sera pas affichée à l'écran radar dans la direction où se trouve le faisceau principal. Dans le cas extrême où l'avion est très près du radar, le transpondeur sera continuellement sollicité durant un tour complet de l'antenne, et ses réponses formeront un anneau sur l'affichage radar sans oublier le mode S qui est encore une évolution du radar secondaire. Le nombre de codes disponibles en mode A et C est limité (4096 codes seulement) et devient insuffisant pour les besoins actuels. Le mode S permet donc une véritable liaison de données. En plus du code attribué par un contrôleur et de l'altitude donnée par un alticodeur, l'immatriculation ou l'indicatif de l'avion est transmis. N'importe quelle donnée peut être transmise, aussi bien de l'avion vers le sol que du sol vers l'avion.

## Références bibliographiques

- [1] J .DARRICAU et Y .BLANCHARD, Histoire du radar dans le monde puis en France, PEGASE, Electricité et Electronique. 2003.
- [2] P.LEFEVRE, Système de surveillance du contrôle de trafic aérien civil, Conférence arts et Métiers, Paris, 02 Février 2015.
- [3] J .DARRICAU, Système radar ,article n° TE6650, 10 février 2012.
- [4] Philippe BILLAUD, Nathalie COLIN, Guy DESODT, Michel MORUZZIS, Marc VAN LANDEGHEM, Radars de Surface, Radars Civils et Radars Côtiers, article n° TE6678, 10 Août 2014.
- [5] Joseph ROGER, Antennes différents types, Article n° E3282 ,10 mai 1999.
- [6] Christian Wolff, Radartutorial Chapitre 1 : Notions de base (traduction en langue française et révision : Pierre Vaillant et Christophe Paumier,).9 juillet 2011
- [7] Mangini Géoroy, Etude d'un radar cohérent fonctionnant en mode pulsé (application à la surveillance maritime), Université Montpellier II France 2013.
- [8] [www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu).
- [9] Guy COUEMOU, Radar Techbology ,01 janvier 2010.
- [10] François DELAVEAU et Yvon LIVRON, Gestion du spectre électromagnétique, Article n° TE6890, 10 Août 2012.
- [11] Annick PLAGELLAT-PENARIER, Introduction aux RADARS, Institut électronique Université de Montpellier 2015-2016.
- [12]NANYANG Lee KarHeng, Radar Systems techno logical university tbss-Scilab Singapore Centre.
- [13] SELENIA RADAR TECHNIQUES.
- [15] Christian Wolff, Radartutorial Chapitre 3 Antennes (traduction en langue française et révision: Pierre Vaillant),22 novembre 2011.
- [16] [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr).
- [17] ALE-9 SSR Antenna Technical manual installation and maintenance information.
- [18] Eric CHAMOUARD, Radars aéroportés multifonctions, Article n° 6670 ,10 Août 2013.
- [19] Christian Wolff, Radartutorial Chapitre 2 Types de radar et fréquences (traduction en langue française et révision : Pierre Vaillant et Christophe Paumier), 3 août 2011.

- [20] Bassem.R. Mahafza, Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, 20 Mai 2013.
- [21] David K. Barton and Sergey A. Lenovo, Radar Technology Encyclopedia December 1997
- [22] Les services d'utilisation radar section instruction IVOM<sub>TM</sub> division France Août 2010
- [23] F.Chatelet, le radar secondaire et ses évolutions, école nationale de l'aviation civile département d'électronique
- [24] Michael .C .Stevens, Secondary surveillance, Artech house, 1988.
- [25] Robert M. O Donnell, Introduction to Radar Systems (MIT Lincoln Laboratory)
- [26] Akshay. Palker, Avinash. Nair, Nirav Gupta et Rohit. Mathur, Applications of Radar, Technologies, Affaires, 23 sept. 2009.
- [27] G.BESOMBES, Radar Secondaire, école nationale de l'aviation civile département d'électronique 1988.
- [28] Technical manual secondary interrogator Receiver monopulse SIR-M with IISLS TM-RS/9717-1, Radar and system division -Logistic Dept/Maintainability sect. 1<sup>st</sup> issue July 1997
- [29] Systèmes radar de surveillance et systèmes anticollision Volume IV 3<sup>em</sup> édition juillet 2002 organisation de l'aviation civile internationale.
- [30] Vérification des systèmes RADAR de surveillance doc 8071 Volume III de l'OACI version français.
- [31] Christian Wolff, Radartutorial Chapitre 6 Récepteur (traduction en langue française et révision : Pierre Vaillant et Christophe Paumier) ,24 mai 2012.
- [32] Lacomme Philippe, Dispositif de traitement de signaux d'écartométrie angulaire d'un radar secondaire ,15/10/1980.