

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.

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.

En **1864**, le physicien anglais James Clerk Maxwell développe sa théorie de la lumière électromagnétique (Description de l'onde électromagnétique et de sa propagation).

En **1886**, le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz démontra l'existence physique des ondes électromagnétiques qui confirment ainsi la théorie de Maxwell.

En **1904**, le technicien allemand spécialiste des ondes hertziennes, Christian Hülsmeyer, invente le «Telemobiloscope», 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. Hülsmeyer dépose un brevet de son invention en Allemagne, en France et au Royaume-Uni.

En **1921**, Albert Wallace Hull développe un oscillateur à haut rendement, le magnétron, qui servira plus tard comme source de l'onde radar.

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 Hülsmeyer.

En **1930**, L. A. Hyland, également du Naval Research Laboratory, réalise la première détection d'un aéronef.

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 (Compagnie générale de télégraphie sans fil) (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 Normandi.

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

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.

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.

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.

Le terme **RADAR** est l'acronyme de **R**adio **D**etecting **A**nd **R**anging. 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.

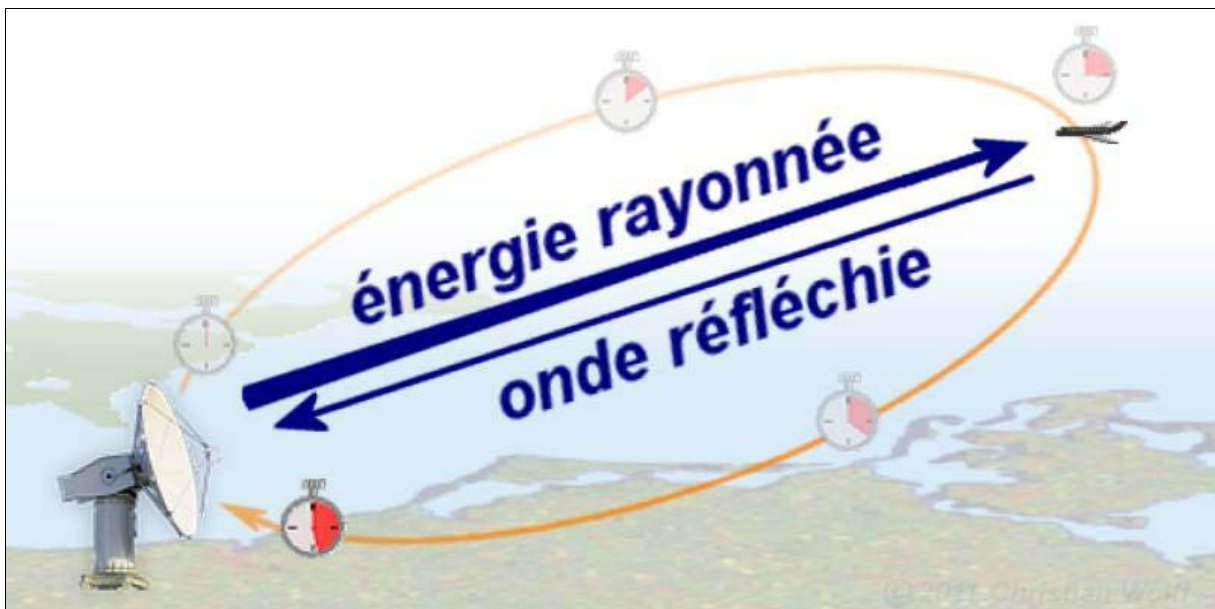


Figure 1.1 schéma de principe d'un radar [8]

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 réfléchié 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.

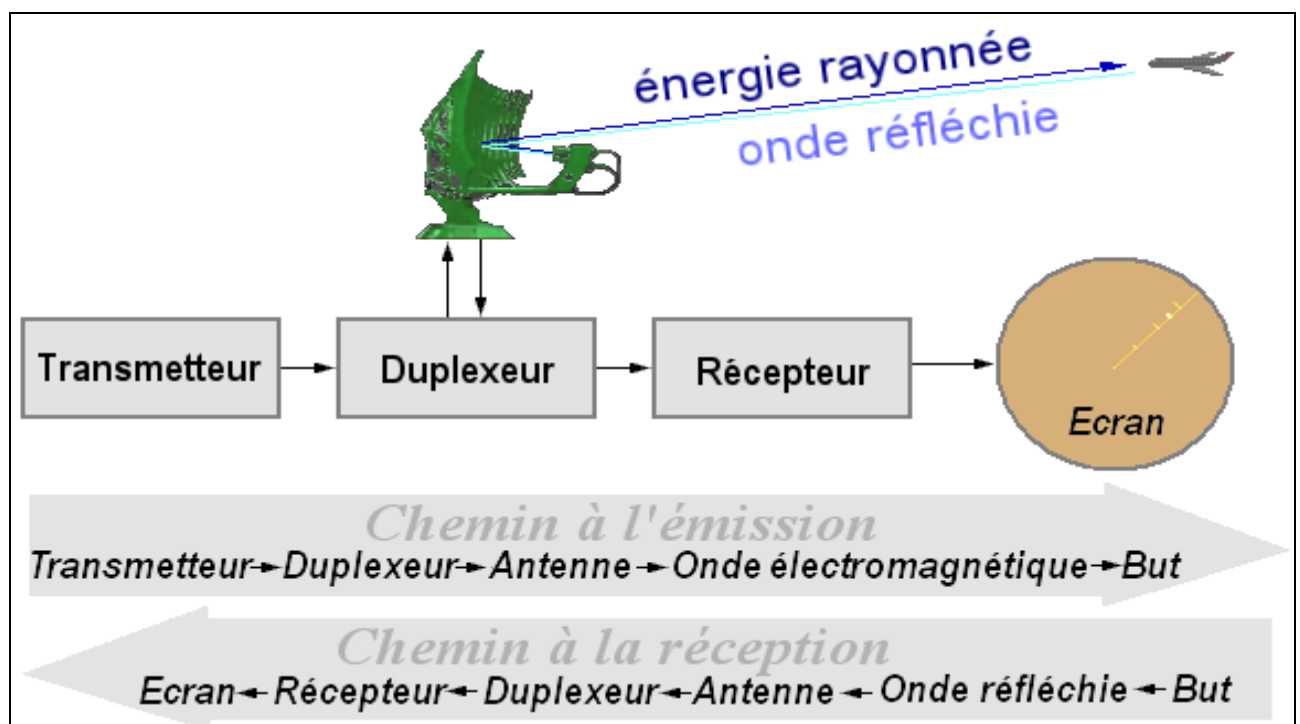


Figure 1.2 Schéma du parcours de l'onde dans le radar primaire[8]

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.

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.

I.3 Composantes d'un système radar

Comme présentée dans la figure I.3, le radar est formé de différentes composantes.

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.

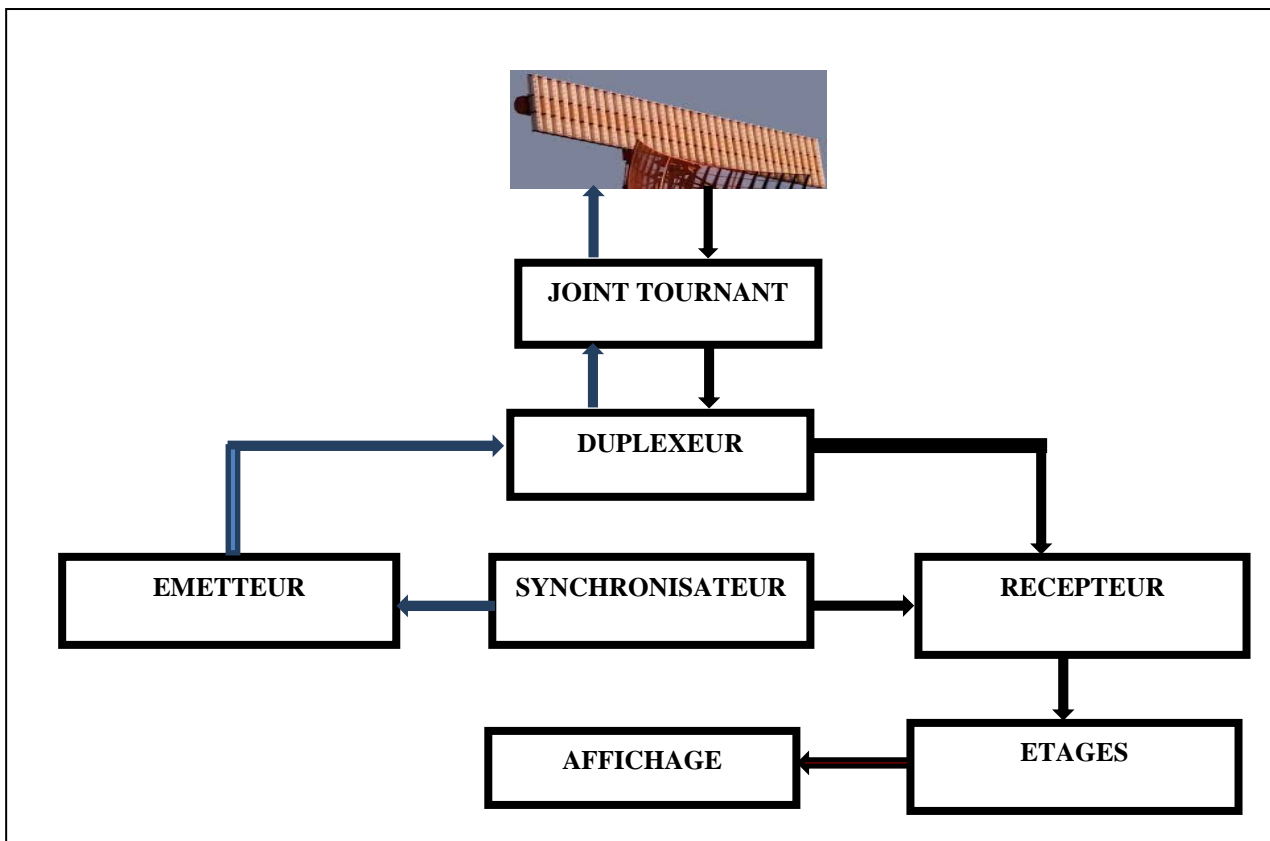


Figure 1.3 : Schéma bloc du système radar

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 décru.

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 .

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.

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...).

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 affichés 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.

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

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'explique le rôle de chaque composante.

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.

II.2 Classification des systèmes radar

Les systèmes radar sont classifiés comme montrer sur la Figure 2.1

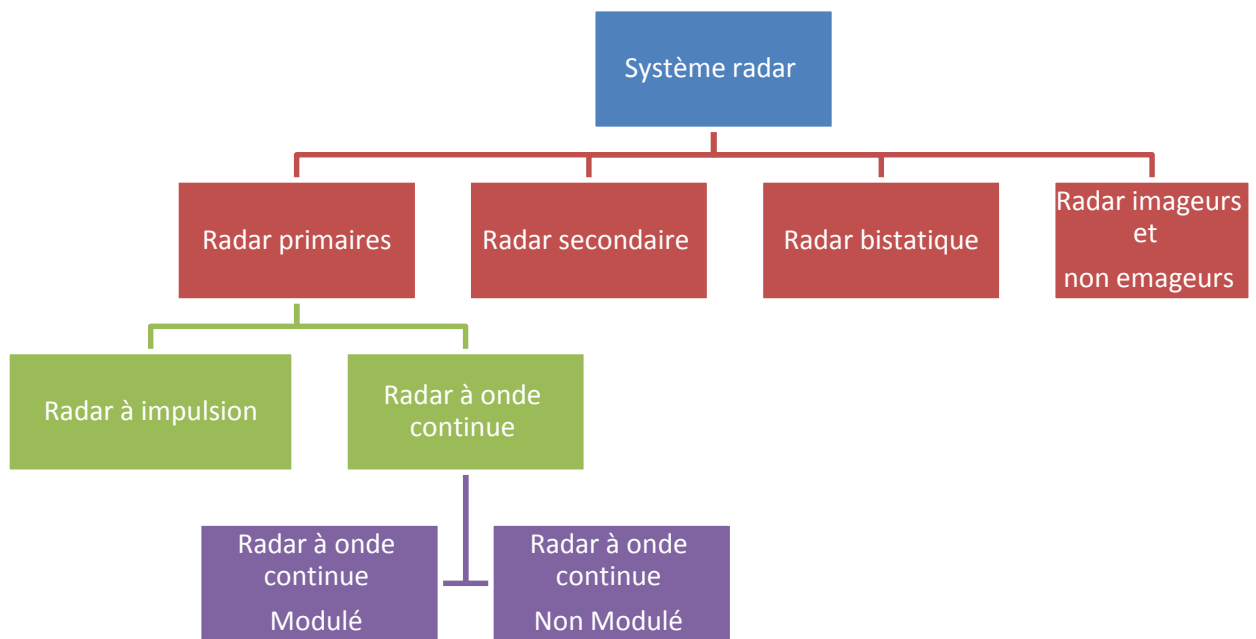


Figure 2.1 Classification des systèmes radars

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 réfléchi 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.



Figure 2.2 antenne radar primaire [16]

On distingue deux types de radar primaire :

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.

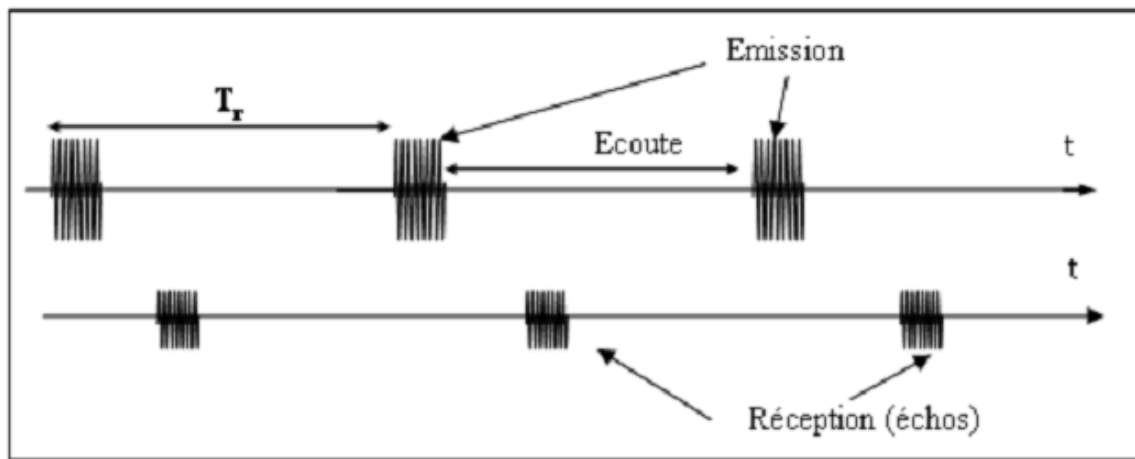


Figure 2.3 radar à impulsions

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.

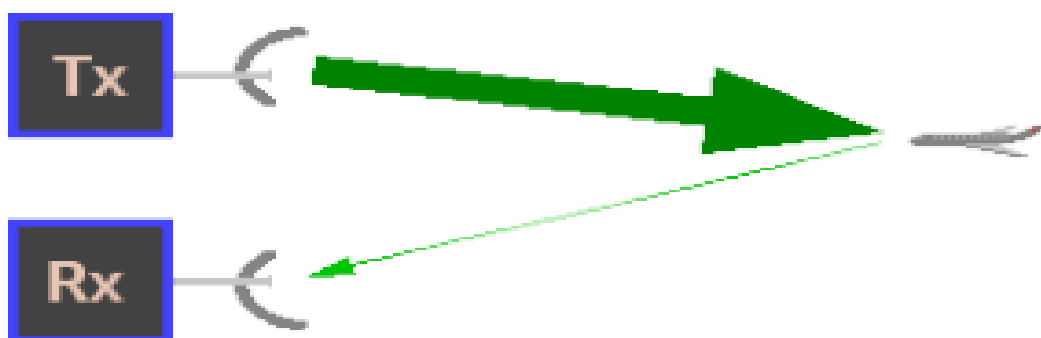


Figure 2.4 Principe du radar à onde continue

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).

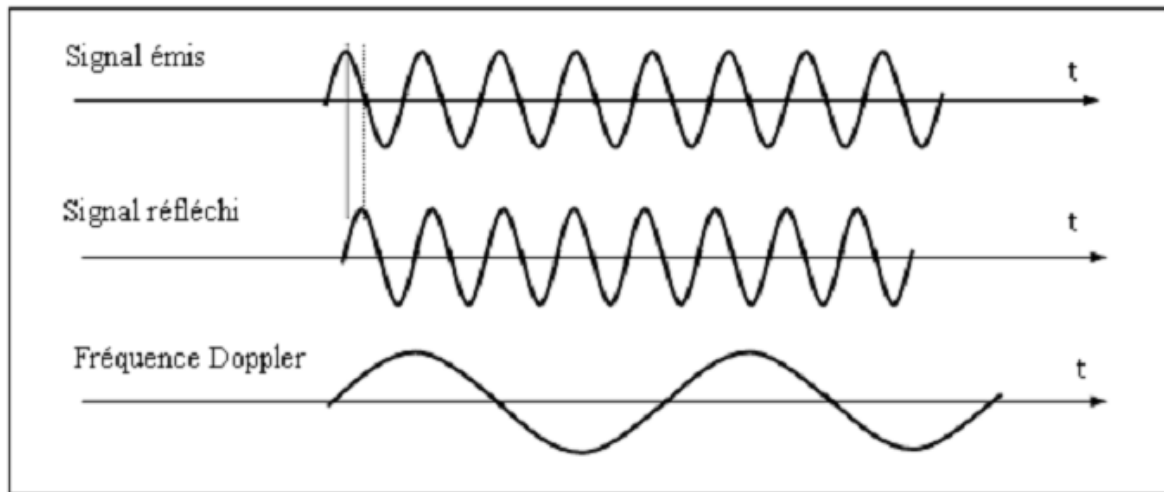


Figure 2.5 principe des radars à onde continue non modulée

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).

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).



Figure 2.6 Antenne radar secondaire

II.2.3 Radars bistatiques

Un radar bistatique se compose de deux installations considérablement éloignées 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).

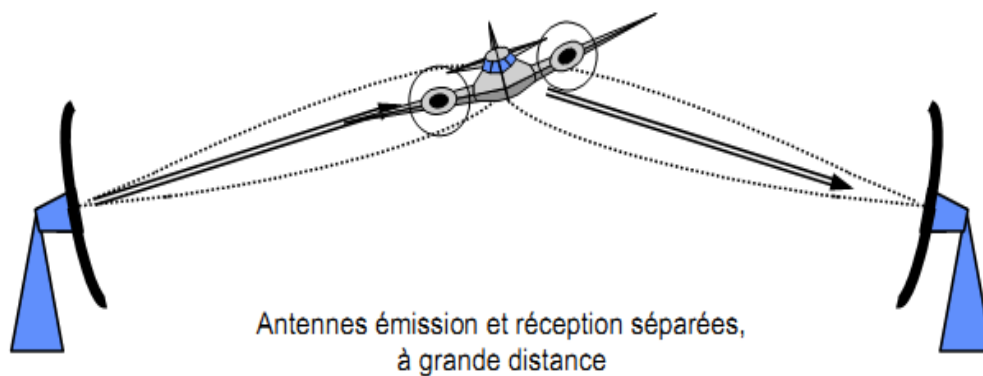


Figure 2.7 radar bistatique

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 .

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.

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.

Nom de bande	Plage de fréquences	Longueurs d'onde	Commentaires
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 :

➤ **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 sécuriteroutière :**
 - ✓ 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 ± 3 km/h

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.

Le radar classique, dit radar primaire, qui en résulte à est une technologie ne nécessitant pas la coopération de la «cible».

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.

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.

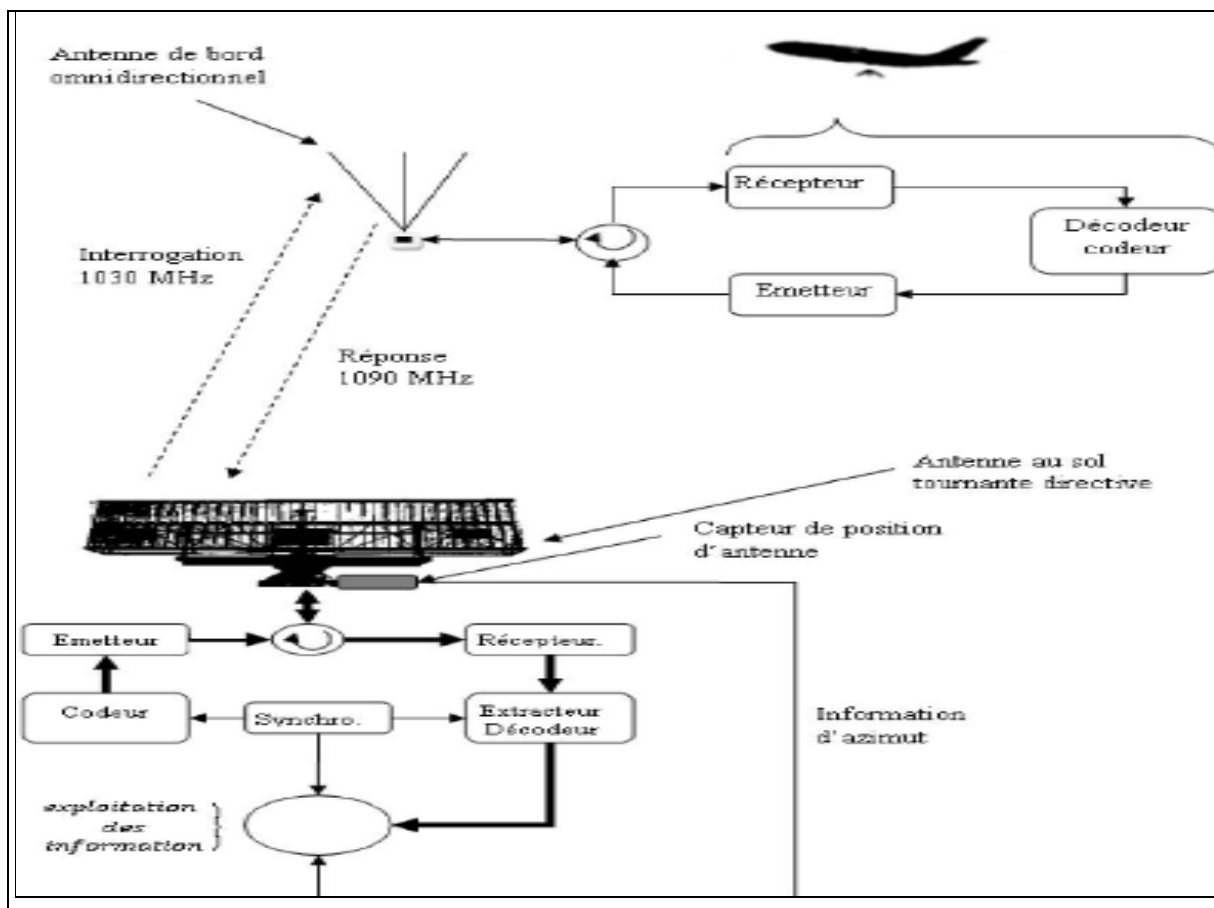


Figure 1 : principe du radar secondaire

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'alticodeur 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 2 : Transpondeur moderne

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).
- 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.

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.

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.

III.3 Fonctions radar secondaires

La liaison radar secondaire doit assurer les fonctions de :

1. Détection
 2. Mesure de distance
 3. Mesure d'azimut
 4. Identification de la cible
 5. Report d'altitude
- 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 : réception, décodage de l'interrogation radar, encodage et émission de la réponse.

III.4 Principes des traitements à la réception 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.
 - Inconvénient: une panne transpondeur empêche l'établissement de la liaison donc toutes fonction radar secondaire.

✓ **Mesure de distance :**

Mesure de temps entre émission radar réception radar. En radar la distance était fonction du temps en utilisant la relation :

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

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 µs qui sera soustrait par le radar.

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 SSR, l'azimut de la cible est l'azimut de l'antenne. Ces types de radars sont en cours de disparitions.

✓ **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 réflexions de l'interrogation sur un obstacle puis retour vers le radar ne génèrent pas la réception des réponses .les fréquences choisies doivent être universelles pour autoriser des liaisons immédiates entre radar et transpondeurs.

- 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 µs 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.

Boulila Med

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.

L'autre information essentielle, la pression-altitude, pour le contrôle aérien est obtenue par le mode C. 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.

- L'interrogation est codée par paires d'impulsions notées P₁-P₃. ces impulsions ont une largeur de 0.8µs et le temps les separant est représentatif de l'interrogation .

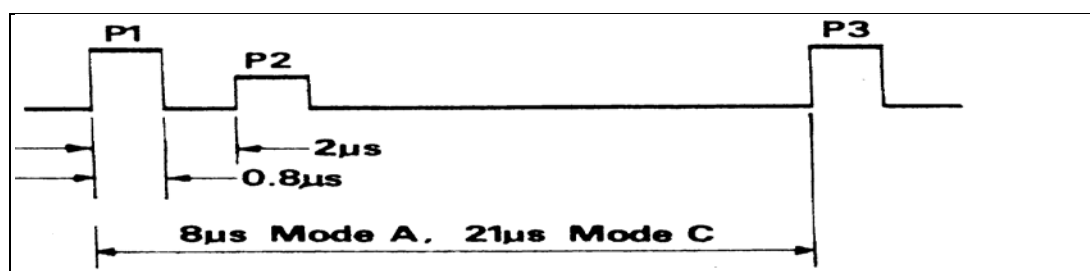


Figure 3 : Forme de signal d'interrogation

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

Mode		Intervalle entre P1 - P3	Description
militaire	civil		
1		3 (± 0.2) μs	<u>Identification militaire</u> 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.
2		5 (± 0.2) μs	<u>Identification militaire</u> 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.
3	A	8 (± 0.2) μs	<u>Identification civile / militaire</u> 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	17 (± 0.2) μs	<i>Pas en usage</i>
	C	21 (± 0.2) μs	<u>Mode civil pour la pression-altitude</u> 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.
	D	25 (± 0.2) μs	Jamais utilisé

Tableau 1 : Structure des modes d'interrogation

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 $0,45 \mu\text{s}$ ($\pm 0,1 \mu\text{s}$) de durée. Les impulsions F_1 et F_2 sont toujours présentes et séparées de $20,3 \mu\text{s}$ ($\pm 0,1 \mu\text{s}$). Elles sont appelées les parenthèses ou les appuie-livres. Les autres impulsions sont séparées de $1,45 \mu\text{s}$ et servent à transmettre l'information demandée (ex. en mode A, l'identificateur, et en mode C, la pression-altitude).

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 $20,3 \mu\text{s}$. 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 F_1 - F_2 ; 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.

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

A_4	A_2	A_1
B_4	B_2	B_1
C_4	C_2	C_1
D_4	D_2	D_1

La combinaison de chaque groupe peut être interprétée comme décomposition binaire d'un chiffre de 0 à 7 ce qui justifier 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 apparaitre les impulsions :

.	A_2	A_1
.	B_2	.
C_4	.	C_1
D_4	D_2	.

L'emplacement des impulsions être F_1 et F_2 est représenté ci-dessous

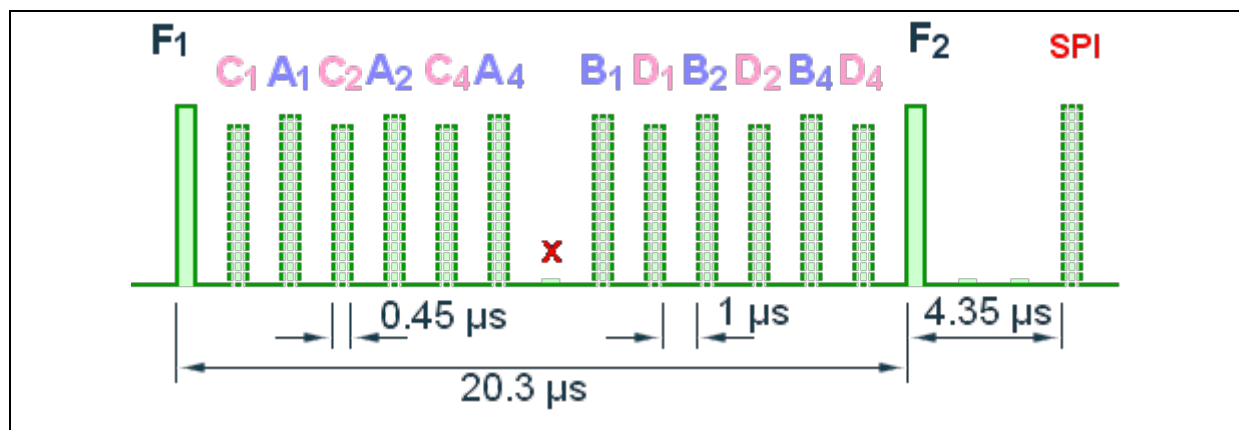


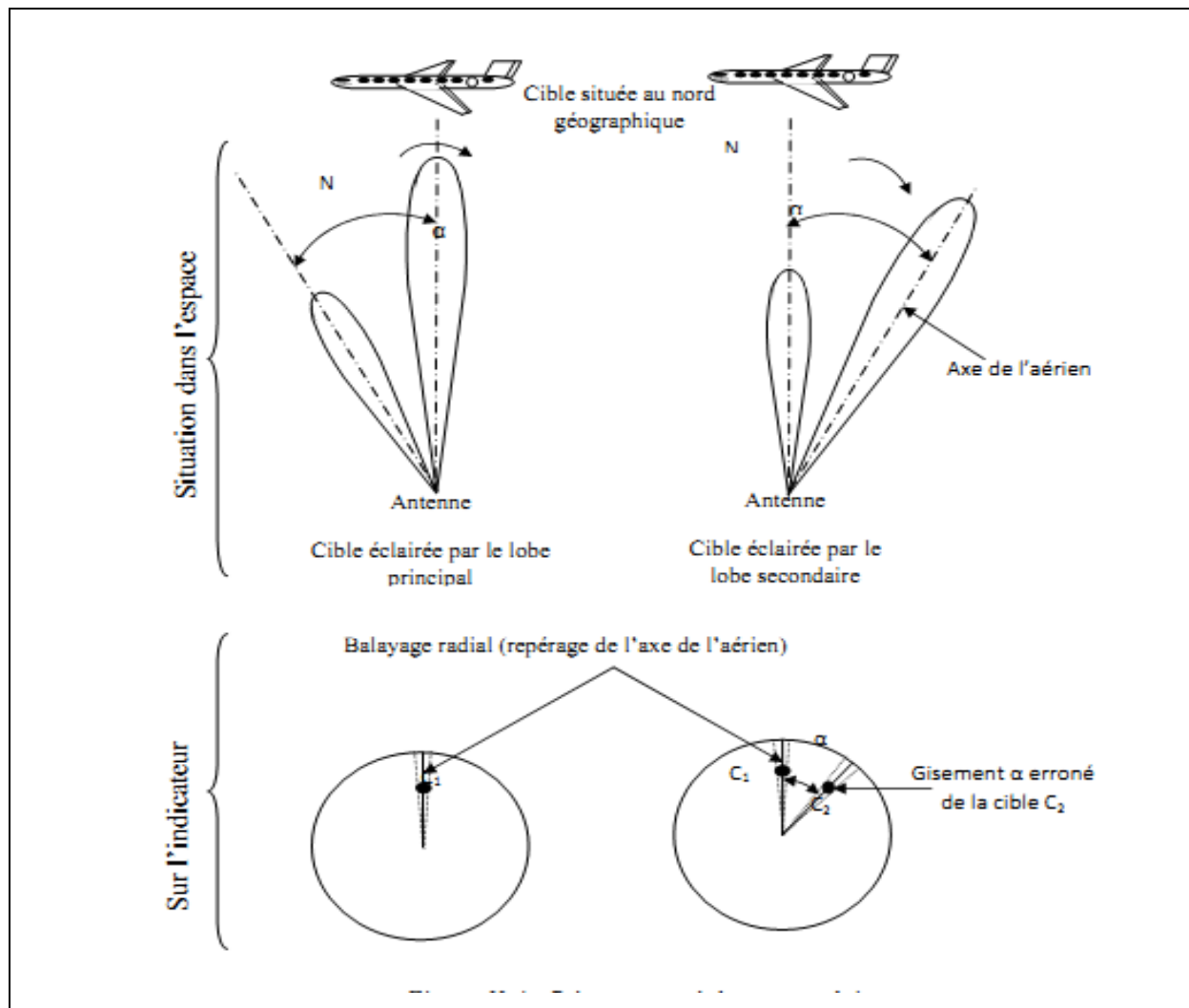
Figure 5 : Structure des réponses

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 4,35µs 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).

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

Tableau 2 : Exemples de codes

III.7 Les phénomènes parasites**III.7.1 Les réponses sur lobes secondaires****Figure 6 : 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.

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.

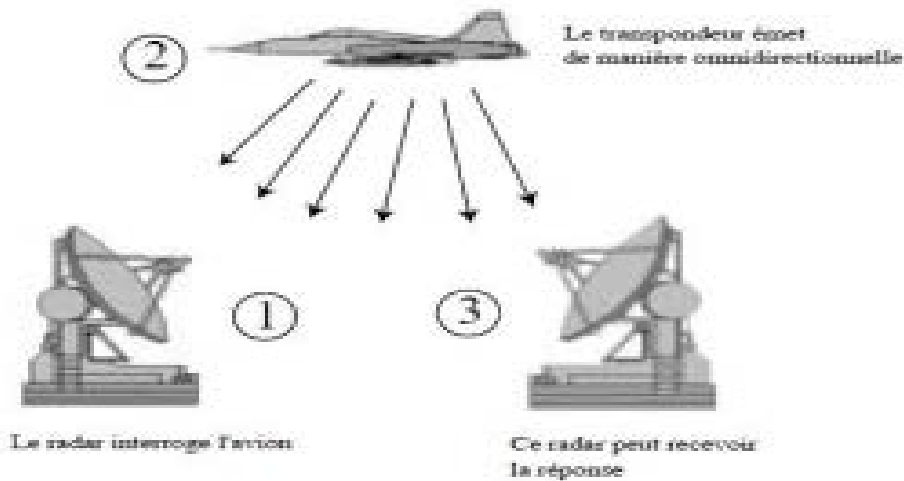
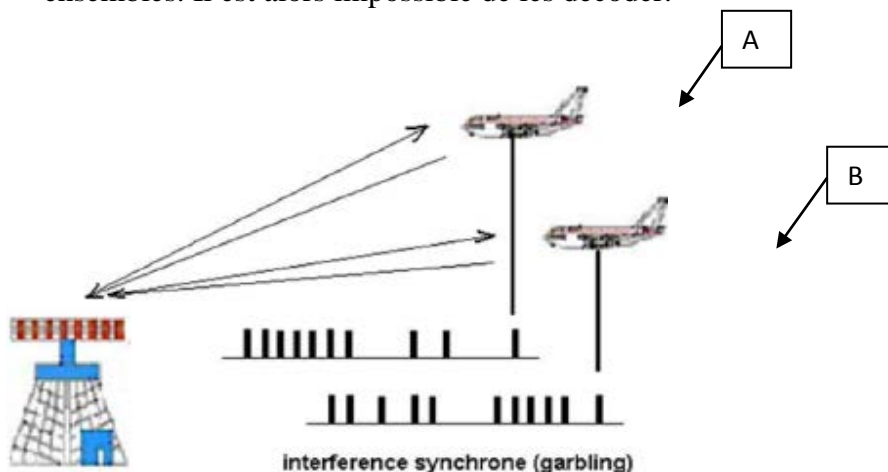


Figure 7 : Présentation fruit

- **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 ensemble. 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.

- **Les réflexions**

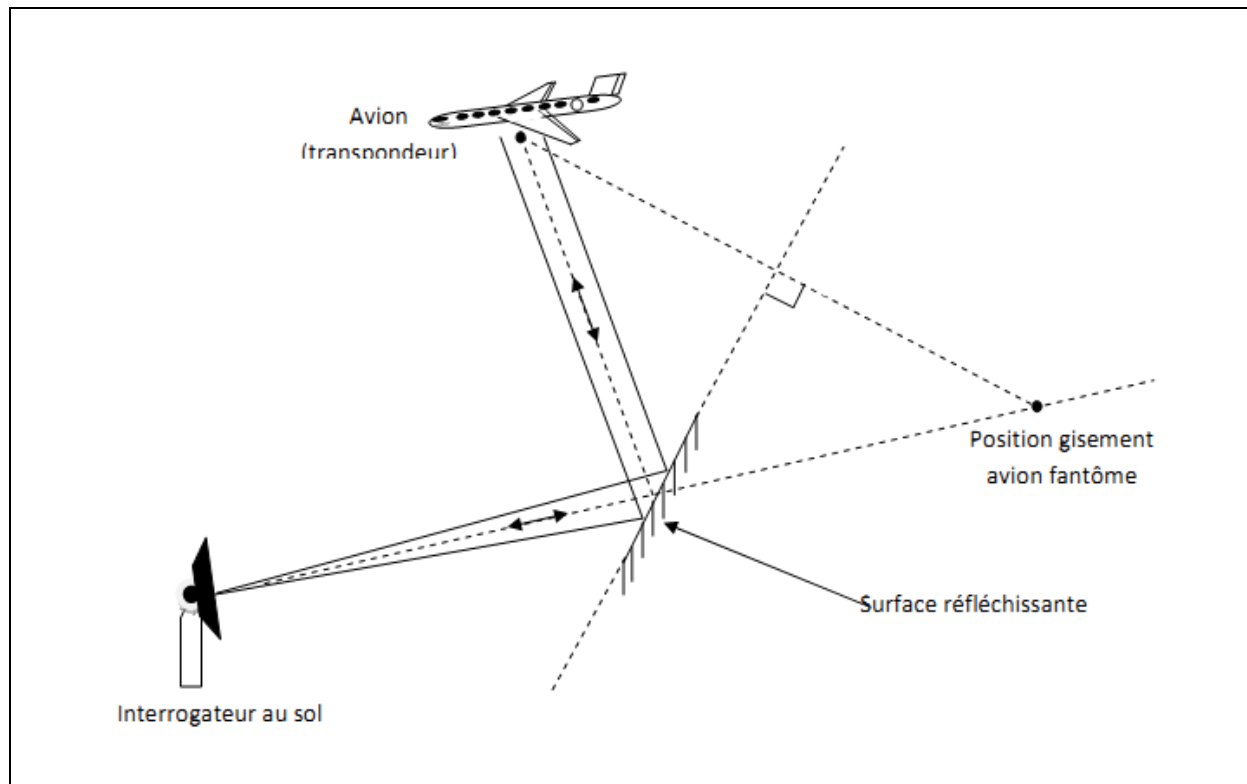


Figure 11 : Les réflecteurs

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.