

# Radartutorial

## Chapitre 2: Types de radar et fréquences

(Éditeur: Christian Wolff, traduction en langue française et révision:  
Pierre Vaillant et Christophe Paumier, Version 3 août 2011)

### Sommaire

<b>CLASSIFICATION EN FONCTION DES TECHNOLOGIES .....</b>	<b>2</b>
RADARS IMAGEURS / RADARS NON IMAGEURS .....	2
RADARS A IMPULSIONS .....	2
<i>Radars primaires</i> .....	2
<i>Radars secondaires</i> .....	4
RADARS A ONDE CONTINUE .....	5
<i>Radars à onde continue non modulée</i> .....	5
<i>Radars à onde continue modulée</i> .....	6
RADARS BISTATIQUES .....	6
<i>Radars multistatiques</i> .....	7
RADAR A VISEE LATERALE (RVL) .....	7
RADAR A SYNTHESE D'OUVERTURE (RSO) .....	8
<b>CLASSIFICATION PAR USAGE .....</b>	<b>10</b>
RADARS MULTIFONCTIONS .....	10
RADAR DE POURSUITE DE CIBLES MULTIPLES .....	10
CONTROLE DU TRAFIC AERIEN .....	11
RADAR METEOROLOGIQUE .....	11
RADAR DE SURFACE (SMR) .....	12
RADAR DE DEFENSE AERIENNE .....	13
RADAR DE VEILLE AERIENNE .....	13
RADAR DE CONTRE-BATTERIE .....	13
RADAR DE CHAMP DE BATAILLE .....	14
CONTROLE DES COMBATS .....	14
TELEGUIDAGE .....	14
RADAR DE CHAMP DE BATAILLE .....	15
INTERCEPTION DES MISSILES .....	15
BARRIERE RADAR .....	15
RADAR DE CONTROLE ROUTIER .....	15
MARITIME .....	16
RADAR DE REGULATION DE DISTANCE .....	16
RADAR A PENETRATION DE SOL .....	16
TEST DE MATERIAU .....	16
TELEMETRIE ET TELEDETECTION .....	17
ASTRONOMIE .....	17
<b>ONDES ET BANDES DE FREQUENCES .....</b>	<b>17</b>

### Objectifs

Le radar se décline en une variété de forme et de dimensions selon les demandes de l'utilisateur. Il est utilisé pour le contrôle du trafic aérien autour d'un aéroport, la surveillance à longue portée, la détection des missiles ou dans leur système de contrôle de vol, en météorologie, etc. Les radars peuvent être compacts et portables pour être opérés par un seul opérateur ou être très élaborés et nécessiter plusieurs pièces pour les abriter.

Ce chapitre donne un aperçu d'une variété de radar. L'étudiant devrait en tirer les différences entre les radars primaires et secondaires, les radars à onde continue et pulsés, les radars imageurs et non-imageurs. Par une présentation de différentes utilisations, il apprendra à connaître les avantages et désavantages de chacun et les bandes de fréquences qu'ils utilisent.

## Classification en fonction des technologies

En fonction des informations qu'ils doivent fournir, les équipements radars utilisent des qualités et des technologies différentes. Ceci se traduit par une première classification des systèmes radars:

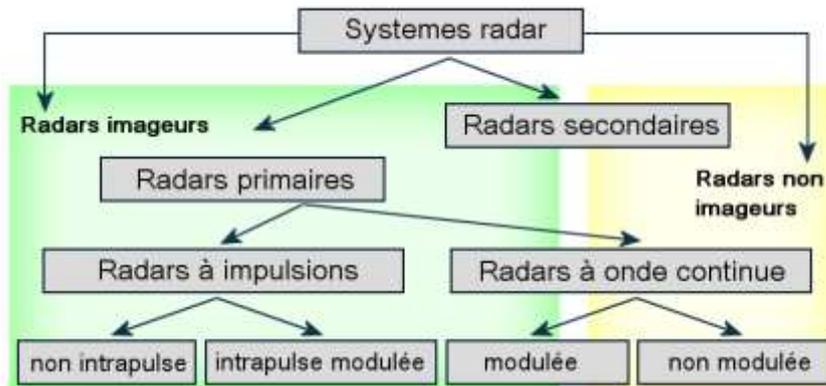


Figure 1 : Organigramme des systèmes radar

### 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 les radios 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.

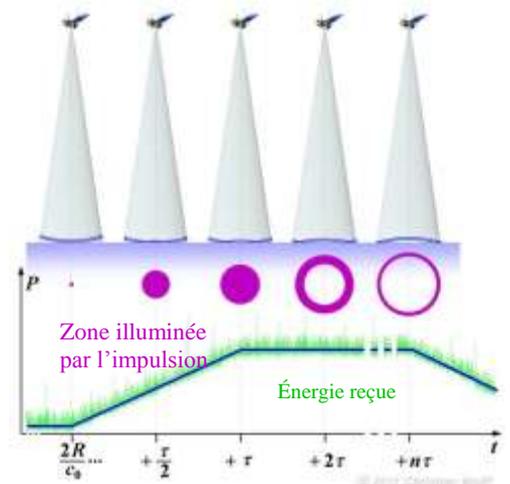


Figure 2 : Impact des différentes parties de l'impulsion de durée  $\tau$  d'un altimètre avec une surface lisse.

### 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.

### Radars primaires

Un radar primaire émet des signaux hyperfréquences qui sont réfléchis par les cibles. Les échos retournés sont reçus et étudiés par le radar même qui en est l'origine. Le radar primaire a un intérêt principal: *la cible qu'il éclaire reste passive.*

Le diagramme de la Figure 4 montre les composantes d'un radar primaire à diversité de fréquence qui ne fait que

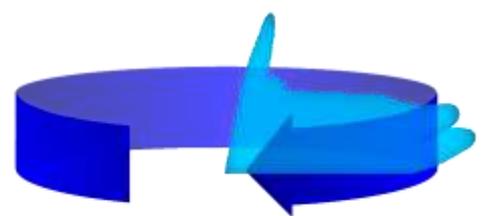


Figure 3 : Diagramme typique d'un radar deux dimensions, le faisceau en cosécante carrée donne la portée et la rotation donne l'azimut.

doubler celles d'un radar primaire standard, Le générateur de synchronisation délivre le signal qui synchronise la transmission des impulsions, l'écran de visualisation et les autres circuits associés. Le modulateur élabore, à partir d'une source de très haute tension, l'impulsion qui excitera l'émetteur pendant la durée voulue. L'émetteur du radar génère le signal hyperfréquence sous la forme d'une impulsion courte et de forte puissance, rayonnée dans l'air par l'antenne.

Le duplexeur connecte l'antenne alternativement à l'émetteur et au récepteur, rendant possible l'utilisation d'une antenne unique. Cette commutation est nécessaire afin d'éviter que les impulsions de forte puissance transmises par l'émetteur endommagent ou détruisent les circuits du récepteur (calibrés pour le traitement de signaux de très faible puissance).

L'antenne diffuse l'énergie de l'émetteur dans l'espace dans un volume déterminé et avec l'efficacité voulue. Le processus est identique à la réception, l'antenne captant alors l'énergie diffuse dans un volume d'espace donné et selon son efficacité. Le récepteur amplifie et démodule les signaux hyperfréquences reçus. A sa sortie, un récepteur fournit des signaux vidéos qui seront mis à la disposition de l'utilisateur sous forme graphique sur un affichage facilement interprétable de la position relative des cibles détectées par le radar.

### Radar à diversité de fréquence

Afin de solutionner en partie le problème de la fluctuation de la taille des cibles, de nombreux radars primaires utilisent deux (ou plus) fréquences d'illumination. La diversité de fréquence est couramment réalisée grâce à l'emploi de deux émetteurs fonctionnant en tandem permettant d'éclairer la cible avec deux signaux de fréquences distinctes, comme le montre la Figure 4.

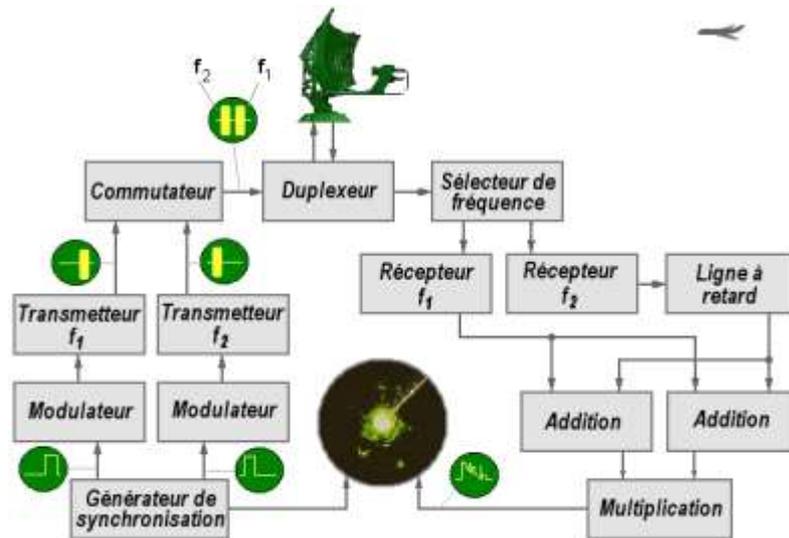


Figure 4: Principe de fonctionnement du radar à diversité de fréquence, doublant le traitement d'un radar primaire

Les signaux réfléchis peuvent être traités séparément à la réception de façon à en assurer la cohérence. En plus du gain de 3 dB lié à l'utilisation simultanée de deux émetteurs en parallèle, le fonctionnement sur deux fréquences distinctes permet d'améliorer les performances du radar (typiquement de l'ordre de 2,8 dB).

Dans le diagramme, certains circuits sont ajoutés pour la manipulation des fréquences indépendantes. Le commutateur est un interrupteur - sélecteur qui permet de gérer la circulation des signaux hyperfréquences. Lorsqu'il est «passif», les signaux reçus sur ses entrées se retrouvent simultanément sur son unique sortie. Lorsqu'il est «actif», pour éviter l'embouteillage sur la sortie unique, les signaux sont décalés dans le temps les uns par rapport aux autres grâce à des «portes temporelles» (contrôlées au moyen d'impulsions comme le montre le schéma).

Le sélecteur de fréquence est un filtre adapté à chaque fréquence émise. Il distribue les échos reçus à chaque récepteur en fonction de leur fréquence.

A l'émission, l'impulsion de fréquence  $f_2$  suit l'impulsion  $f_1$  après un retard déterminé. Afin d'annuler ce décalage à la réception (l'impulsion 2 n'ira pas plus vite pour rattraper son retard, même si nous l'exigeons!), l'impulsion 1 doit à son tour subir un retard exactement identique. Le traitement du signal peut alors s'appliquer simultanément aux deux signaux synchrones.

### Traitement du signal

Lorsque le radar utilise plusieurs fréquences, chaque signal est traité par une voie de réception propre à sa fréquence. Les signaux sont ensuite combinés et écrêtés par rapport à une valeur seuil. Plusieurs traitements sont utilisés :

- addition linéaires des amplitudes de chaque voie (optimisation de la portée maximum aux dépends de la résistance au brouillage);
- multiplication des amplitudes de chaque voie (optimisation de la résistance au brouillage aux dépends de la portée maximum);
- addition des carrés des amplitudes de chaque voie (procédure optimale!);
- **addition linéaire des amplitudes de plusieurs voies puis multiplication des sommes partielles** (traitement employé dans le diagramme fonctionnel ci-dessus.);
- Multiplication des amplitudes de plusieurs voies puis addition des produits partiels.

L'emploi de l'une de ces techniques permet d'atteindre un traitement des plus efficaces.

Mais il est généralement impossible de connaître celle qui est employée pour un système donné, cette information étant considérée comme hautement confidentielle.

### Radar secondaires

Le radar secondaire fonctionne selon un principe différent: *la cible qu'il éclaire génère (de façon active) les signaux de réponse*. Le radar secondaire transmet des impulsions hyperfréquences (appelées **interrogations**). Celles-ci n'ont pas pour but d'être réfléchies, la cible étant équipée d'un transpondeur qui les reçoit et les traite. Ensuite, sur une fréquence différente, le transpondeur met en forme et émet un message de réponse qui peut être reçu et décodé par notre radar secondaire.

Dans le cas des radars secondaires, la coopération nécessaire de la cible (utilisation d'un transpondeur) permet une très forte réduction de la puissance émise (par rapport à un radar primaire offrant une portée de détection identique).

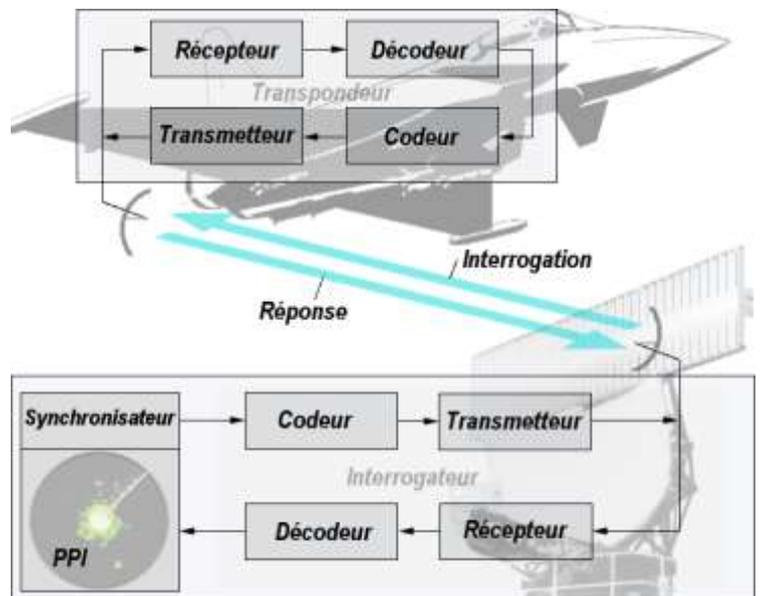


Figure 5 : Diagramme d'utilisation d'un radar secondaire

$$R \sim \sqrt[4]{P_{PSR}} = \sqrt[2]{P_{SSR}}$$

Équation 1 : Variation de la puissance nécessaire dans le cas d'un radar primaire (PSR) et secondaire (SSR).

En effet, la puissance émise est un paramètre de l'équation du radar qui doit tenir compte du trajet de l'onde aller et retour dans le cas du radar primaire, mais uniquement d'un « aller simple » dans le cas du radar secondaire. Cette énergie varie entre  $1/R^2$  à chaque partie du trajet comme dans l'Équation 1.

On peut considérer que la puissance nécessaire pour un radar secondaire sera en moyenne plus de 1 000 fois inférieure à celle que devra rayonner un radar primaire ayant la même portée. Il résulte de cela un émetteur sensiblement plus simple, plus petit, et moins cher. Le récepteur peut être moins sensible, la puissance du signal de réponse étant supérieure à celle de l'écho traditionnel réfléchi par une cible passive. Ceci a cependant une action néfaste sur les lobes secondaires qui doit alors être compensée par l'utilisation de dispositifs de suppression des lobes secondaires.

Comme les fréquences d'émission et de réception sont différentes, le problème des échos de sol n'existe pas. Il est donc inutile de disposer d'un dispositif de visualisation des cibles mobiles ou VCM (en anglais MTI pour Moving Target Indicator) pour séparer les échos utiles des échos de sol parasites. Par contre un changement de fréquence pour faire face à un brouillage n'est pas envisageable. D'autre part, des problèmes d'interférences spécifiques aux radars secondaires rendent nécessaires l'application de mesures spéciales sur le câblage.

### 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.

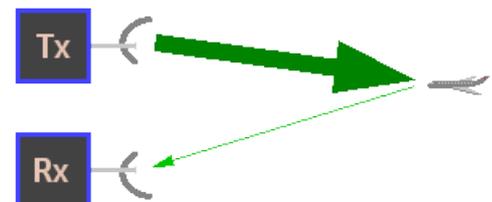


Figure 6 : Radar à onde continue

Ce principe impose de résoudre les deux problèmes suivants:

- empêcher l'énergie émise de passer directement de l'émetteur au récepteur (couplage par signal direct),
- créer des repères temporels sur les échos reçus afin de pouvoir mesurer des durées (donc des distances).

Le passage direct de l'énergie émise vers le récepteur peut être évité par :

- **écart physique** entre les antennes d'émission et de réception, par exemple en illuminant une cible à l'aide d'un puissant émetteur alors que le récepteur se trouve dans le missile volant vers la cible;
- **écart en fréquence** du fait de la fréquence Doppler lorsque l'on mesure des vitesses.

### 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 non modulé 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). Des équipements plus récents (LIDAR) fonctionnent dans la bande de fréquence des lasers et permettent d'autres mesures que celle de la vitesse.

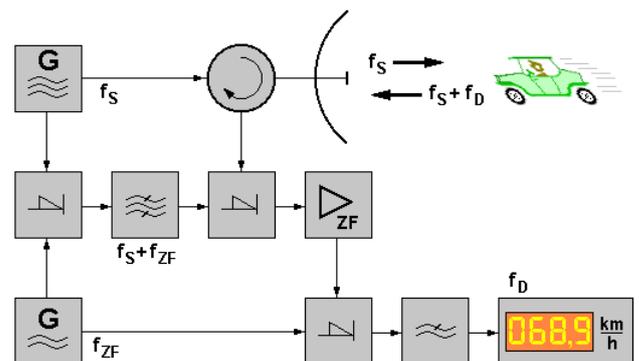


Figure 7 : Diagramme d'un radar Doppler à onde continue

La capacité de mesurer une durée n'est pas

nécessaire pour les radars routiers, la distance à laquelle se trouve un véhicule en excès de vitesse étant sans importance. Lorsque l'on a besoin d'une information de distance, on peut alors utiliser une modulation de la fréquence ou un codage de la phase du signal émis.

Un radar CW émettant un signal continu non modulé ne peut mesurer que la vitesse d'une cible, par l'utilisation de l'effet Doppler. Il ne peut ni mesurer de distance, ni discerner deux cibles illuminées simultanément.

### 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.

Comme il est généralement difficile d'émettre aisément des fréquences aléatoires, les radars à onde continue modulée en fréquence (FMCW) font varier progressivement la fréquence de leur signal au rythme de rampes ascendantes et descendantes.

$$R = \frac{c_0 \Delta t}{2} \quad (2)$$

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.

### Radars bistatiques

En général, le transmetteur et le récepteur d'un radar partage la même antenne. C'est le principe du radar monostatique. Avant le développement du duplexeur, qui permet d'alterner entre les deux usages, cela était impossible et les premiers radars devaient utiliser une antenne pour chacune des fonctions. C'était le cas des radars de la «Chain Home» britannique, le large premier réseau de radars mis en opération juste avant le début de la Seconde guerre mondiale.

Un tel arrangement est appelé un radar bistatique. Bien que l'antenne réceptrice et émettrice puisse être co-localisées, le terme en est venu le plus souvent à désigner un système radar où une antenne secondaire reçoit la diffusion latérale les échos des cibles sondé par un radar principal monostatique, lui-même situé à une distance de plusieurs kilomètres ou dizaines de kilomètres du récepteur secondaire. On peut ainsi adjoindre une antenne réceptrice bistatique à un radar Doppler monostatique ou mettre en relation deux radars monostatiques qui

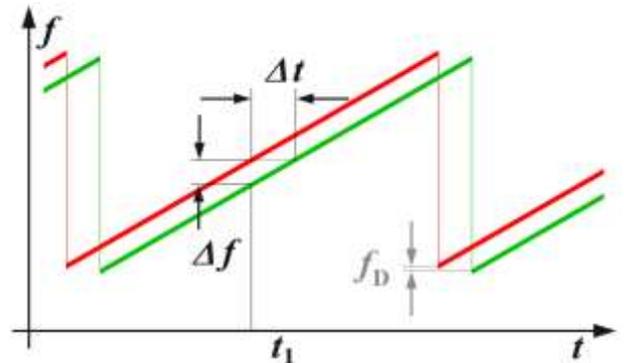


Figure 8 : Mesure de distance par un système FMCW

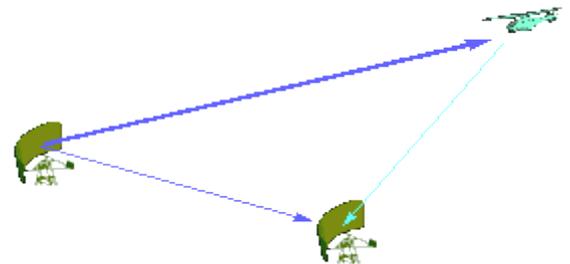


Figure 9 : Deux radars coopérant pour former un radar bistatique: le premier émet et le second écoute les échos des cibles.

utilisent la même fréquence. Dans un tel arrangement, plus la distance est grande entre les deux composantes, plus le parallaxe est grand. Cela donne deux points de vue de la même cible.

### Avantages principaux

- Faible coût à l'achat et à l'entretien (si on utilise l'émetteur d'un tiers);
- Pas d'autorisation d'utilisation d'une fréquence (si on utilise l'émetteur d'un tiers);
- Mise en œuvre secrète du récepteur dans les utilisations militaires;
- Bonne résistance aux contre-mesures électroniques car le type d'onde, la fréquence utilisée et la position du récepteur sont inconnus;
- Possibilité d'optimiser la surface équivalente radar (SER) résultante des effets géométriques de la cible.

Le concept de radar bistatique refait surface lorsque la technologie et les coûts ne permettent pas l'utilisation d'un radar dédié à une tâche. Il a plusieurs fois disparu, à cause de ses désavantages, lorsque d'autres solutions ont été trouvées.

Dans le cas d'un radar militaire, il existe différents usages dont celui de rendre possible la détection d'avions furtifs. Ces derniers sont conçus pour minimiser le retour vers un radar classique mais ce n'est pas nécessairement le cas pour l'énergie reflétée dans les autres directions, en particulier vers l'antenne secondaire d'un radar bistatique. Les radars bistatiques sont également fréquemment utilisés dans le téléguidage des missiles.

### Radars multistatiques

En recevant latéralement, les lobes secondaires d'un radar monostatique, le site secondaire peut se synchroniser avec celui-ci. Si le lobe principal est détecté, l'information sur l'azimut peut être également calculée. Un certain nombre d'antennes peuvent être intégrées dans un tel système et peuvent être utilisés pour inter-corréler la position de la cible, on parle alors de radar «multistatique».

Les pales des hélicoptères ont une vitesse de rotation limite et leur bout peut atteindre une vitesse près de celle du son sans la dépasser. L'analyse multistatique du spectre de vitesse de ces pales par l'effet Doppler-Fizeau peut donner l'attitude de l'hélicoptère et sa trajectoire.

Une idée qui a fait surface lors de la guerre du Kosovo, au début des années 1990, fut d'émettre un signal radio dans toutes les directions, hors de la portée politique ou technique des opposants, et de recevoir passivement avec des antennes bistatiques sur le théâtre des opérations. Ces dernières auraient permis de contrôler les systèmes de défense anti-aérienne. Des radars VHF comme les P-12 or P-18 étaient particulièrement bien adaptés à ce rôle. En outre, l'effet de camouflage de la cible à très basses fréquences est presque inefficace à cause de la résonance, la longueur d'onde utilisée étant dans la région de diffusion de Mie.

### Radars à visée latérale (RVL)

Un radar à visée latérale (RVL) est un radar monté sur un avion, ou un satellite, et qui est pointé vers le sol dans une direction perpendiculaire au déplacement du véhicule. Le faisceau illumine ainsi un couloir au sol qui dépend de la largeur du faisceau et de la distance parcourue par le véhicule. La portée du radar est la distance entre la projection au sol de la trajectoire de l'avion/satellite et la distance maximale atteinte par le faisceau. La résolution en azimut correspond à l'angle balayé par le radar.

Le RVL est un radar à ouverture réelle, c'est-à-dire que la résolution des images dépend uniquement de la

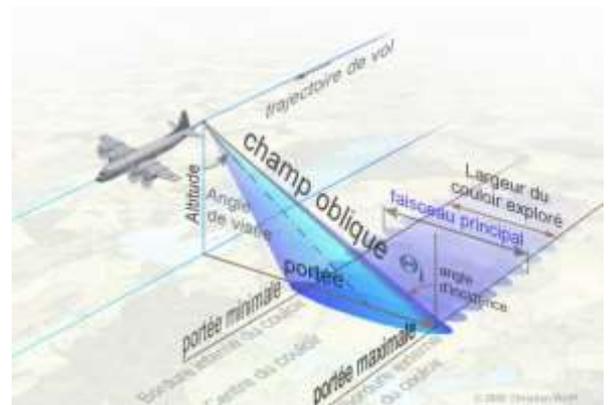


Figure 10 : Géométrie du faisceau du radar à visée latérale

largeur du faisceau et donc des dimensions de l'antenne. Pour obtenir une bonne résolution, l'antenne doit être assez grande. La résolution en azimut,  $R_a$ , est définie comme:

$$R_a = \frac{H \lambda}{L \cos \theta} \quad \begin{array}{l} H = \text{hauteur au-dessus du sol de l'antenne (hauteur de l'avion)} \\ L = \text{longueur réelle de l'antenne} \\ \lambda = \text{longueur d'onde du faisceau transmis} \\ \theta = \text{angle d'incidence} \end{array} \quad (3)$$

L'équation montre que la hauteur de l'appareil est déterminante sur la résolution azimutale du RVL. Plus la hauteur de la plateforme de transport du radar est élevée, plus l'antenne (L) doit être longue pour garder une bonne résolution. Ce type de radar est donc peu pratique pour les satellites car il nécessiterait une antenne excessivement grande. Ils utilisent plutôt un traitement différent des données, soit le *radar à synthèse d'ouverture (RSO)*.

La dimension de la cellule de résolution du radar va également varier avec l'angle de visée. Elle est la plus petite sous l'appareil (nadir) et augmente avec l'angle latéral. Cela implique une distorsion dans les données angulaire: les échos provenant d'un angle près du nadir sont beaucoup mieux résolus que ceux provenant d'un angle plus grand.

Dans tous les cas, l'antenne du radar sonde dans la direction radiale entre le radar et une zone au sol, c'est le *champ oblique*. La *portée* est la distance entre la trajectoire de l'appareil et la zone sondée au sol. La résolution latérale au sol du faisceau,  $R_r$ , est définie par :

$$R_r = \frac{c_0 t_p}{2 \sin \theta} \quad \begin{array}{l} c_0 = \text{vitesse de la lumière} \\ t_p = \text{durée de l'impulsion} \\ \theta = \text{angle d'incidence} \end{array} \quad (4)$$

À titre d'exemple, pour un RVL ayant comme caractéristiques:  $\lambda = 1 \text{ cm}$ ,  $L = 3 \text{ m}$ ,  $H = 6\,000 \text{ m}$ ,  $\theta = 60^\circ$ ,  $t_p = 100 \text{ ns}$ . La résolution du faisceau sera de:  $R_a = 40 \text{ m}$ ,  $R_r = 17,3 \text{ m}$ . Si le même RVL était placé à 600 km du sol sur un satellite, la résolution azimutale serait de  $R_a = 4000 \text{ m}$ .

### Radars à synthèse d'ouverture (RSO)

Un radar à synthèse d'ouverture (RSO) est un radar cohérent utilisé sur les avions et les satellites pour sonder latéralement à leur trajectoire vers le sol ou la mer. Le traitement informatique des données successives provenant du même secteur permet de simuler la résolution d'une très grande antenne, de nombreuses fois plus fine que celle de l'antenne utilisée.

En effet, lorsque le radar se déplace au-dessus d'un secteur, il envoie de nombreuses impulsions par secondes (FRI) ce qui veut dire que dans la cellule de résolution sondée au sol, la même cible est balayée de nombreuses fois mais avec un angle et une position relative légèrement différents. Chacune de ces données aura donc une intensité propre, à cause de la variation de la surface équivalente radar, et une phase Doppler différente à cause de la portée oblique qui change. On n'a qu'à penser au point de vue changeant du passager d'un avion lorsqu'il regarde un point au sol.

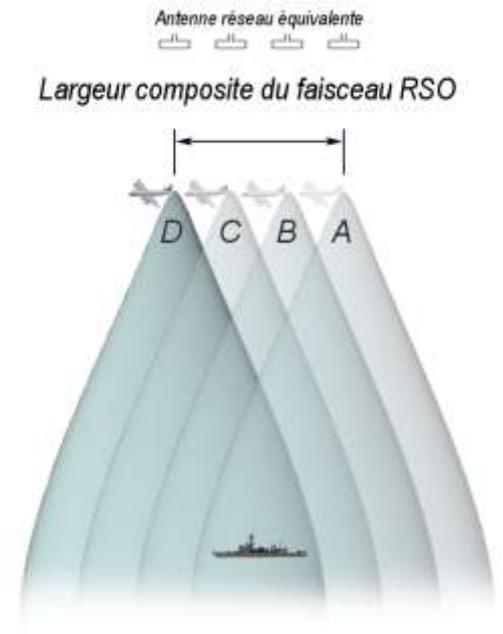


Figure 11 : Synthèse du faisceau total

Le principe du RSO est similaire à celui d'une antenne réseau à commande de phase. La différence provient du fait qu'au lieu d'utiliser un grand nombre d'éléments radiants pour sonder une seule fois, le RSO utilise de multiples sondages successifs, décalés dans le temps et l'espace, pour obtenir un sondage composite.

Une cible, telle un navire, n'occupe qu'une partie du faisceau. Durant le déplacement du porteur du radar, elle rétrodiffusera de l'énergie vers le radar. L'intensité et la phase de ces échos variera selon sa position dans la suite d'impulsions. Le logiciel de traitement des données emmagasine les résultats de ces sondages durant la période  $T$  que prend le porteur pour aller de  $A$  à  $D$  dans la figure 11. Cela permet de reconstituer le signal qu'aurait reçu une antenne de même longueur ( $A$  à  $D$ ), soit  $v$  fois  $T$  où  $v$  est la vitesse de l'avion. Comme le point de vue du radar change lors de son déplacement, une synthèse de ces données est équivalente à allonger l'antenne réelle utilisée comme si elle était de longueur  $T$  et donc d'obtenir une meilleure résolution.

La largeur du faisceau composite et le temps accru passé à balayer la cible se contrebalancent de telle sorte que la résolution reste constante durant tout le couloir sondé. La résolution que l'on peut atteindre avec un RSO est approximativement la moitié de la longueur de l'antenne réelle du radar et ne change pas avec l'altitude de prise des données ou la distance entre le radar et la cible.

Équipement nécessaire à un RSO :

- Un transmetteur entièrement cohérent et très stable ;
- Un ordinateur efficace et puissant pour effectuer le traitement des données ;
- Une connaissance exacte de la trajectoire et de la vitesse de vol du porteur.

En utilisant la technique du RSO, les ingénieurs peuvent obtenir avec une antenne normale des résolutions qui nécessiteraient une antenne énorme, jusqu'à 10 mètres, et qu'il serait impossible à placer sur un avion ou un satellite.

Il existe trois modes de sondages :

- **En bande** : similaire au sondage du RVL où l'angle d'incidence du radar est fixe ;
- **Saisie hyperfine**, connu également par le terme anglais de « **Spotlight** » ou « **Spot** » : il s'agit d'orienter le radar toujours vers la même zone lors du déplacement du porteur. Dans ce mode, on utilise une antenne réseau à commande de phase dont le faisceau est orienté grâce à un logiciel. Cela permet d'obtenir un plus grand nombre de balayages de la zone d'intérêt que dans le mode classique et donc plus d'informations, ce qui a pour effet d'augmenter la longueur de l'ouverture synthétique et donc la résolution. Le tout se fait cependant aux dépens de la couverture spatiale ;
- **Balayage** : Dans ce mode, le faisceau radar effectue un balayage angulaire entre le point sous le porteur (le nadir) et un angle déterminé d'incidence au sol. Comme le porteur, avion ou satellite, se déplace, le couloir sondé prendra la forme d'une série de bande en zigzags si l'angle varie linéairement du nadir vers l'extérieur puis l'inverse. Si l'angle varie du nadir vers l'extérieur puis recommence au nadir, on aura une couverture en bandes parallèles avec un certain angle entre elles.

Il existe également des RSO inversés (RSOI) qui utilisent le mouvement de la cible sondée par un radar relativement fixe pour arriver à des résultats similaires. Cette technique est importante pour les avions de patrouille maritime afin de reconnaître leur cible.

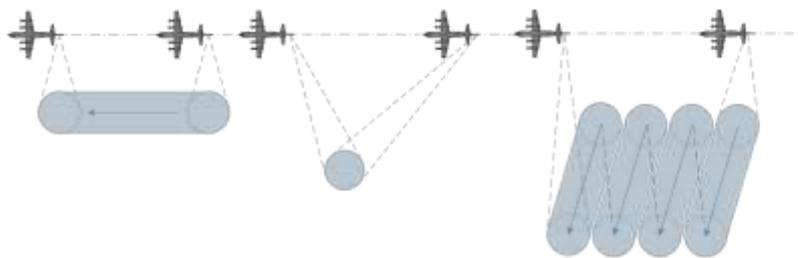


Figure 12 : De gauche à droite : RSO en bande, en saisie hyperfine et en balayage

## Classification par usage

Les radars peuvent se classer en différents types selon l'usage auquel ils sont destinés. Cette section donnera les caractéristiques générales de plusieurs radars en usage courants.

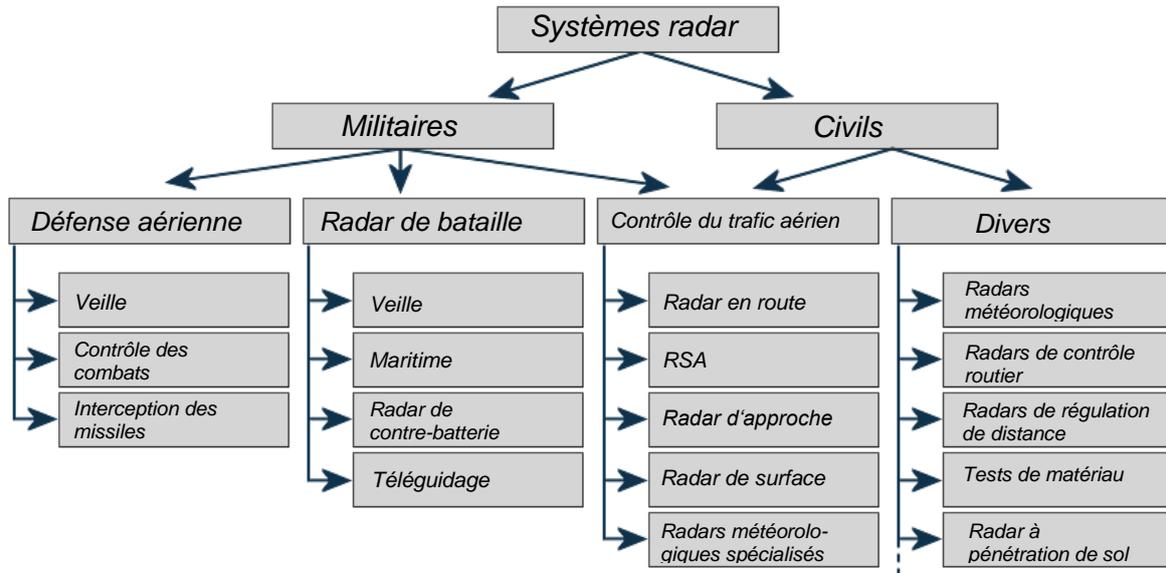


Figure 13 : Classification des radars par usage

### Radars multifonctions

Les antennes à commande de phase actives et multifonctions permettent aux armes modernes de pouvoir détecter une multitude de missiles ayant chacun une très faible signature radar dans un environnement radio très brouillé. Ces radars ont un grand nombre de canaux de contrôle de tir qui peuvent chacun suivre les projectiles ennemis et donner des commandes à ceux amis.

Les antennes de ces radars sont des panneaux plats où l'on retrouve une série d'émetteurs à semi-conducteurs à l'arséniure de gallium (GaAs) qui transmettent des impulsions de période variable, donnant une image détaillée de la zone de surveillance. Une telle antenne compte habituellement autour de 2 000 éléments par panneau et quatre panneaux faisant face à chacune des quatre directions orthogonales. Comme chaque panneau couvre 90° en élévation et en azimut, toute la sphère entourant le radar est couverte.

### Radars de poursuite de cibles multiples

Les fonctions d'un radar de poursuite de cibles multiples incluent :

- Détection à longue portée ;
- Recherche à grande vitesse pour des avions volants très bas;
- Haute résolution pour les cibles proches;
- Analyse automatique de la position et de la hauteur des cibles;
- Détection et poursuite simultanée de nombreux avions;
- Assignation d'identificateurs aux cibles qui pourront ensuite être utilisés par d'autres systèmes de poursuite.

## Contrôle du trafic aérien

Les exigences de l'OACI quant aux standards d'un radar primaire de surveillance de la zone autour d'un aéroport ont souvent seulement valeur de recommandation. Les caractéristiques techniques et de stratégie de sondage seront élaborées par les autorités nationales et sont généralement basées sur les données du fabricant du radar. Ces dernières sont souvent bien au-delà des recommandations minimales de l'OACI.

Les exigences de l'OACI pour un radar d'aéroport ne sont malheureusement pas formulée dans un document publié et cohérente. Cependant, une exigence importante est la redondance, ce qui signifie que toutes les composantes majeures doivent avoir des doubles au sein du système pour être remplacées immédiatement en cas de défaillance. En plus de la redondance interne, deux caméras doivent équiper les principaux aéroports.

### Radar «en route»

Les radars «en route» opèrent en général sur la bande L. Ils montrent au contrôleur aérien la position des avions dans une région allant jusqu'à 450 km du radar.

### Radar d'approche de précision

Radar primaire utilisé pour déterminer les écarts latéraux et verticaux de la position d'un aéronef au cours de l'approche finale par rapport à la trajectoire d'approche nominale, ainsi que la distance de cet aéronef au point d'atterrissage. Ils permettent au pilote d'atterrir même avec une visibilité nulle. Les échanges de données entre le radar et l'avion se font de manière verbale avec le pilote ou par signal pulsé pour un pilote automatique.

### Radars de surveillance aérienne (RSA)

Ces radars sont utilisés par les contrôleurs aériens pour l'identification des avions, l'assignation de leur séquence d'approche et pour la supervision de leur atterrissage.

Ils vont également assimiler les données provenant d'autres sources, comme les radars militaires ou le mode 4 des radars secondaires (sauf pour les petits aéroports). Les réseaux qu'ils tissent ainsi peuvent opérer en toutes conditions climatiques.

### Radar météorologique

Les radars météorologiques sont utilisés pour détecter les précipitations. Ils sont des radars primaires dont les caractéristiques sont adaptées à ce rôle: vitesse de rotation de 3 à 6 tours minutes, angles d'élévation multiples, longueur d'onde adaptées à la taille des hydrométéores. Ils souffrent des mêmes limitations que tout radar primaire : problèmes d'échos de sol, de réfraction anormale à travers l'atmosphère, de cibles biologiques comme les oiseaux et les insectes, de blocages, etc.

La différence fondamentale entre les deux est dans le traitement des données. Alors qu'un radar primaire ne doit qu'identifier la présence et la position d'une

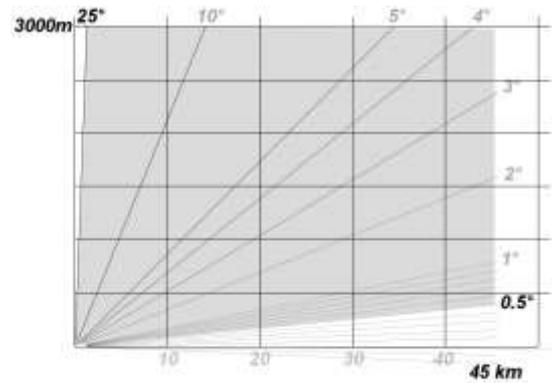


Figure 14 : Recommandations de l'OACI pour couverture de l'espace aérien d'un radar d'aéroport.



Figure 15: Radar «en route»



Figure 16: Radar d'approche de précision



Figure 17: Radar de surveillance aérienne

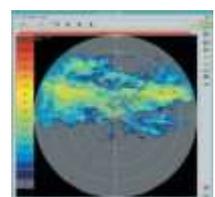


Figure 18: Un écran radar météorologique

cible (présente oui/non), le radar météorologique sonde un volume de l'atmosphère qui est rempli d'une multitude de hydrométéores (pluie, neige, grêle, etc.). Il doit non seulement permettre de reconnaître la position de ces précipitations mais à partir du signal de retour, il doit estimer leur intensité, la vitesse à laquelle elles se déplacent et leurs mouvements à l'intérieur des nuages. Ils sont utilisés individuellement ou en réseaux pour suivre les précipitations, estimer leur intensité et les accumulations, détecter les orages ou autres phénomènes météorologiques dangereux.

Certains de ces radars ont été spécialement conçus pour la navigation aérienne: meilleure résolution spatiale, sondages plus fréquents, algorithmes informatiques spécialement adaptés. C'est le cas des radars météorologiques d'aéroports TDWR.

Un des problèmes en météorologie radar est de connaître avec précision les mouvements dans les nuages. Un seul radar ne permet de connaître que la vitesse radiale des précipitations et de ne calculer que les divergences. Il est possible de voir des indices de rotation mais non d'en calculer l'intensité avec précision.

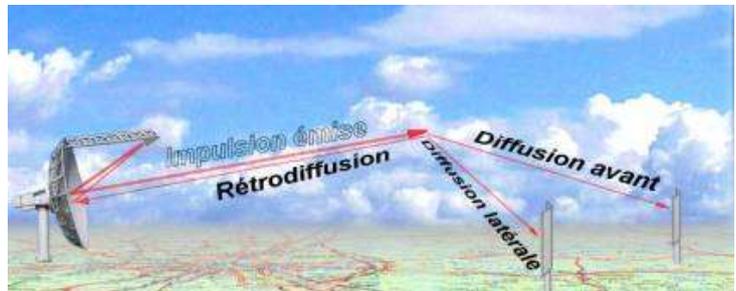


Figure 19 : Radar monostatique avec deux récepteurs bistatiques.

L'utilisation d'un radar bistatique permet à peu de frais d'obtenir la composante tangentielle du vent horizontal car le récepteur secondaire reçoit l'information d'un angle différent. Il s'agit d'une façon beaucoup moins coûteuse que de construire un second radar météorologique.

Une fois les deux composantes du vent horizontal connues, ainsi que la répartition des précipitations dans le nuage, il est possible de calculer les mouvements à trois dimensions dans le nuage, incluant les rotations. Cela est particulièrement intéressant dans l'étude des orages. Ces informations peuvent être intégrées dans les modèles numériques de prévision du temps à fine échelle.

Les antennes secondaires ont un assez large angle de réception azimutal (30 à 60 degrés) et vertical (2 à 10 degrés). Il faut donc une excellente synchronisation entre le radar primaire et les antennes secondaires afin de déterminer la position des échos retournés. Cela limite également la zone de couverture à un emplacement bien défini, comme au-dessus d'un aéroport. La recherche semble être au point mort depuis le milieu des années 2000 à cause de certains problèmes liés à la résolution de ce type de radar.

### **Radar de surface (SMR)**

Radar qui permet de localiser les véhicules et aéronefs sur le tarmac et les pistes. Ces radars primaires permettent de coordonner les mouvements pour éviter les accidents. Le terme et l'abréviation ont été uniformisés par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI).

Il s'agit d'un radar primaire qui balaie toutes les zones où des véhicules de surface et les avions peuvent manœuvrer, excluant les quais d'embarquement.

Le radar de surface est placé dans un endroit qui a une bonne visibilité de tout l'aéroport, en général sur une tour, et possède un taux de rafraîchissement très rapide. Certains aérodromes ayant plusieurs terminaux possèdent plusieurs radars de surface, chacun s'occupant d'un secteur.

L'environnement sondé est fort différent de celui en latitude à cause des nombreux obstacles qui donnent des échos parasites. La qualité de la surveillance est donc souvent mauvaise et limitée. L'identification des cibles n'est souvent pas possible et le contrôleur aérien, du haut de la tour de contrôle, doit compléter par une identification visuelle. C'est l'un des facteurs limitant les mouvements aériens lors de visibilité réduite.



Figure 20: Radar de surface (SMR)

## Radars de défense aérienne

Les radars de défense aérienne peuvent détecter les cibles, leur position, leur trajectoire et leur vitesse sur un large territoire. La portée maximale d'un tel radar peut être de plus de 300 milles nautiques (560 km) dans toutes les directions. On les divise généralement en deux catégories, selon la quantité d'information obtenue: en deux dimensions pour ceux donnant la portée et l'azimut de la cible, en trois dimensions pour ceux ajoutant l'altitude. Les applications les plus importantes des radars de défense aérienne sont :

- Alerte précoce à longue portée (incluant celle par les radars aéroportés de type AWACS);
- Alerte de tirs balistiques et acquisition de leurs mouvements;
- Trouver l'élévation des cibles;
- Guidage des intercepteurs à partir d'un poste de commande au sol.



Figure 21: Radar de défense aérienne

Les radars de défense aérienne sont utilisés comme veille avancée car ils peuvent détecter les avions ou missiles ennemis à longue portée. En cas d'attaque, une alerte précoce est vitale pour permettre un déploiement des défenses comme les batteries anti-aériennes (DCA), les missiles anti-missiles et les avions-chasseurs, qui prennent un certain temps pour être activées.

La distance et l'azimut des cibles obtenus par ces radars sont également utilisés par les radars de contrôle de tir comme premier estimé de leur position dans leur séquence de travail.

Une autre fonction des radars de défense aérienne est de guider les patrouilles de combat aérien pour l'interception des avions ennemis. Dans ce cas, l'information du radar est passée par l'opérateur radar aux escadrilles de combat sous forme de message vocal à la radio ou par une communication directe avec l'ordinateur de bord.

## Radars de veille aérienne

Les radars de veille aérienne détectent et déterminent la position, la vitesse et la trajectoire des cibles aériennes dans une zone relativement grande (généralement 500 km ou plus sur 360 degrés). On les divise en deux catégories selon les coordonnées qu'ils notent.

- 2D pour ceux qui donnent la distance et l'azimut des cibles;
- 3D pour ceux qui ajoute la hauteur.

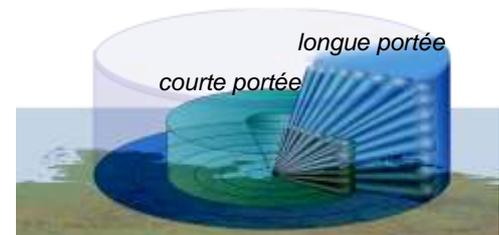


Figure 22 : Diagramme typique du sondage d'un radar trois dimensions. Une série de faisceaux-rayons émit électroniquement dans la verticale, donne la position et l'élévation. La rotation mécanique donne l'azimut

## Radars de contre-batterie

Un radar de contre-batterie sert à déterminer le point de départ d'un tir d'artillerie adverse (canons, mortiers ou même lance-roquettes) par calcul de la trajectoire des projectiles afin d'y riposter le plus vite possible. La position supposée de l'artillerie ennemie est alors affichée sur un écran de situation tactique, en temps réel, dans le poste de commandement qui peut ainsi ajuster le tir de contre-batterie.

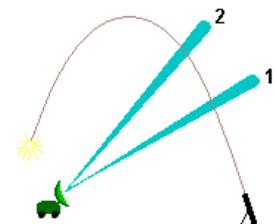


Figure 23 : Principe du radar de contre-batterie

## **Radar de champ de bataille**

Les radars de champ de bataille surveillent les mouvements de tout aéronef ou missile dans une zone de combat. Leur opérateurs peuvent alors coordonner le mouvement des troupes amis, les avertir des dangers et éviter les tirs fratricides.



Figure 24 : Radar de champ de bataille

## **Contrôle des combats**

Une autre fonction des radars de veille aérienne est de guider les patrouilles aériennes au combat. L'information obtenue par le radar passe de l'opérateur aux avions par radio, vocalement ou numériquement. Dans les chasseurs, la mission primordiale du radar est celle d'une aide à la navigation, de l'interception et de la destruction des avions ennemis. Cela nécessite un suivi des trajectoires.

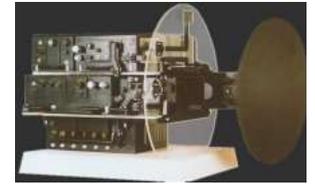


Figure 25 : Radar de contrôle des combats

## **Téléguidage**

Un radar de guidage est généralement intégré dans les systèmes de téléguidage des missiles. Ces derniers utilisent les informations pour:

1. Les missiles peuvent être guidés par un faisceau radar ami jusqu'à la cible;
2. Les missiles autoguidés vont détecter et suivre leur cible grâce à l'énergie radioélectrique qu'elle réfléchit. Cela peut être fait grâce à un système radar complet à bord du missile ou par un récepteur radar dans le missile qui capte l'illumination produite par un radar ami sur la cible;
3. Les missiles à détection passive se dirigent grâce à l'énergie émise par la cible (ex. un radar ennemi).



Figure 26 : Radar de téléguidage

Le fonctionnement du téléguidage semi-actif bistatique est comme suit: le radar de contrôle au sol poursuit la cible pour guider le missile. L'énergie réfléchie est également reçue par l'antenne avant radar de la fusée. Grâce à cette diffusion secondaire, le système de pilotage de la fusée peut effectuer des corrections à sa trajectoire de manière indépendante.

Le **MIM-23 Hawk** est un missile anti-aérien de moyenne portée, développé aux États-Unis, qui utilise un tel principe de téléguidage. La mise en œuvre se déroule généralement de la façon suivante.

1. Les radars de veille balaient l'espace aérien de la batterie;
2. Une cible est détectée et confirmée hostile;
3. La position de la cible est transmise au radar de poursuite qui l'illumine d'onde électromagnétique;
4. L'écho renvoyé par l'objectif est alors capté par le système de guidage du missile;
5. L'engin décolle et file vers sa cible.

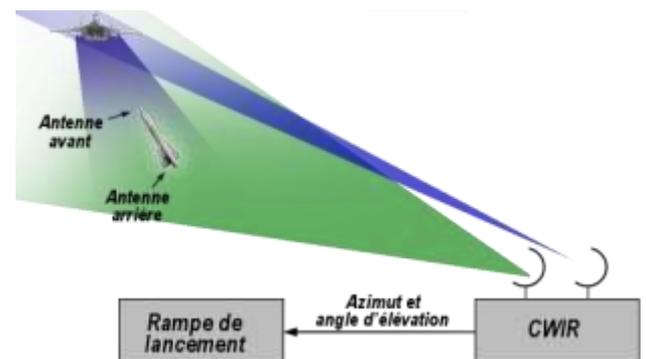


Figure 27: Radar HAWK.

## **Radar de champ de bataille**

L'équipement radar de l'armée a généralement une portée plus courte et est hautement spécialisé. Sur les navires de la marine, le nombre d'antennes radar spécialisées sont de plus en plus remplacé par un radar multifonctions.



Figure 28 : Radar de champ de bataille

## **Interception des missiles**

Le «Patriot» est un système de défense surface-air de la US Army qui comporte un radar spécialisé. Il s'agit d'un système mobile développé à partir du milieu des années 1960 pour intercepter les avions, missiles de croisière et, plus récemment, les missiles de courte portée.



Figure 29 : Interception des missiles

## **Barrière radar**



Figure 30 : Position d'un radar à diffraction

Un radar bistatique peut fonctionner comme une barrière et détecter les cibles qui passent entre l'émetteur et le récepteur. Ceci est un cas particulier du radar bistatique que l'on nomme «radar à diffraction». En effet, l'énergie transmise est diffractée autour la cible et reçue par l'antenne réceptrice, non rétrodiffusée. La surface équivalente radar n'est alors sensible qu'à la silhouette de l'avion et n'est pas influencée par les revêtements et les formes des avions, même furtifs.

Cependant, la localisation et la poursuite de cibles est très difficiles car les informations déduites des mesures de distance, d'azimut et d'effet Doppler tendent vers zéro quelle que soit la position de la cible dans la barrière. Nous verrons cela dans le module suivant.

Cette configuration a déjà été utilisée dès la Second guerre mondiale. Elle ne peut donner que la détection du passage de la cible. Il faut une série de telles barrières pour calculer la trajectoire de celles-ci, ce qui peut devenir coûteux.

## **Radar de contrôle routier**

Les radars de contrôle routier sont une application spécialisée des radars à onde continue. La variation de la fréquence entre le signal émis et celui retourné (effet Doppler-Fizeau) permet de calculer la vitesse des véhicules sur la route. Ils opèrent en général dans la bande K.



Figure 31 : Radar de contrôle routier

## Maritime

Les radars maritimes sont conçus pour la navigation dans de mauvaises conditions météorologiques. Ils aident le pilote à trouver les obstacles et les autres navires le long de son trajet quand la visibilité est réduite par les précipitations ou le brouillard.



Figure 32 : Écran d'un radar de navigation

## Radar de régulation de distance

L'image montre le capteur radar Distronic placé sur la calandre d'une Mercedes-Benz SL-Class roadster. Il fait parti d'un système radar qui sonde à l'avant de l'automobile, jusqu'à 150 mètres, pour détecter les obstacles. Le système de régulation de vitesse avertira le conducteur s'il s'approche d'un véhicule plus lent et pourra même appliquer les freins en dernier ressort.



Figure 33 : Radar de régulation distance

## Radar à pénétration de sol

Un radar à pénétration de sol est un appareil géophysique pour étudier la composition et la structure des sols. En général, on utilise la bande des micro-ondes et des ondes radio (VHF/UHF). On peut sonder ainsi une variété de terrains, incluant les calottes glaciaires et les étendues d'eau.

En géologie, le radar de pénétration de sol sert à cartographier les couches du sous-sol, incluant la roche-mère, le niveau de la nappe phréatique, l'épaisseur du sol arable, les couches sédimentaires et les failles géologiques. L'utilisation de ces radars avec d'autres méthodes géophysiques, comme les essais sismiques, la mesure de résistivité et de conductivité électromagnétique du sol, permet de réduire les incertitudes dans l'évaluation d'un site.



Figure 34 : Un radar à pénétration de sol en action

D'autres applications incluent la recherche d'objets enfouis comme des tuyaux d'égout, des tambours, des réservoirs souterrains, des câbles, des rochers, cartographier les dépotoirs et leurs tranchés de ceinture à la recherche de pertes de contaminants. L'archéologie et les services policiers sont également des utilisateurs car les radars à pénétrations de sols permettent de localiser des objets avant de creuser.

Une étude de Dean Goodman effectuée au Japon a permis de cartographier en trois dimensions un monticule funéraire avec la chambre mortuaire clairement visible tout en bas (**Error! Reference source not found.**). La figure 35 montre une coupe en trois dimensions de cette chambre trouvée sur l'île de Kyushu. Elle contenait les restes d'un guerrier ainsi qu'une variété d'artefacts, dont des épées de bronze.

(Source des images: Dean Goodmann)

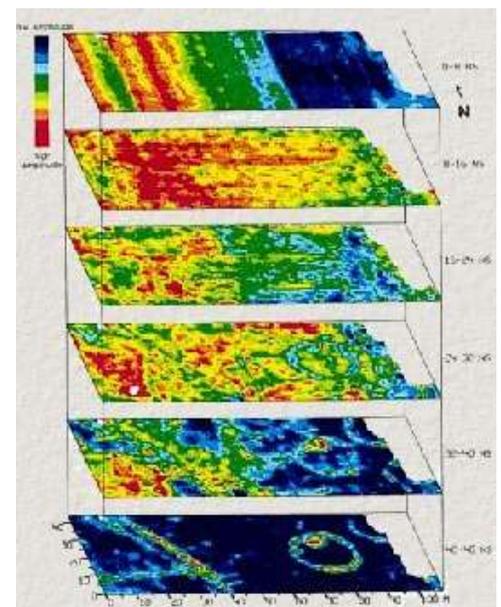


Figure 35 : Coupes horizontales du sous-sol

## Test de matériau

Des radars spécialisés sont utilisés pour pénétrer les objets manufacturés afin de détecter toute défectuosité, sans endommager le matériau.

## Téléométrie et télédétection

Les radars à visée latérales (RVL) et à synthèse d'ouverture (RSO) permettent de cartographier la surface terrestre ou d'identifier des objets, comme des navires et des bâtiments, en 2 dimensions. Si on utilise simultanément deux radars à synthèse d'ouverture, ou bien le même radar est utilisé à des instants différents, les différences de phase point à point des images générées permettent de retrouver par interférométrie la dimension verticale des cibles.

Si plusieurs images simultanées sont générées en utilisant deux faisceaux polarisés orthogonalement, à 90 degrés l'un de l'autre, les cibles rencontrées donneront des retours différents pour chaque faisceau. L'intensité venant des différentes ondes va varier avec le type de cibles rencontrées (matériaux, formes, mécanismes de "rebonds"). Les différences d'intensité et de phases entre les images générées à partir de ces différentes polarisations permettent de déduire des paramètres descriptifs de la scène imagée. On peut ainsi rehausser les contrastes de certains détails non visibles sur des images classiques (non polarimétriques), ou déduire les propriétés de la cible telles que le type de végétation ou le type de sol.

## Astronomie

En astronomie, le concept du radar bistatique a été utilisé pour étudier la trajectoire et les caractéristiques de certains objets passant près de la Terre. En particulier, lors du passage d'astéroïdes comme celui de Golevka 6489, le 9 juin 1995. Un puissant faisceau radar est émis par un radar a été émis par une antenne et est reflété vers la Terre où l'antenne principale et des antennes secondaires situées dans d'autres pays, ou même continents, peuvent la recevoir. La différence de point de vue permet une meilleure estimation des dimensions de l'objet, de sa vitesse de déplacement et de sa trajectoire.

## Ondes et bandes de fréquences

Le spectre des ondes électromagnétiques s'étend jusqu'à des fréquences de l'ordre de  $10^{24}$  Hz. Cette bande de fréquence très large est divisée en sous bandes afin de prendre en compte les différentes propriétés physiques des ondes qui la composent. Ce découpage a été effectué à l'origine selon des critères historiques, modifiés ensuite pour respecter une nomenclature internationale (du moins occidentale) aujourd'hui également obsolète. Cependant la désignation traditionnelle des sous bandes est régulièrement utilisée dans la littérature consacrée au sujet.

À moins que la fréquence exacte ne soit connue, il n'est pas toujours aisé de traduire une ancienne désignation (ligne supérieur de la Figure 36) en utilisant le nouveau système (ligne inférieur de la Figure 36) et en gardant un minimum de précision. Souvent les documents des constructeurs citent les vieilles désignations.

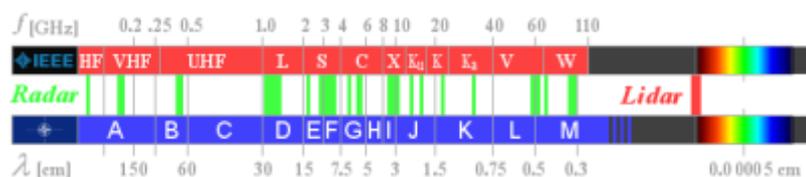


Figure 36 : Ondes et bandes de fréquences.

Les radars peuvent donc 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 pluie ou nuages. Mais une fréquence plus haute permet d'améliorer la précision de l'équipement radar qui l'émet.

La Figure 37 montre, pour des exemples d'équipements, les sous bandes utilisées. Ci-après est présenté une description des caractéristiques et utilisations principales des bandes selon la nouvelle désignation (ancienne en parenthèse).

**Bandes A et B (radars HF et VHF)**

Ces fréquences se situent à moins de 300 MHz et sont utilisés depuis très longtemps. Elles étaient la fine pointe de la technologie radio à l'ouverture de la Seconde Guerre mondiale. Elles sont maintenant surtout utilisées dans les radars de surveillance très éloignées, les radars « transhorizon ».

Il est plus aisé d'obtenir une très haute puissance à ces basses fréquences et leur atténuation est plus faible dans l'atmosphère et elles se propagent par effet de sol. Cependant, leur précision est plus faible qu'à des fréquences plus élevées et elles nécessitent d'énormes antennes pour obtenir un faisceau qui puisse donner un angle et un azimut convenable.

Ces fréquences sont également utilisées en télécommunication ce qui limite les plages et la largeur de bande disponibles pour les radars. Elles sont à nouveau populaires depuis l'arrivée des avions furtifs, leurs formes n'affectant pas autant les basses fréquences.

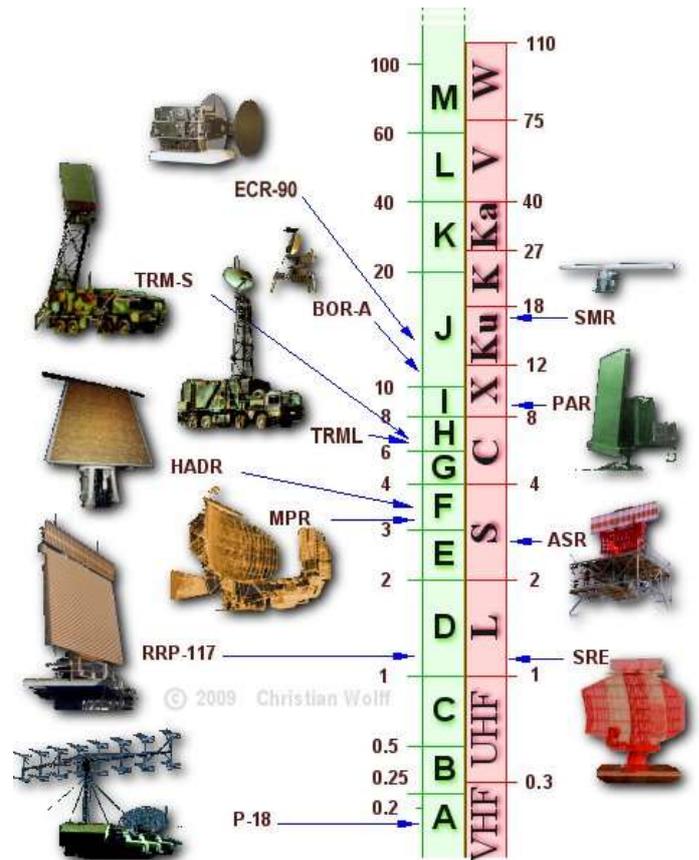


Figure 37 : Exemples de systèmes radar associés aux différentes bandes.

**Bande C (radars UHF)**

Les fréquences de 300 MHz à 1 GHz sont utilisées pour la détection et la poursuite des satellites, ainsi que les missiles balistiques sur de longues trajectoires. Ces radars agissent donc comme surveillance à longue portée et pour l'acquisition de données de tir (ex. Système de défense aérienne étendu de moyenne portée de MEADS). Certains profileurs de vents utilisent également ces longueurs d'ondes, peu affectées par les nuages et les précipitations, pour mesurer les vents en trois dimensions au-dessus de leur site.

La nouvelle technologie des radars de bandes ultra-larges, travaille dans les fréquences de A à C. Ces radars émettent des impulsions dans toutes ces fréquences simultanément ce qui permet de les utiliser dans les radars à pénétration de sol pour la recherche archéologique

**Bande D (radar de bande L)**

Ces fréquence de 1 à 2 GHz sont préférées pour les radars de portée jusqu'à 400 km (250 milles nautiques). Ils peuvent émettent des impulsions de haute puissance ayant une largeur de bande importante et compressés . À cause de la courbure de la Terre, la portée maximale de détection est limitée à basse altitude et les cibles près du sol disparaissent sous l'horizon radar relativement rapidement.

Dans le domaine de la gestion de la circulation aérienne, les radars de longue portée pour les corridors aériens utilisent ces fréquences. Ils sont utilisés en tandem avec une antenne de radar secondaire mono-impulsion assez large, le tout tournant à une vitesse angulaire plus lente que les radars de plus courte portée. Pour se rappeler leur usage dans la nomenclature classique, il suffit de penser que bande L est pour antenne *Large* et de *Longue portée*.

**Bandes E et F (radar de bande S)**

L'atténuation atmosphérique de l'onde des bandes E et F est plus grande que dans la bande précédente sans être excessive et les radars utilisant ces fréquences doivent avoir une plus grande

puissance pour obtenir une portée équivalente de la bande D. Par exemple, le radar MPR, de son nom en anglais Medium Power Radar, utilise une impulsion de 20 MWatts.

Les précipitations commencent à être notées avec ces bandes et c'est pourquoi elles sont utilisées dans les radars météorologiques, généralement dans les régions tropicales et subtropicales. En effet, dans la bande S (l'ancienne nomenclature est plus connue des utilisateurs), l'atténuation est relativement négligeable dans les forts taux précipitations se rencontrant dans ces régions ce qui permet de « voir » au-delà des premiers orages. Cela n'est pas vrai avec les fréquences plus élevées des radars météorologiques utilisées dans les latitudes plus nordiques.

Les radars spéciaux de surveillance aérienne aux aéroports fonctionnant dans cette bande ont une portée de détection des avions, ainsi que de la météo, qui se situe généralement à l'intérieur de 100 km (50 à 60 milles nautiques). Cependant, les radars météorologiques de bande S, comme le WSR-88D du service météorologique américain, ont une portée de plus de 250 km.

### **Bande G (radar de bande C)**

Ces fréquences sont utilisées par plusieurs radars mobiles de champs de bataille pour la surveillance aérienne et le contrôle de tir des missiles de courte et moyenne portée. Comme la résolution pour un même diamètre d'antenne est proportionnel à la fréquence, cette bande permet d'obtenir une bonne résolution avec une antenne réduite et facile à déplacer. Ces fréquences sont également utilisées par les radars météorologiques des régions plus nordiques, comme le Canada et le nord de l'Europe, à cause des coûts beaucoup plus faibles de l'antenne et du transmetteur.

Les précipitations causent une atténuation dans ces fréquences si leur taux horaire est important, ainsi les forts orages « bloquent » partiellement ou totalement la vue. Ce phénomène peut être compensé par un réseau plus dense de radars ayant des zones de couverture se chevauchant partiellement et de points de vue différents.

### **Bandes I et J (radar de bandes X et Ku)**

Ces bandes se situent entre 8 et 12 GHz et nécessitent une antenne encore plus petite, c'est pourquoi elles sont populaires pour les systèmes qui nécessitent légèreté de l'ensemble radars et une portée limitée, car ces ondes sont fortement atténuées par les précipitations, même légères. En autres, les avions de chasse, d'interception et d'attaque, qui disposent de peu de place, en font grand usage. Le système de téléguidage au sol de missiles tire également profit des petites antennes qui permettent une très grande mobilité.

Ces bandes sont également communes dans les radars maritimes civils et militaires. Elles permettent l'utilisation de petites antennes peu coûteuses ayant une portée intéressante et une bonne précision. Généralement, il s'agit d'antennes à guide d'onde à fentes ou à plaque (antennes *patch*) qui sont protégées par un radôme.

Finalement, les radars à synthèse d'ouverture (RSO) pour la cartographie civile et militaire par avion, ou satellite, utilisent le plus souvent ces fréquences. Un radar RSO inverse spécial de patrouille aérienne maritime utilise également ces fréquences pour la mesure de la pollution atmosphérique.

### **Bande K (radars K et Ka)**

Plus la fréquence augmente, plus l'absorption atmosphérique est grande et cause une atténuation du faisceau radar ce qui limite la résolution en distance et la portée. Les radars de bande K sont donc limités à la très courte portée de très grande précision et à un taux très rapide de balayage. Les radars de surface utilisent de très courtes impulsions de quelques nanosecondes à ces fréquences. Ils peuvent ainsi suivre les mouvements des véhicules sur le tarmac et les pistes d'aéroports leur résolution permettant de visualiser la silhouette des véhicules.

### **Bande V**

L'atténuation est de plus en plus grande. Même la vapeur d'eau contenue dans l'air cause une dispersion du signal. La portée des radars qui utilise la bande V n'est donc que de deux mètres et se limitent à la détection de mouvement.

### **Bande W**

Nous arrivons maintenant dans une page de fréquences qui comportent deux modes dus à la forte atténuation par les molécules d'oxygène ( $O_2$ ). Autour de 75 GHz, l'atténuation est maximale, alors qu'à 96 GHz elle est minimale. Les radars récents utilisés pour le stationnement, couvrir les angles morts et la régulation de vitesse dans certaines automobiles de luxe utilisent une fréquence de 75 à 76 GHz. L'atténuation de l'oxygène les immunise des interférences des autres fréquences.

Certains équipement de laboratoires utilisent des fréquences de 96 à 98 GHz pour des expériences sur les radars de fréquences extrêmement élevés, jusqu'à 100 GHz.

---

© 2011 Radartutorial.eu

Tous les textes sont utilisables selon les termes de la *GNU- Free Documentation Licence* et une seconde licence dans les conditions de *Creative Commons*.