

CHAPITRE 1 - DESCRIPTION GENERALE

1	UN PEU D'HISTOIRE	2
2	PRINCIPE DU RADAR A IMPULSIONS.....	11
2.1	Principe de base.....	11
2.2	Mesure de la distance	11
2.3	Mesure des angles.....	12
3	COMPOSITION D'UN RADAR	14
3.1	Schéma d'ensemble	14
3.2	L'antenne	14
3.3	Le duplexeur.....	15
3.4	L'émetteur.....	15
3.4.1	L'étage de puissance	15
3.4.2	Le modulateur	15
3.5	Le récepteur.....	15
3.6	Le traitement et l'exploitation des informations.....	16
3.7	La synchronisation.....	16
3.8	Les informations de pointé angulaire.....	17
3.9	La liaison duplexeur antenne	17
4	NOTIONS SUR LES RADARS SECONDAIRES.....	17
4.1	DESCRIPTION SOMMAIRE.....	17
4.1.1	Principe général.....	17
4.1.2	Modes d'interrogation.....	18
4.2	TRAITEMENT DU SIGNAL IFF.....	19
4.2.1	Suppression des lobes secondaires	19
4.2.2	Traitement du signal.....	20
5	ORGANISATIONS TYPES DE RADARS.....	20
5.1	Le radar panoramique.....	20
5.1.1	Organisation générale.....	20
5.1.2	Principe du scope PPI.....	21
5.1.3	Exploitation automatique d'un radar panoramique.....	22
5.2	Les radars volumétriques.....	26
5.3	Les radars à exploration conique	27
5.4	Les radars d'atterrissage.....	28
5.5	Les radars de sitométrie.....	29
5.6	Les radars aéroportés	29
5.6.1	Les radars de veille aéroportés	29
5.6.2	Les radars de conduite de tir.....	30
5.6.3	Les radars de navigation.....	30
5.6.4	Les radars de reconnaissance du sol.....	30
5.6.5	Autres types de radar	30
6	CRITERES DE PERFORMANCES	31
6.1	Précision et pouvoir discriminateur	31
6.1.1	Définitions de base	31
6.1.2	Mesure de la distance	31
6.1.3	Mesure des angles	32
6.1.4	Notions sur les performances de précision.....	32
6.2	Volume de confusion.....	33
6.3	Mesure de la vitesse.....	34
7	PORTEE D'UN RADAR - DOMAINE DE DETECTION	35

1 UN PEU D'HISTOIRE

(Extraits de « Histoire du radar dans le monde puis en France » par J Darricau et Y Blanchard)

Les premières applications de la radioélectricité furent les télécommunications puis la radionavigation mais, dès le début du siècle, des précurseurs envisagèrent la possibilité de détecter la présence d'objets métalliques par l'utilisation d'ondes électromagnétiques. Cette nécessité de «détecter» les objets sans la participation de l'objet lui-même répondait aux besoins de sécurité de la navigation et de l'anticollision, notamment dans le domaine des transports maritimes. C'est cependant le besoin militaire de la défense aérienne et maritime qui fut le principal moteur de cette technique nouvelle à partir des années trente.

Le mot RADAR lui-même, qui est aujourd'hui universellement adopté pour désigner un matériel répondant à ces exigences, est un nom de code officiellement adopté par la marine nationale des Etats-Unis d'Amérique en *novembre 1940*, abréviation de l'expression :

Radio Detection And Ranging

mais les origines du radar lui sont bien antérieures.

Alors qu'en 1886 *Heinrich Hertz* avait fait la remarque essentielle "qu'il n'y avait pas de différence entre les ondes lumineuses et les ondes électromagnétiques", c'est en 1900 que *Nikola Tesla* exprima la possibilité de détecter la présence et de mesurer le mouvement d'objets lointains à l'aide d'ondes électromagnétiques, idée reprise et développée par *Hugo Gernsback* le "Jules Verne du radar" dans son roman d'anticipation *RALF 124 C41* +, paru en 1912.

La première expérimentation concrète est due à *Christian Hülsmeier* qui breveta en 1904 son *TELEMOBILOSCOPE*, qu'il avait testé avec succès à Cologne puis à Rotterdam avec des portées de l'ordre de 3 kilomètres sur des bateaux. Ce même type d'expérience fut repris en 1916 par *Hans Dominik* et *Richard Scherl*.

Mais à l'époque, l'attention était monopolisée par le développement de la radiotélégraphie, et on ne comprit pas l'intérêt de cette nouvelle application ; il fallut attendre les années 20 avant que l'idée ne refasse surface. On peut citer alors en 1922, les réflexions de *Guglielmo Marconi*, diverses expérimentations, notamment celles de *A.H. Taylor* et *L.C. Young* du *NRL* aux USA et, en France, celles du radio amateur chevronné *M. Brard*, se référant au principe du *professeur Langevin* qui avait été pendant la première guerre l'inventeur du *sonar*.

D'autres expériences auront lieu un peu plus tard, notamment celles de *C. Gutton* et *E. Pierret* en 1927 et de *P. David* et *R. Mesny* en 1928.

La véritable éclosion de cette technique se situe cependant entre *1930 et 1940*, où des recherches et développements ont été menés simultanément dans de nombreux pays notamment les USA, la Grande Bretagne, l'Allemagne et la France, mais aussi la Russie, l'Italie, la Hollande et le Japon.

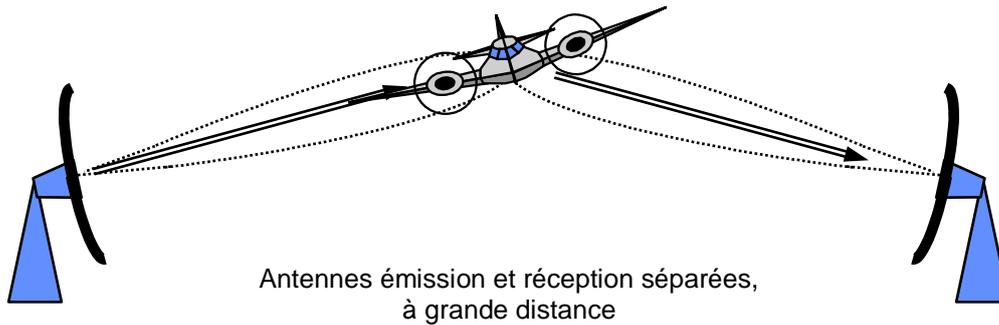
Aux USA

En 1933, le *NRL* expérimente le principe d'un « radar bistatique en onde continue » qui permet de déceler les mouvements d'un avion en vol à une distance de 50 km, puis se réoriente en 1934 vers une méthode « monostatique à impulsions ». Le prototype « *XAF* » (200 MHz, impulsions de 7 μ s et 7,5 kW crête) est disponible fin 1937, des détections d'avions sont obtenues jusqu'à 180 km.

En 1939 la société *RCA* obtient un premier contrat de production pour 20 exemplaires d'un modèle dont la fréquence est portée à 400 MHz ($\lambda = 75$ cm), baptisé « *CXAM* », destiné à

équiper diverses unités de la Navy. Entre temps celle-ci s'est également équipée en radars de conduite de tir, les

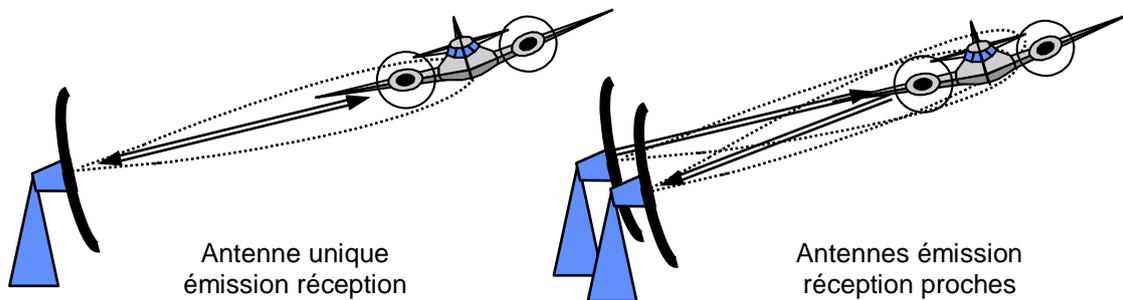
RADAR BISTATIQUE



« *FA Mark 1* » produits par *Bell Laboratory* et fonctionnant à 750 MHz ($\lambda = 40$ cm).

De son côté le *Signal Corps Laboratory*, sous l'égide de son nouveau directeur le Lt Col. R.B. Colton et de l'ingénieur civil P.E. Watson, fait également le choix des impulsions en décembre 1935 pour une maquette « rustique » de « radar bistatique à impulsions » en ondes métriques.

RADAR MONOSTATIQUE



Puis en 1937 il fait la démonstration d'un radar de conduite de tir « monostatique à impulsions » qui utilise 3 antennes, une pour l'émission, une pour la réception en gisement, et une pour la réception en site. Le prototype définitif (205 MHz, 75 kW crête, 3 à 9 μ s), d'une portée de 35 km, est disponible début 1940. Ce radar, industrialisé par la *Western Electric Company* sous l'appellation de « *SCR 268* », sera produit à plus de 3000 exemplaires pendant la guerre.

Un second système de veille, spécifié pour délivrer une alerte précoce (120 miles) sur bombardier, est développé dans le même temps sous la double forme « *SCR-270* » (version mobile) et « *SCR-271* » (version fixe). Au total, près de 800 SCR-270/271 sont construits entre 1939 et 1944 et, après cinq ans d'utilisation, ce radar était encore à la fin de la guerre un équipement standard de l'US Army. Une dernière innovation significative sera en 1941 l'adoption du mode de présentation des échos « *PPI* » (Plan Position Indicator), inventé à Paris en 1939 dans les laboratoires français de LMT et devenu par la suite le standard de tous les radars modernes.

En Grande Bretagne

Plus tardivement, les Anglais se tournent vers le radar en 1935, après la parution du célèbre *mémoire*, de R.A. Watson-Watt sur la « radio-détection ».

Les choix doivent être impérativement fixés en fonction des moyens immédiatement disponibles. On travaillera donc en ondes décamétriques où l'on sait produire des puissances convenables, la localisation des cibles sera assurée à la réception par un radiogoniomètre à cadres croisés, qui est également un matériel disponible. Sous ces contraintes très fortes, Watson-Watt a ainsi inventé un type de radar parfaitement original et qui n'aura d'équivalent dans aucun autre pays.

En décembre 1935, le Ministère de l'Air dispose de suffisamment d'éléments pour décider de bâtir aussi vite que possible une première chaîne de cinq stations de « *RDF* » (Radio Direction Finding) de part et d'autre de la Tamise pour protéger les approches de Londres. Ces cinq stations seront disponibles à la fin 1937 et leur nombre sera ensuite porté à dix huit, pour constituer la célèbre « *Chain Home* » ou *CH* achevée le 1er avril 1939.

En regard des XAF ou SCR américains, une station type de la *CH*, avec une surface au sol de près d'un hectare, apparaît bien éloignée de l'idée qu'on se fait aujourd'hui du radar ! Gamme décamétrique oblige, les antennes d'émission sont portées par 4 énormes pylônes de 110 m de haut, soutenant 3 réseaux de 6 à 8 dipôles placés respectivement à des hauteurs de 90 m, 70 m et 30 m. l'émission se fait sur deux fréquences ($\lambda = 12$ m et $\lambda = 6$ m), avec une puissance de 350 kW, puis 750 kW crête, une durée d'impulsion variable entre 4 et 45 μ s, et une fréquence de répétition entre 10 et 50 Hz, elle couvre un secteur d'environ 60 degrés en gisement.

La réception se fait sur des pylônes de 75 mètres éloignés des précédents de quelques centaines de mètres. Les antennes sont constituées à l'origine de deux radiogoniomètres à cadres croisés, placés respectivement à 65 m et à 13,5 m de hauteur. Le gisement est mesuré par goniométrie manuelle avec une précision de l'ordre de 12°. L'altitude de la cible est obtenue par interférométrie d'amplitude entre ces deux goniomètres, et une troisième antenne de principe différent (dipôle droit placé devant un dipôle réflecteur), à 27 mètres de hauteur. Ces mesures sont traitées par l'opérateur à l'aide d'un calculateur électromécanique.

On sait que ces « radars » jouèrent à partir de juillet 1940 un rôle fondamental dans la conduite de la Bataille d'Angleterre, grâce à leur parfaite intégration dans le système de défense anglais, les informations recueillies par les différentes stations de *CH*, immédiatement transmises aux centres d'exploitation, étaient présentées en temps réel dans une salle de commandement tactique : la « *filter room* », où les officiers du Fighter Command distribuaient les forces de chasse disponibles en fonction des urgences. Cette tactique permit à la RAF de ne pas être submergée par l'assaut des vagues de bombardiers de Goering.

La *CH* sera complétée en 1939 par un nouveau type de stations dites « *CHL* » *Chain Home Low*, (200 MHz, 100 kW crête, 3 à 5 μ s de durée d'impulsion), d'une portée de 150 kilomètres, pour la détection à basse altitude. La première station fut installée à Foreness Point dans le Sussex le 1er décembre 1939. Une version mobile appelée « *GL Mark I* » (10 kW sur $\lambda = 1,5$ m) sera utilisée en France par le corps expéditionnaire anglais avant l'évacuation de Dunkerque.

La seconde innovation anglaise concerne les *radars aéroportés*, étudiés par *Edward.G. Bowen* fin 1936. Le premier radar aéroporté anglais est développé dans une version « *ASV* » (Airborne Research for Surface Vessels), construite en série à partir de l'automne 1939 (*AVS Mk1*) et 1940 (*AVS Mk2*). Ces radars métriques (200 MHz, 7 kW crête, 1,5 puis 2,5 μ s de durée d'impulsion) utilisent des aériens de type Yagi implantés à l'extérieur de la carlingue. Ils équipent les avions du Coastal Command à partir de septembre 1940, avec une portée de détection de 15 miles sur un sous-marin en surface.

C'est de cette première application qu'ont été ensuite dérivés dès 1939 les *radars d'interception* d'aéronefs, comme le *AI Mk 4* en ondes métriques (200 MHz, 7 kW crête, 1,5

puis 2,5 μ s de durée d'impulsion), qui équipèrent les chasseurs de nuit de la RAF à partir de 1940. L'utilisation des ondes centimétriques dont il sera parlé plus loin, permettra ultérieurement une évolution significative des ces matériels.

En Allemagne

Après les travaux de *Christian Hülsmeier* en 1904, puis *Hans Dominik* et *Richard Scherl* en 1916, il faut attendre 1933 pour voir reprendre des expérimentations, à l'initiative du *Dr Kühnhold*, ils amènent à la création de la *GEMA* en janvier 1934.

En 1934, des essais de faisabilité sur un premier système *GEMA*, obtiennent, sur des bateaux, une portée de 12 km, avec un radar à onde continue (puissance 40 W, $\lambda = 50$ cm). Un *second système GEMA*, travaillant en impulsions à une longueur d'onde de 1,8 mètre (165 MHz, 8 kW crête) atteint en 1936 une portée de 40 km sur bateaux, avant d'être réorienté vers la détection des avions.

En parallèle le *Dr Wilhelm Runge* de *Telefunken*, effectue à l'été 1936 des essais sur bateaux avec un *prototype* baptisé « *Darmstadt* », doté d'un système original de dipôle tournant au foyer de la parabole (le « *Quirl* » précurseur du « *scanning* » anglo-saxon) pour améliorer la précision angulaire.

Fin 1936, les opérationnels posent les spécifications de deux systèmes : un radar de veille aérienne (portée 50 km) et un radar de DCA (portée >25 km, précision : distance <10 m, site/gisement < 1/16 de degré). Les projets rentrent rapidement en phase de développement.

Pour la veille en longueur d'onde métriques ($\lambda = 2,4$ m, 560 MHz, 8 kW crête, 2 μ S), les « *Freyas* », d'une classe comparable aux SCR 270 américains, sont déployés en octobre 1939 sur les côtes de la mer du Nord, dans les îles de la Frise. De nombreuses versions constamment améliorées suivront tout au long de la guerre.

Les premières réalisations de *radars de DCA* sont confiées à *Lorenz*, avec le « *Kurfürst* » en 1936, puis en 1939 à *Telefunken* avec le « *Würzburg A* » (puissance crête 8 kW, $\lambda = 54$ cm, antenne parabolique circulaire de 3 m de diamètre, portée sur avion de 30 km), qui sera pendant la guerre le standard des radars de DCA de l'Armée allemande.

Inventant le concept opérationnel du partage veille/poursuite, le *général Kammlhuber* associe un *Freya*, deux *Würzburg* et une table d'exploitation « *Seeburg* » en chaque point de la *double ligne de défense* qu'il édifie en février 1942 à l'ouest du Reich et de ses nouvelles possessions.

Par ailleurs, les chasseurs allemands seront équipés de *radars de tir*. Le premier avion d'arme opérationnel à être équipé d'un radar de tir aéroporté fut probablement, dès 1941, le *Messerschmitt ME 110 G*. Son radar, le *FuG 212 « Lichtenstein »*, émettait en bande métrique, pour une portée de l'ordre de 5 Km. Il fut produit en plus de 400 exemplaires.

Pour contrer les brouillages anglais, *Telefunken*, bientôt suivie de *Siemens* avec ses radars "*Neptun*" cherchèrent à utiliser d'autres longueurs d'onde : de 3,7 à 4,1 mètres pour les "*Lichtenstein SN2*" qui équipèrent les *chasseurs de nuit HEINKEL* ou bien 1,8 mètre pour les "*Neptun V2*" qui équipèrent les *Messerschmitt 262*.

Pendant la guerre, les Allemands furent les premiers à tenter de leurrer des radars, lors de l'opération « *Owezarek / Netzer* » contre la Chain Home dans la nuit du 11 au 12 février 1942. Le *brouillage par bandelettes*, d'abord imaginé par les Allemands sous le nom de code de « *Düppel* », sera utilisé de façon intensive par les Anglais à partir de 1943 contre les *Würzburg*. Ce procédé fut dénommé « *Windows* » car les bandelettes étaient jetées par la « fenêtre » des avions, puis ultérieurement « *chaffs* ». Plusieurs parades de *contre - contre mesures* sont alors imaginées par les Allemands : le « *Würzlaus* » fondé sur la séparation

doppler, le « *Nürnberg* » qui utilise l'effet de « Modulation d'hélice »...Ce sont les débuts de la *guerre électronique*.

Cependant, faute de posséder le magnétron, les Allemands ne prirent que tardivement le virage des ondes centimétriques, au jour de la découverte, en février 1943, d'un « *H2S* » ($\lambda = 9$ cm) dans un bombardier anglais abattu à Rotterdam. Les Allemands surent alors reconstituer en moins de six mois un radar à magnétron qui fit son premier vol le 22 juin 1943 et produire différents matériels, en particulier : le « *Berlin A* », réplique allemande du « *H2S* ». Mais il est bien tard... tout est dispersé en 1945, hommes et moyens.

La Russie et les autres pays

En Russie, les travaux menés par le *LEFI* (Leningrad Electro Physique Institut) avaient conduit, en 1934/1936, à plusieurs réalisations en ondes métriques et centimétriques de *radars bistatiques en émission continue*, disposait en 1938 de divers types de *radars à impulsions* dont : le *REDUT*, fonctionnant à une longueur d'ondes de 4 mètres (75 MHz, 10 kW crête), d'une portée de 50 à 100 kilomètres et le *STRELETS*, fonctionnant à une longueur d'ondes de 80 cm (380 MHz, 16 kW crêtes) d'une portée de 20 kilomètres.

Les travaux étaient bien moins avancés en Italie, malgré le développement des radars métriques *EC3* (1.5 mètre, 200 MHz) et *EC3bis* (70 centimètres, 400 MHz) de portée 30 kilomètres ; en Hollande, où un *radar de veille* en longueur de 70 centimètres et de portées 30 kilomètres existait en 1939 ; au Japon, où malgré les travaux sur le *radar doppler* de *H Hagi* en 1936 et sur le *magnétron en ondes centimétriques*, les réalisations ne démarrèrent concrètement qu'à partir de 1942.

En France

En 1934, *Pierre David*, au *Laboratoire National de Radioélectricité*, expérimenta au Bourget un « *dispositif bistatique en onde continue* », comprenant un émetteur à $\lambda = 4$ m (75 MHz, 50 W continus) et un récepteur, distants l'un de l'autre de 5 km, en limite de portée de la liaison directe. Des détections d'avions sont obtenues jusqu'à des distances de 10 km, et un plafond de 7000 mètres.

A la même époque une seconde initiative vint de la *CSF-SFR*. Sous la direction de *Maurice Ponte*, *Henri Gutton* a rapidement centré sa recherche sur les ondes décimétriques et plus particulièrement sur le « *magnétron* », inventé quelques années plus tôt aux Etats-Unis et perfectionné au Japon. Ces travaux conduisirent à la réalisation d'un « *détecteur d'obstacles* » en ondes continues, par *M. Ponte* et *H. Gutton*, sur des longueurs d'ondes de 80 centimètres puis 16 centimètres (375 MHz et 1900 MHz), qui fut expérimenté en 1934 sur le navire *Oregon* puis en 1935 sur le *Paquebot Normandie* pour la détection des icebergs.

Les essais d'un nouveau « *système à impulsions* » sont ensuite conduits au Havre en juillet 1938 à partir d'une station à terre en vue directe de l'estuaire de la Seine. Ce matériel, qui détecte des navires jusqu'à 10 km, est véritablement le *premier radar centimétrique à impulsions au monde*, il aurait été installé également sur le Normandie.

Pour leur part, les expérimentations de *Pierre David* se concrétiseront en 1939 par la construction d'équipements fonctionnant à 30 MHz de fabrication *SADIR* (Société Anonyme des Industries Radioélectriques) et *LMT* (Le Matériel Téléphonique), pour la réalisation de *barrières radioélectriques*, à base de *radars bistatiques*. Les « *Barrages David* » deviennent les premiers systèmes français opérationnels de Détection Electromagnétique.

A l'approche de la guerre, la France et les alliés étant désormais confrontés à des préoccupations identiques, on assiste à un rapprochement des démarches techniques, qui convergent partout vers la solution des *radars métriques à impulsions*. Pour la France,

engagée dans des filières différentes, il s'agit d'une réorientation qui doit se faire dans l'urgence.

La Marine s'y engage, sous l'impulsion de *l'Ingénieur du Génie Maritime Giboin*, en faisant appel par souci d'efficacité à toutes les principales sociétés françaises de radio : la *SFR/CSF*, mais aussi la *SADIR*, la *Radio-Industrie* et les *Laboratoires LMT*. Il en résulte de juin 1939 à mai 1940 pas moins de 6 équipements nouveaux, sur des longueurs d'onde comprises entre 2 et 6,6 m, développés et essayés avec succès par ces sociétés. D'autres réalisations sont également conduites par l'Armée de l'Air. L'avancée allemande vient interrompre brutalement cette phase d'équipement et d'expérimentations, et l'essentiel du matériel est dispersé ou détruit.

Pendant ce temps la Marine, en vertu des accords d'armistice qui autorisent le maintien en activité de la Flotte basée à Toulon et outre-mer, se préoccupe de doter ses principaux bâtiments de moyens de Détection Electromagnétique.

Le premier bénéficiaire est en février 1941 le tout nouveau «*Cuirassé Richelieu*», stationné à Dakar, il reçoit l'un des *matériels SADIR* (250 MHz, 15 kW crête), ramenés de Bizerte. Suivent le «*Strasbourg*» en janvier 1942, puis «*l'Algérie*» en avril.

En septembre 1942, c'est au tour du «*Jean-Bart*», arrivé inachevé à Casablanca en juin 1940, puis du «*Colbert*» à Toulon. Ce fut la dernière installation. A la suite du débarquement des Alliés en Afrique du Nord le 8 novembre 1942, Hitler envahit la zone sud, et la Flotte de Toulon se saborde dans la nuit du 27 au 28 novembre. A nouveau, l'essentiel de l'équipement français en radars opérationnels disparaît dans ce désastre.

L'histoire du magnétron

Au centre de cette histoire du radar, l'histoire du magnétron revêt une importance particulière. Son début se situe à partir de 1924 aux USA et au Japon, mais les *deux progrès décisifs* eurent lieu en 1939/1940 en Angleterre et en France :

En Angleterre, en février 1940, *J.T. Randall* et *H.A. Boot*, expérimentèrent une *structure à 6 cavités couplées*. Un premier prototype à 6 cavités fournit, en février 1940, 400 watts continus sur un longueur d'onde de 9,9 centimètres, puissance considérable par rapport aux expériences antérieures. Les recherches sont alors poursuivies par *E. Megaw* à la *GEC* (General Electric Compagny) à Wembley.

En France, début 1940, *H. Gutton* et *S. Berline* étudièrent une *cathode à oxyde*, permettant d'obtenir des courants très élevés, dans la structure du magnétron *SFR M-16*, aboutirent à des puissances de crête de 500 W puis 4 kW.

A défaut de pouvoir exploiter ce progrès décisif, le 8 mai 1940, à quelques jours de la rupture du front par l'armée allemande, *M. Ponte* et le *Commandant Labat* se rendent en Angleterre pour remettre deux exemplaires de ce magnétron au *Docteur Megaw*. Quelques semaines plus tard, le 26 juin 1940, en associant les principes de la cathode à oxydes et de l'anode à cavités multiples, Megaw réalisait le premier prototype du *magnétron E - 1189* qui délivrait, 10 kW crête, puis trois mois plus tard, une centaine de kilowatts.

Après la débâcle française, les Anglais restés seuls européens en guerre considèrent comme une nécessité urgente de nouer une coopération resserrée avec les Etats-Unis. En septembre 1940, et une *mission* d'échange d'informations conduite par *Sir Henri Tizard*, se rend à Washington au *National Defense Research Committee*. Il en résultera une collaboration fructueuse, les USA apportant des innovations dans la technologie des antennes et récepteurs et leur grande puissance de production. Les radars entraient dans le domaine des «*hyperfréquences*».

Au TRE anglais, l'application la plus spectaculaire concerne les radars aéroportés, avec un *radar panoramique pour bombardier*, le « *H2S* », qui enthousiasme les pilotes dès les premiers essais en vol, fin 1941. Ils peuvent voir se dessiner sur l'écran une véritable carte des échos de sol, et y identifier les objectifs visés. Son utilisation opérationnelle par les formations du *Bomber Command* débute en janvier 1943.

A la même époque les avions du *Coastal Command* sont aussi équipés de radars centimétriques de détection des sous-marins, « *l'ASV Mark 3* » puis « *l'ASV Mark 6* ». Grâce à l'emploi de ces matériels, on compta à partir de 1943 presque un sous marin allemand détruit par jour.

Enfin, pour les avions de chasse, sont successivement développés trois modèles de radars centimétriques : les *AI* « *Mark 7* », « *Mark 8* » et « *Mark 9* », auxquels cependant sera bientôt préféré le modèle américain SCR-720, adopté par la RAF sous la désignation de « *AI Mark 10* ».

Aux Etats-Unis, le « *SCR 584* » est le premier *radar hyperfréquences de conduite de tir*. Il fonctionne en bande S (2,7 à 2,9 GHz, soit : $\lambda \sim 10$ cm), avec un réflecteur parabolique de 2 mètres de diamètre, produisant un faisceau de 4° suffisamment précis pour pointer une batterie anti-aérienne sans l'aide de systèmes de visée IR. Au total 2000 exemplaires de ce radar furent réalisés par *General Electric* et *Westinghouse*.

Dans le domaine des *radars d'interception* aéroportés, le « *SCR 720* », également en bande S (3,3 GHz, 150 kW, 0,75 μ s, 1575 Hz), répond aux besoins du combat aérien de nuit. Il fut opérationnel début 1943 et produit à plusieurs centaines d'exemplaires par *Western Electric*.

Ainsi, grâce aux efforts conjugués des Américains et des Britanniques, la technique radar évolua de manière très profonde entre 1940 et 1945. Sur la base des principes découverts avant 1940, les radars à impulsions bénéficièrent d'un effort technologique prodigieux de sorte qu'à la fin du conflit les alliés disposaient d'une panoplie complète de radars de toutes natures, fonctionnant sur des longueurs d'ondes comprises entre 10 mètres et quelques centimètres et couvrant tous les domaines d'application de radar : veille terrestre et maritime, radars aéroportés et radars de conduite de tir.

L'état de l'art en 1945

En 1945, les principes et la technologie des « *radars classiques* » étaient arrivés à maturité, une véritable *encyclopédie du radar en 20 volumes* éditée par le MIT (Massachusetts Institut of Technology), décrivant dans le détail tant les principes que les technologies et les schémas de réalisation, devint le document de base en la matière et devait servir de référence pendant de nombreuses années.

Il faudra attendre l'ouvrage du Britannique *P.M. Woodward, en 1950*, pour déclencher tant aux USA qu'en France, des réflexions qui ont amené, à la fin des années 50, à la conception des « *radars modernes* » : radars à corrélation et radars à compression d'impulsions. A la même époque sont apparues les applications des techniques de « *filtrage doppler* », les nouveaux principes de mesure angulaires dits « *monopulse* » et le « *balayage électronique* », qui préfigurent les radars d'aujourd'hui.

(Voir la suite dans « Histoire du radar dans le monde puis en France »)

DESCRIPTION GENERALE

TABLE RECAPITULATIVE

Histoire de radar -Table récapitulative (1)				
Années	Les précurseurs			
Avant 1930 Les précurseurs	1886 Heinrich Hertz fait la remarque essentielle "qu'il n'y avait pas de différence entre les ondes lumineuses et les ondes électromagnétiques"			
	1900 Nikola Tesla exprime la possibilité de détecter la présence et de mesurer le mouvement d'objets lointains à l'aide d'ondes électromagnétiques			
	1904 En Allemagne, Christian Hülsmeier brevete son TELEMBOLOSOP			
	1912. Hugo Gernsback le "Jules Verne du radar" évoque cette possibilité dans son roman RALF 124 C41 +			
	1916 En Allemagne, nouvelle expérimentation par Hans Dominik et Richard Scherl			
	1922 Diverses expérimentations aux USA, notamment celles de A.H. Taylor et L.C. Young aux USA			
	1923 M. Brard, radio amateur chevronné, se livre en France à des expériences de réflexion d'ondes radio			
	1927 Expérimentations en France de C. Gutton et E. Pierret (en ondes centimétriques) et en 1928 de pierre David et R. Mesny (en ondes métriques)			
		Allemagne	Angleterre	France
1930 à 1940 les radars décimétriques, métriques ou (Angleterre) décamétriques (1)	octobre 1934 expérimentation d'un radar à onde continue GEMA(puissance 40 W, $\lambda = 50$ cm). Sur bateau	26/01/1931 proposition pour un appareillage côtier de détection par WAS Butement and PE Pollard du "Signals Experimental Establishment (SEE)" Janvier 1935, création du « Comité pour l'Etude Scientifique de la Défense Aérienne »	1934, expérimentation d'un « dispositif bistatique en onde continue », ($\lambda = 4$ m 75 MHz, 50 W continus) par Pierre David	1930, lors d'essais à 30 MHz, LC Young et L.A. Hyland observent des perturbations avec le passage d'un avion
	1936 second système GEMA, en impulsions à une longueur d'onde de 1,8 mètres (165 MHz, 8 kW crête)	26 février 1935, première expérience de faisabilité, avec l'émetteur de radio transmissions de Daventry ($\lambda = 50$ m)	1934/1935 Essais du «détecteur d'obstacles » SFR/CSF en onde continues, ($\lambda = 16$ cm F=1900 MHz), du Paquebot Normandie	1933 brevet d'un « radar bistatique en onde continue » (émetteur de 500 W continus sur 29 MHz)
	1936 le « Darmstadt », est doté d'un système de dipôle tournant au foyer de la parabole (le « Quirl » précurseur du «scanning » anglo-saxon)	1937 début de fonctionnement de la « Chain Home » ou CH achevée le 1er avril 1939, 18 stations RDF sur deux fréquences ($\lambda = 12$ m et $\lambda = 6$ m), avec une puissance de 350 kW, puis 750 kW crête, une durée d'impulsion variable entre 4 et 45 μ s,	1936/1938 « système à impulsions » SFR/CSF de Henri Gutton, impulsions de 6 μ s à $\lambda = 16$ cm (1900 MHz), puissance de 10 W crête par un magnétron M16 " Premier radar centimétrique à impulsions au monde ".	1934, Hershberger expérimente un dispositif bistatique continu sur 9 cm de longueur d'onde, proche du système CSF du Normandie Essais en 1934 d'un radar monostatique à impulsions (60 MHz, 100 W crête, 10 μ s)

DESCRIPTION GENERALE

Histoire de radar -Table récapitulative (2)				
Années	Allemagne	Angleterre	France	USA
1930 à 1940 les radars décimétriques, métriques ou (Angleterre) décimétriques (2)	1939 radars de veille « Freyas » $\lambda = 2,4$ m, (125 MHz, 20 kW crête, 2 à 3 μ S) 1940 radars de DCA « Würzburg A » en ondes décimétriques ($\lambda = 54$ cm, 560 MHz, puissance crête 8 kW)	1938 nouveau type de stations dites « CHL » Chain Home Low, (200 MHz, 100 kW crête, 3 à 5 μ s de durée d'impulsion) Décision du CVD de porter tous ses efforts sur le tube triode pour des longueurs d'onde de 50cm et 25 cm pour des radars de conduite de tir	1939 « Barrages David » barrières radioélectriques, à base de radars bistatiques (300 W à $\lambda = 5$ m) Premiers systèmes français de Détection Electromagnétique	1938 radar « XAF » (200 MHz, impulsions de 7 μ s et 7,5 kW crête) 1939 veille « CXAM » 400 MHz (= 75 cm), conduite de tir « FA Mark 1 » à 750 MHz ($\lambda = 40$ cm). , pour la Navy.
	1941 radars de tir aéroporté « FuG 212 Lichtenstein », puis "Lichtenstein SN2" et "Neptun V2" en bande métrique 1941 Radar géant MAMMUT, antenne réseau à balayage électronique	1939 "AVS Mk1", 1940 (AVS Mk2). radars métriques de surveillance maritime aéroportés (200 MHz, 7 kW crête, 1,5 puis 2,5 μ s de durée d'impulsion)	1940 réalisations de radars de surveillance à impulsions en bande métriques par SADIR, LMT , Radio industrie et SFR/CSF	1940 "SCR 268" (205 MHz, 75 kW crête, 3 à 9 μ s) technique du « lobe-switching », Puis SCR 270 et SCR 271 (100 MHz, 100 kW crête, 10 μ s)
	1942. Invention du brouillage par bandelettes, le « Düppel », qui sera utilisé par les Anglais et appelé «Windows » ou «chaffs »	1939, radars d'interception d'aéronefs, AI Mk 4 en ondes métriques (200 MHz, 7kW crête, 1,5 puis 2,5 μ s de durée d'impulsion)	1941/1942 équipement des navires de la flotte en radars de surveillance à impulsions , en bande métrique : Richelieu, Algérie , Jean Bart, Colbert	1941 mode de présentation des échos «PPI » (Plan Position Indicator), inventé à Paris en 1939 dans les laboratoires français de LM
Années	Le magnétron et les radars centimétriques			
1940 à 1945 Le magnétron et les radars centimétriques	Angleterre, en février 1940, J.T. Randall et H.A. Boot, expérimentent une structure à 6 cavités couplées, 400 watts continus sur une longueur d'onde de 9,9 cm			
	France, en 1940, H. Gutton et S. Berline étudient une cathode à oxyde, puissances de crête de 500 W puis 4 kW, le magnétron SFR M 16			
	8 mai 1940, M. Ponte et le Commandant Labat se rendent en Angleterre pour remettre deux exemplaires du magnétron SFR M16 au Docteur Megaw.			
	26 juin 1940, en associant les principes de la cathode à oxydes et de l'anode à cavités multiples, le magnétron E - 1189 délivrait, 10 kW crête sur 10 cm			
	Juillet 1940 : Les échanges Angleterre - USA. La mission Tizard			
	Angleterre, sept 1941 "modèle 271" de la Royal Navy, Été 1942 radar sol de guidage de tir «GLMark3 »			
	Angleterre, janvier 1943, radar panoramique pour bombardier, le « H2S »,			
	Angleterre, 1943/1944 : radar de détection de sous-marins, « l'ASV Mark 3 » (50 kW, 10 cm) , puis 200 kW « l'ASV Mark 6»			
	Angleterre, 1943/1944 , radars centimétriques aéroportés de conduite de tir : les « AI Mark 7 », « AI Mark 8 » et « AI Mark 9 »			
	USA, 1943, « SCR 584 » radar sol de conduite de tir en bande S (2,7 à 2,9 GHz, soit : $\lambda \sim 10$ cm),			
	USA, 1943, radar d'interception aéroporté, « SCR 720 », en bande S (3,3 GHz), puissance de 150 kW, τ : 0,75 μ s; fr 1575 Hz, adopté par la RAF « AI Mark 10 »			
	USA, 1943, radar à haute résolution « Eagle AN/APQ-7 » pour bombardement nocturne. bande X (9375 MHz soit : $\lambda \sim 3$ cm) antenne à balayage électromécanique			
USA, 1945, encyclopédie du radar en 20 volumes éditée par le MIT (Massachusetts Institut of Technology)				

2 PRINCIPE DU RADAR A IMPULSIONS

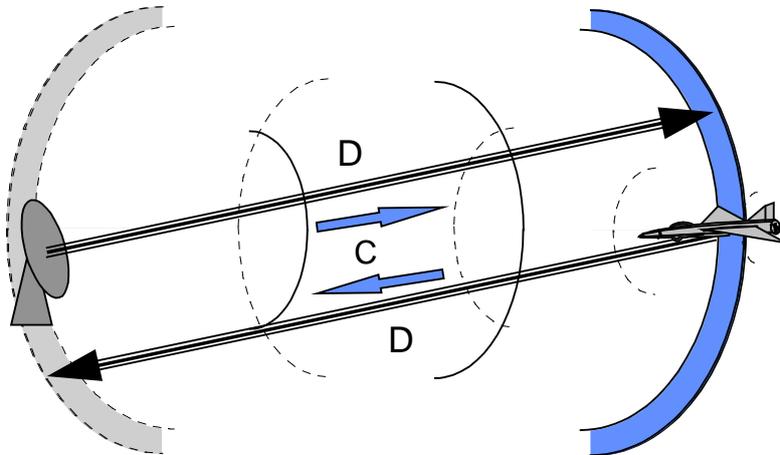
2.1 PRINCIPE DE BASE

Le radar utilise la propriété des ondes électromagnétiques de se réfléchir sur tout obstacle, créant ainsi une onde de retour susceptible d'être décelée par un récepteur adapté à ce signal. Pour ce faire, c'est un ensemble comportant un **émetteur** engendrant le signal, **une antenne** le focalisant dans l'espace, **un récepteur** recueillant l'onde de retour et un **système d'exploitation** adaptant l'information recueillie à l'opérateur.

Dans les radars classiques, le signal émis est une suite d'impulsions électromagnétiques. Chaque impulsion de durée très brève " τ ", de l'ordre de quelques microsecondes, se propage dans l'atmosphère à la vitesse de la lumière :

$$C = 3.10^8 \text{ m/s}$$

Ce signal se propage dans toutes les directions et se trouve à un instant donné T réparti entre deux sphères de rayon C.T et C.(T+ τ). En d'autres termes, il y a formation d'une onde sphérique.



Une partie de ce signal est réfléchié par la cible, on dit quelquefois que la cible est "illuminée" et « rerayonne" une partie de l'énergie émise sous la forme d'une onde de faible amplitude et de caractéristiques temporelles identiques à celle du signal émis.

Entre temps, l'antenne a été reliée à un récepteur très sensible qui amplifie le signal capté et fournit à l'exploitation une impulsion de retour analogue à l'impulsion émise.

Différents paramètres peuvent ainsi être analysés.

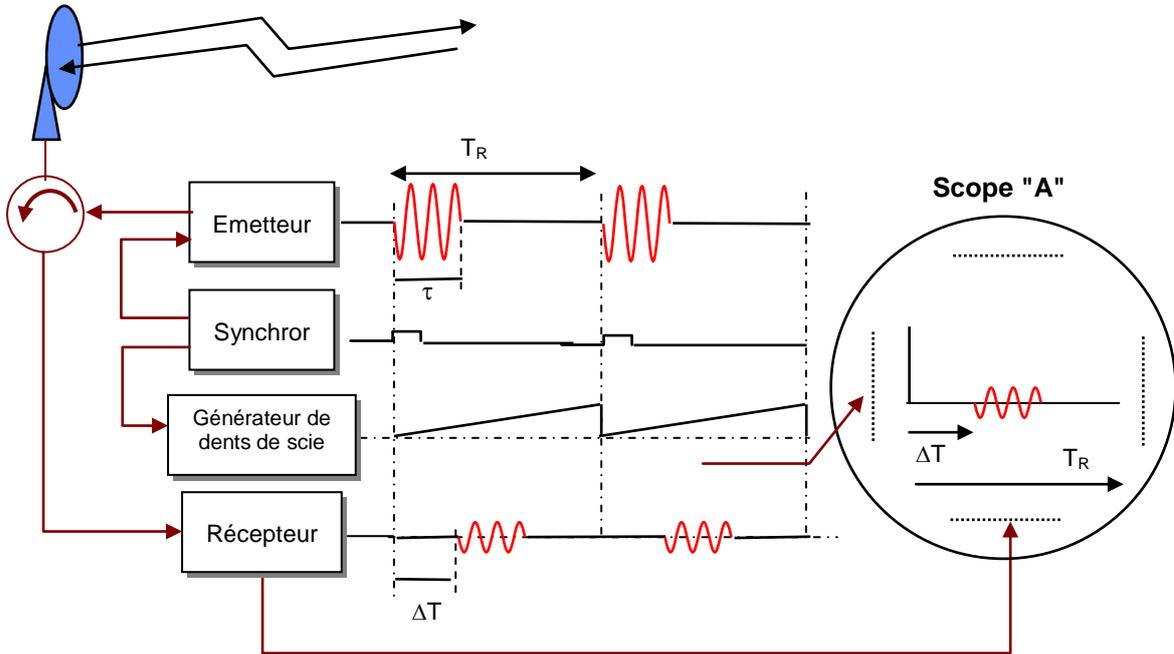
2.2 MESURE DE LA DISTANCE

Elle s'effectue par l'intermédiaire de celle du temps de trajet aller et retour de l'onde. En effet, si D est la distance du radar à la cible, et C la vitesse de propagation de l'onde, le temps de trajet aller et retour de l'onde est :

$$T = 2D/C$$

Le procédé le plus simple pour mesurer ce temps de trajet (et le premier employé) consiste à visualiser ce signal sur un oscilloscope, appelé "SCOPE A", dans lequel un faisceau d'électrons, contrôlé en position par des plaques de déviation, vient éclairer la couche rémanente d'un tube cathodique.

Sur les plaques de déviation horizontale, on applique un signal en "dent de scie" dont le début est synchronisé avec l'impulsion d'émission. Le signal perçu par le récepteur, convenablement amplifié, est appliqué sur les plaques de déviation verticale. Ainsi la position horizontale du spot sur le scope est proportionnelle au temps écoulé depuis l'émission, et une déviation verticale est le signe de la présence d'une cible.



La distance entre le radar et la cible étant une fonction linéaire du temps de trajet de l'onde, la position du signal sur l'axe horizontal du scope est bien proportionnelle à la distance entre le radar et la cible, on peut donc graduer directement cet axe avec l'unité de distance convenable.

2.3 MESURE DES ANGLES

La seule mesure de la distance est insuffisante pour localiser les objets. Elle est combinée avec une mesure angulaire utilisant la directivité des antennes radar.

En effet, une antenne ne répartit pas l'énergie uniformément dans toutes les directions, en particulier une antenne de dimension "L", le long de laquelle on répartit l'énergie à émettre suivant une loi particulière, peut, par le jeu de la recombinaison spatiale des ondes, concentrer l'énergie émise (ou du moins la majeure partie de cette énergie), dans un angle limité: « θ ».

Nous retiendrons la relation pratique :

$$\theta \sim 65.\lambda / L$$

Relation où :

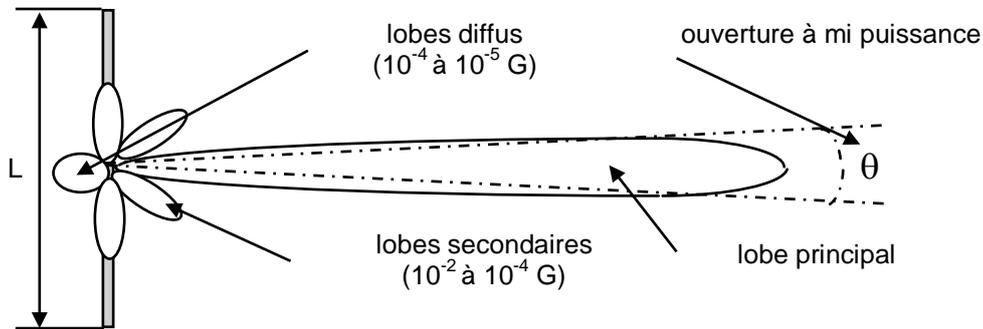
- θ est l'ouverture en degrés à mi-puissance ;
- λ la longueur d'onde émise en mètres ;
- L la dimension de l'antenne en mètres.

θ , ouverture de l'angle dans lequel se concentre l'énergie, est également appelée, ouverture du faisceau, du lobe ou du diagramme de l'antenne.

Une telle antenne n'éclaire (ou n'envoie de l'énergie) de manière significative que dans le secteur $\pm \theta / 2$. Les autres secteurs sont également éclairés mais avec des niveaux beaucoup

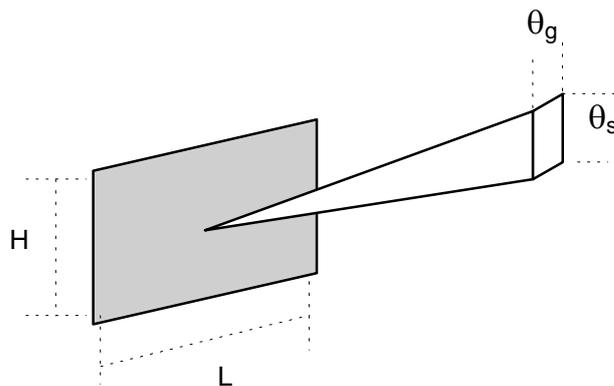
plus faibles, 10^{-2} à 10^{-4} fois plus faibles dans les lobes secondaires proches, 10^{-4} à 10^{-6} dans les lobes diffus.

Le phénomène de propagation de l'onde étant, comme nous le verrons ultérieurement, réciproque, il en résulte que les niveaux d'énergie des signaux perçus par le radar en dehors de l'angle solide d'ouverture θ seront 10 000 fois à 1 000 000 fois plus faibles, toutes choses égales par ailleurs, que ceux perçus dans cet angle solide.



Ainsi donc, en associant une antenne directive à un émetteur - récepteur traitant des signaux impulsionnels, on peut mesurer simultanément la direction et la distance d'une cible, et ceci uniquement parce que cette cible réfléchit une partie de l'énergie dirigée vers elle.

Le même phénomène peut être reproduit dans le plan horizontal (ou plan de gisement) et dans le plan vertical (ou plan de site) en disposant d'antennes de dimensions horizontales et verticales adéquates. Le schéma ci après résume les propriétés de telles antennes :



$$\theta_s \sim 65.\lambda/H ; \theta_g \sim 65.\lambda/L$$

(en degrés)

ANTENNE DE VEILLE
 $G \sim 0.3.(4\pi S/\lambda^2) \sim 15000/\theta_s.\theta_g$

ANTENNE DE POURSUITE
 $G \sim 0.6.(4\pi S/\lambda^2) \sim 30000/\theta_s.\theta_g$

Dans cette image :

- H est la hauteur de l'antenne,
- L sa largeur,
- $S = L \cdot H$ sa surface
- θ_g l'ouverture de son diagramme dans le plan de gisement, à mi puissance,
- θ_s l'ouverture de son diagramme dans le plan de site à mi puissance,
- G le gain de l'antenne.

Le gain de l'antenne est lié au fait qu'une part importante de l'énergie émise se trouve concentrée dans l'angle solide : $\theta_g.\theta_s$. C'est le rapport entre l'énergie émise à l'intérieur de cet angle solide et celle qui serait émise par une antenne omnidirectionnelle, qui par principe répartit également cette énergie dans toutes les directions.

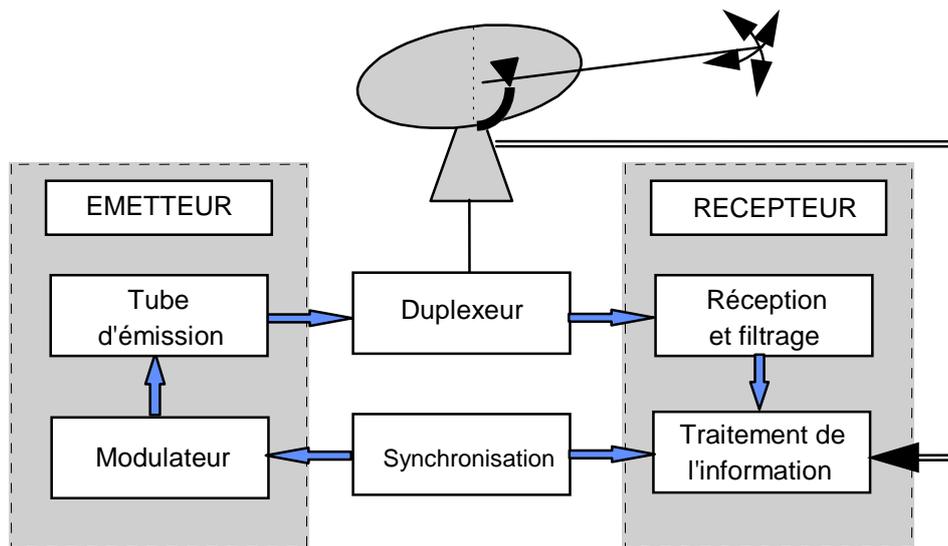
3 COMPOSITION D'UN RADAR

3.1 SCHEMA D'ENSEMBLE

Il ressort du paragraphe précédent que le radar est un instrument capable de fournir à l'utilisateur les informations suivantes :

- Existence d'un corps étranger dans l'atmosphère (avion, bateau, obstacle naturel, etc).
- Position de ce corps étranger.

Ces deux informations peuvent être complétées suivant le cas, par d'autres informations portant sur la vitesse, l'étendue, voire la nature du corps détecté par le radar. Le diagramme fonctionnel type d'un radar est donné ci après.



Examinons les principaux éléments d'un tel radar.

3.2 L'ANTENNE

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.

Cet angle solide est défini par la nature de l'antenne utilisée. La direction vers laquelle il est dirigé est également liée à l'antenne, une action (mécanique ou électronique) sur cette antenne permettra de modifier cette direction et donc de provoquer une exploration du domaine entourant le radar.

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 pas perturber le fonctionnement du récepteur.

L'ensemble des raisons qui précèdent vient augmenter le prix de l'antenne double, aussi, dans la majorité des cas, on lui a préféré la solution de l'aérien unique, utilisé à l'émission et à la réception, associé à un duplexeur.

3.3 LE DUPLEXEUR

C'est un aiguilleur 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, 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.

La complexité du duplexeur dépend du niveau de puissance du signal émis (de quelques kilowatts à 20 MW dans les radars de moyenne et grande portée). Elle est liée à la limitation des fuites vers le récepteur, (qui ne peut supporter sans détérioration des signaux supérieurs à 100 mW environ).

3.4 L'EMETTEUR

L'émetteur se compose de deux parties principales :

- l'étage de puissance dans lequel est engendré ou amplifié le signal émis ;
- le modulateur qui fournit à l'étage de puissance l'énergie électrique et les signaux de commande.

3.4.1 L'étage de puissance

Sa partie active est le tube d'émission dans lequel est engendrée l'impulsion hyperfréquence à la fréquence et à la puissance désirées.

Il peut être du type oscillateur de puissance, le tube utilisé est alors un magnétron, une triode oscillatrice ou tout autre tube oscillateur. C'est avec le magnétron que les plus hauts niveaux de puissance sont obtenus dans des émetteurs construits en série (2 MW pendant quelques microsecondes, avec un rendement de 50% en 20 cm de longueur d'onde).

La chaîne d'amplification est un autre type d'étage de puissance, dans lequel le signal est amplifié par étapes successives, d'un niveau de l'ordre du watt à la puissance finale de sortie qui varie selon le tube utilisé et la longueur d'onde.

Les tubes d'amplification radar sont : les klystrons, les tubes à ondes progressives (TOP) et les tubes à champs croisés, pour les niveaux de puissance élevés ; les amplificateurs à état solide (diodes, transistors) aux basses puissances ou pour la fourniture de "modules" de puissance.

Cet étage comprend en outre des dispositifs annexes : refroidissement alimentation, circuits de mise en route et de contrôle, etc. Son rendement global est de l'ordre de 10 à 30%.

3.4.2 Le modulateur

Le modulateur fournit la puissance nécessaire à la partie active de l'émetteur. Il permet de stocker l'énergie pendant les périodes séparant deux émissions successives et de la restituer pendant le temps très bref de l'émission radar.

Les puissances crête délivrées par le modulateur sont très importantes (10 MW par exemple pour une puissance émise de 3 MW avec un rendement de 30 %), il y correspond des courants de plusieurs dizaines d'ampères sous des tensions de plusieurs dizaines de milliers de Volts.

La qualité des signaux délivrés par le modulateur doit être contrôlée pour permettre d'éviter des effets parasites sur le signal émis.

3.5 LE RECEPTEUR

C'est l'élément le plus délicat, et souvent le plus complexe du radar. Il assure l'amplification, le filtrage et le traitement du signal radar.

Sa sensibilité doit être très grande (jusqu'à 10^{-15} Watts). Il amplifie les signaux dans de très grandes proportions (10^{10} à 10^{14}).

Il doit en outre effectuer le filtrage du signal et tous autres traitements adaptés à l'information à obtenir (par exemple vitesse, position angulaire...), sa réalisation doit être particulièrement soignée pour réduire au minimum toute distorsion involontaire du signal traité et réduire les perturbations dues au bruit qui accompagne le signal radar.

Le récepteur radar est du type superhétérodyne, il est précédé le plus souvent par un amplificateur hyperfréquence. Son circuit de sortie peut être un simple détecteur d'amplitude ou un système plus complexe. Après traitement, le signal est amplifié par un amplificateur vidéo (en abrégé ampli vidéo) qui l'amène au niveau désiré pour son exploitation (quelques volts).

3.6 LE TRAITEMENT ET L'EXPLOITATION DES INFORMATIONS

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

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

Il permet de délivrer les « plots radar » qui seront pris en compte par le système d'exploitation. Ces informations sont présentées à un opérateur sous la forme d'une image radar adaptée à la situation à analyser. L'opérateur a alors à sa charge d'interpréter les informations qui sont ainsi visualisées et d'effectuer les opérations nécessaires (identification, guidage, anticollision...).

Le travail de l'opérateur est facilité par l'emploi d'une "exploitation automatique" assurée par des moyens numériques, l'information étant délivrée à l'opérateur par l'intermédiaire de consoles de visualisation.

Ces consoles, qui s'utilisent au maximum les possibilités de la visualisation sont de véritables systèmes pouvant recevoir les informations brutes du radar et les informations "synthétiques" issues de l'exploitation. Elles permettent en outre un dialogue entre les opérateurs et le calculateur chargé de l'élaboration de l'information synthétique.

Les moyens de visualisation les plus courants sont l'oscilloscope cathodique dit « à balayage cavalier » et les écrans de télévision haute définition, qui présentent la situation générale. Ils peuvent être complétés par des visualisations auxiliaires sur écran de télévision et des projections sur grand écran.

3.7 LA 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^{-4} à 10^{-6}) à partir de laquelle sont engendrés les signaux de synchronisation.

Ces signaux sont distribués aux différents éléments à piloter. Leur distribution doit être assurée avec une très grande reproductibilité sur chaque voie, de manière à ne pas fausser les mesures effectuées.

3.8 LES INFORMATIONS DE POINTE ANGULAIRE

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.

Dans les antennes à balayage mécanique, les systèmes de recopie utilisés peuvent être 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.

3.9 LA LIAISON DUPLEXEUR ANTENNE

Cette liaison doit permettre le passage des signaux hyperfréquences pour diverses positions de l'aérien. Elle comporte des conduits hyperfréquence (coaxial et guide d'onde) et des éléments plus complexes permettant le mouvement de l'aérien (joint tournant). Au niveau de l'aérien, elle peut se terminer par des circuits hyperfréquences divers (diviseur de puissance, coupleurs, circulateurs, déphaseurs, etc.).

4 NOTIONS SUR LES RADARS SECONDAIRES

4.1 DESCRIPTION SOMMAIRE

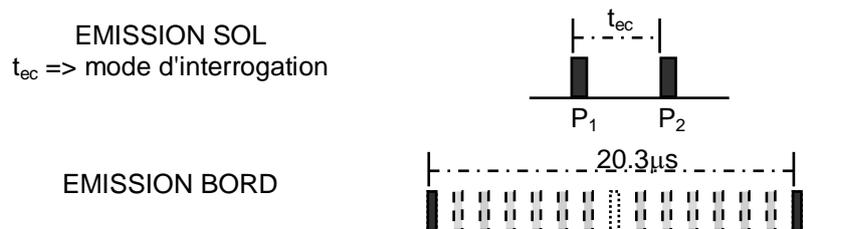
4.1.1 Principe général

Le radar SSR (Secondary Surveillance Radar) ou IFF (Identification Friend Foe) est un système destiné à faciliter l'identification d'un mobile. Le système se compose :

- au sol, d'un interrogateur associé au radar primaire (antennes liées mécaniquement, synchronisation des émissions) ;
- à bord, d'une antenne omnidirectionnelle associée à un répondeur.

Interrogé sur un mode déterminé, le répondeur IFF de bord (ou transpondeur en aviation civile) répond par une suite d'impulsions HF qui forment un code. Ce train d'impulsions est reçu dans le récepteur associé à l'interrogateur, où il sera décodé délivrant ainsi l'information d'identification.

Les signaux d'interrogation sont constitués par une paire d'impulsions : P1 et P2, de fréquence 1030 MHz et d'une puissance crête de 1 à 2 KW, dont l'espacement détermine le mode d'interrogation.



La réponse est constituée d'un train d'impulsions de fréquence 1090 MHz et de puissance crête 200 W à 500 W comprenant :

- deux impulsions d'encadrement espacées de $20,3 \mu s$ toujours présentes,
- treize impulsions espacées de $1,45 \mu s$, qui sont présentes ou non présentes suivant le code utilisé.

Les puissance émises sont très inférieure à celle des radars primaires (jusqu' à quelques MW), mais les radars secondaires ont une portée supérieure à celle des radars primaires, car le bilan de puissance sur un trajet simple est en $1/D^2$ (D distance du radar à la cible), alors que celui du radar, sur un trajet aller et retour est en $1/D^4$ (Cf. Chapitre 8).

Le trajet simple aller (antenne radar/transpondeur, lié à la puissance émise par l'interrogateur) présente un bilan de puissance plus favorable que le trajet retour (transpondeur/radar lié à la puissance émise par le transpondeur) qui détermine donc la portée du système.

4.1.2 Modes d'interrogation

Les principaux modes d'interrogation et les réponses associées sont :

Mode 1,

Militaire, code mission, 32 combinaisons affichées au départ d'une mission donnée.

Mode 2,

Militaire, code avion, code à quatre entre 0 et 7 inclus chiffres propre à l'avion non modifiable sans intervention technique (4096 combinaisons).

Mode 3 A,

Militaire et civil, code d'identification à quatre chiffres entre 0 et 7 inclus, affiché par le commandant de bord à la demande du contrôleur au sol (4096 combinaisons). Chaque avion se voit attribuer un code unique, qui permet d'établir une relation entre un plot et un aéronef et d'affecter avec certitude ce plot à cet aéronef.

En plus des codes donnés par le contrôleur de la navigation aérienne à la suite d'une vacation radio entre le commandant de bord et le centre de contrôle, certains codes sont réservés à des situations particulières.

- 7000 : Vol VFR avec mode C (sans instruction donnée par le contrôle aérien).
- 7500 : Intervention illicite (détournement).
- 7600 : Panne radio.
- 7700 : Détresse.

Mode C,

Militaire et civil, code altitude (fournie par un altimètre) en niveau de vol (centaine de pieds référés en atmosphère standard au niveau 1013 hectopascals).

Modes 4 et 5

Ce sont des modes cryptés exclusivement militaires, avec des clés de codage changées toutes les 24 h et une interprétation de la réponse sur plusieurs récurrences

- Ami sûr : a atteint un niveau suffisant de bonnes réponses
- Ami probable : a répondu mais sans atteindre le niveau suffisant de bonnes réponses
- Avion supposé ennemi : pas de réponse

Mode S

Le Mode S repose sur la procédure d'appel sélectif qui consiste à interroger un seul avion - parfaitement identifié à la fois :

- un avion ne répond qu'aux interrogations qui lui sont adressées ;
- une station mode S rejette les réponses qu'elle n'attend pas.

Plusieurs déclinaisons du mode S sont prévues :

- Mode ELS (ELementary Surveillance) : Basé sur l'attribution par l'État d'un code unique (24 bits) d'immatriculation à chaque aéronef qui permet l'identification de l'avion par les radars sol et de son altitude avec une approximation de 25 pieds (8 m).
- Mode EHS (EnHanced Surveillance) : En complément des informations transmises par l'ELS, l'EHS utilise des données complémentaires fournies par l'aéronef pour faciliter l'information des contrôleurs aériens et la gestion du trafic (destiné aux vols commerciaux).
- Mode S+TIC : Standard futur qui permettra de transmettre à l'avion des informations sur le trafic ou la météo.

Chaque aéronef dispose d'un code d'identification en mode S, composé de 24 bits (parmi 56 bits en mode ELS ou 112 bits en modes EHS et TIC),

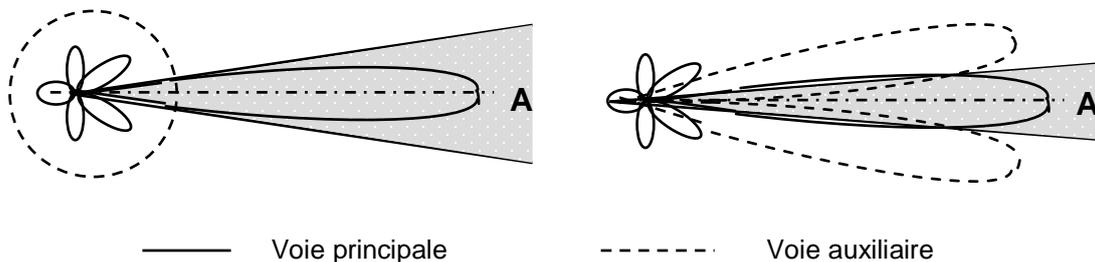
- code Pays (14 bits) ;
- code Compagnie (4 bits) ;
- code Aéronef (6 bits).

Le mode S se comporte en outre comme une véritable liaison de données¹ ; des informations complémentaires peuvent être transmises au sol (immatriculation, type avion). Egalement, via le TCAS (Traffic alert and Collision Avoidance System), ces informations peuvent être fournies aux avions qui se trouvent dans la même zone de vol et des manœuvres d'évitement proposées s'il existe un risque de collision.

4.2 TRAITEMENT DU SIGNAL IFF

4.2.1 Suppression des lobes secondaires

L'antenne liée à l'IFF est directive, de ce fait comme le radar primaire, le radar secondaire possède un bon pouvoir séparateur angulaire. Il est cependant nécessaire d'affiner ce pouvoir séparateur, car nombre des échos entrant par les lobes secondaires (compte tenu du bilan de liaison répondeur-radar secondaire) sont perçus par le récepteur de l'interogateur.



On utilise pour ce faire une antenne auxiliaire ou une antenne à double directivité, pour créer une voie principale et une voie auxiliaire. A l'émission, les impulsions d'interrogation P_1 et P_2 sont émises sur la voie principale, une impulsion supplémentaire P_3 sur la voie auxiliaire. La comparaison, à bord, du niveau relatif de ces trois impulsions permet de savoir dans quelle zone d'espace relative à l'antenne se trouve l'avion récepteur du signal. Son répondeur ne répond qu'en zone « A ». Les réponses parasites, qui pourraient être effectuées lors du passage d'un lobe secondaire de l'antenne sur la cible, sont alors supprimées. Le système a pour nom ISLS (suppression des lobes secondaires à l'interrogation).

¹ Ce système est largement utilisé par l'aviation civile. Il est en cours de complément par les réseaux VHF dénommés ADS (Automatic Dependent Surveillance) dans lesquels c'est l'aéronef qui délivre des informations d'identification et de position GPS, soit à l'ensemble de la communauté : version B (Broadcast) , soit à des stations de contrôle aérien ciblées dans un cadre contractuel version C (Contract.)

Il peut être complété à la réception pour faire de l'affinage de lobe, dans ce cas, l'antenne principale et l'antenne auxiliaire sont chacune reliées à un récepteur et les signaux issus des deux récepteurs comparés entre eux. La sortie du signal n'est alors autorisée vers le traitement ultérieur que si le signal principal est supérieur au signal auxiliaire.

Le procédé utilisé a pour nom RSLs (SLS à la réception),

Dans les dispositifs modernes : MSSR (Monopulse Secondary Surveillance Radar) l'information est affinée par des techniques « monopulse » donnant directement la position de la cible dans le faisceau de l'antenne (Cf. Chapitre 12).

4.2.2 Traitement du signal

Le signal perçu à un instant donné par un interrogateur de radar secondaire est l'ensemble des réponses IFF des mobiles de la zone « A » interrogés par lui-même ou par d'autres radars proches, et d'un certain nombre de réponses parasites ayant traversé le SLS.

Il en résulte un certain nombre de signaux de brouillage, d'amplitude comparable à celle des signaux utiles, qui viennent perturber la mesure. Ce parasite ou « fruit » (False Replies from Unsynchronized Interrogator Transmissions), n'est pas (ou peu) récurrent vu de l'interrogateur, seules les réponses utiles ont le synchronisme nécessaire pour que les échos successifs d'un mobile donné se produisent toujours au même instant par rapport à l'émission du radar.

Le traitement consiste donc :

- A éliminer les réponses non récurrentes ou « fruits » (dans un corrélateur qui n'accepte un signal IFF que s'il est apparu un certain nombre de fois dans la même fenêtre de temps au cours de récurrences successives ; cette opération est dite de « défruitage ».
- A reconnaître et si possible séparer les plots récurrents entrelacés, cette opération est dite de « dégarblage ».
- A opérer ensuite un « décodage » des signaux ainsi séparés, pour obtenir l'information d'identification qu'ils contiennent, soit de manière passive (reconnaissance d'un code déterminé), soit de manière active (décodage complet du signal dans une fenêtre d'espace déterminée). Dans le second cas, tous les codes peuvent être ainsi déchiffrés, pour former un « plot IFF » ou message contenant : la distance, l'azimut et les codes, qui sera adressé à un système d'exploitation.

L'association de cette information à celle issue du radar principal permet d'apporter une aide précieuse à toutes les opérations d'identification et de contrôle des objets détectés.

5 ORGANISATIONS TYPES DE RADARS

Les radars se différencient entre eux par la manière dont ils explorent l'espace à l'aide de leur antenne. Nous allons examiner quelques modes d'exploration et définir l'exploitation de l'information associée.

5.1 LE RADAR PANORAMIQUE

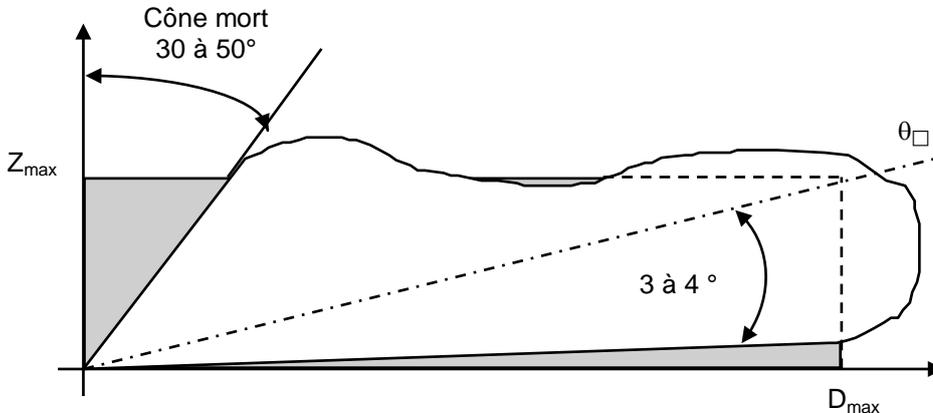
5.1.1 Organisation générale

Le radar panoramique est non seulement le plus répandu mais le plus représentatif des systèmes radars, aussi il sera pris comme exemple type pour définir les grands principes de l'exploitation des signaux radar. Il assure une exploration totale de l'espace par une rotation continue de son antenne autour d'un axe vertical.

On a alors intérêt à utiliser un faisceau étroit dans le plan de gisement de manière à obtenir un pouvoir séparateur angulaire convenable. Ceci est possible si les aériens sont de grandes dimensions horizontales, par exemple :

$$\lambda = 23 \text{ cm} ; L = 13 \text{ m} ; \theta_g = 65\lambda / L = 1.15 \text{ degrés}$$

D'autre part, afin que le maximum d'espace puisse être surveillé par le radar, il est nécessaire de moduler son diagramme en site pour obtenir le faisceau le mieux adapté possible à la triple contrainte : portée, altitude et cône mort.



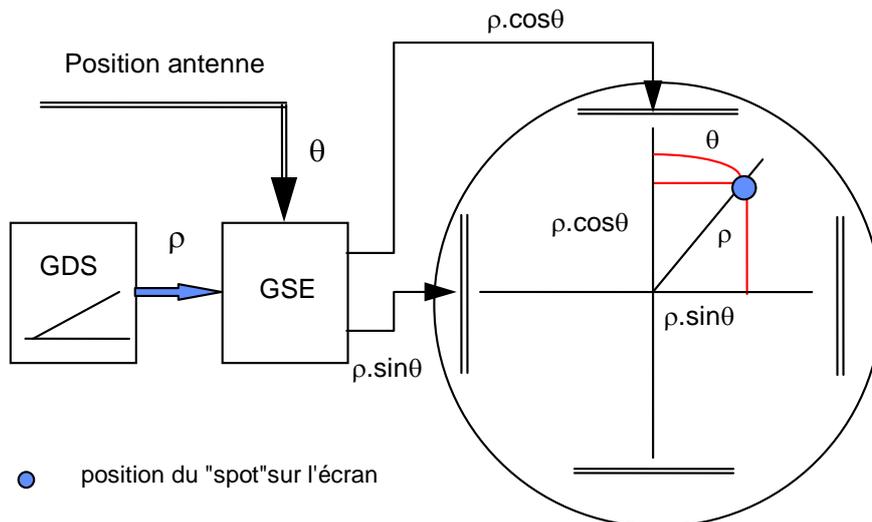
Cette modulation de la couverture en site est obtenue en élargissant le lobe en site par une action sur la répartition du champ rayonné dans le plan vertical de l'antenne, en amplitude et en phase. Les diagrammes ainsi obtenus sont dits « cosécantés ».

L'exploration de l'espace est effectuée de manière régulière ; les vitesses de rotation d'antenne sont de l'ordre de 6 tours par minute pour les radars à grande portée, 12 à 20 tours par minute pour les radars de moyenne portée, jusqu'à 60 tours par minute pour les radars de courte portée.

L'exploitation de l'information doit être adaptée à ce mode d'exploration de l'espace. Le procédé le plus direct, qui fut également le premier utilisé, est la visualisation du signal radar sur un scope PPI (Plane Position Indicator) dont le principe est décrit ci après.

5.1.2 Principe du scope PPI

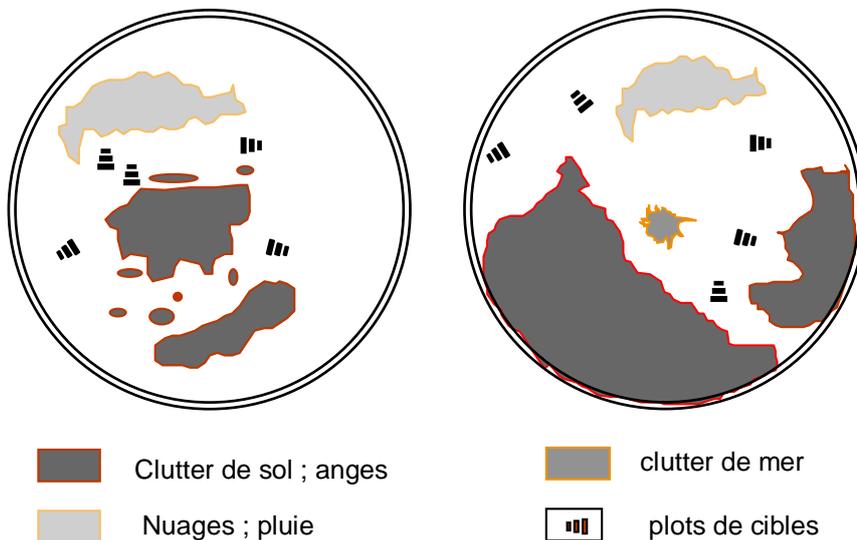
Le scope PPI utilise un tube cathodique classique, dans lequel le faisceau d'élection est dévié de telle manière que son point d'impact sur la couche sensible du tube soit représentative de la zone d'espace observée, à un facteur d'échelle près.



Il faudra pour cela engendrer une dent de scie « $\rho(t)$ » synchronisée avec l'émission radar, et de la répartir sur les plaques de déviation du scope en tenant compte de la position « θ » de l'aérien par rapport au nord selon la loi : « $\rho.\cos(\theta)$ » en déviation verticale et « $\rho.\sin(\theta)$ » en déviation horizontale. Ainsi, à chaque instant la position du faisceau d'électrons par rapport au centre du scope se trouve sur un radiale de direction : « θ » et à une distance du centre proportionnelle au temps écoulé depuis la dernière impulsion émise : « $\rho(t)$ ».

Il suffit alors de moduler la puissance du faisceau d'électrons proportionnellement à l'intensité du signal reçu ; ce qui se fait en modulant la tension de "WEHNELT" avec le signal perçu par le radar après détection et amplification vidéo. Une cible apparaît alors sur le scope comme un point brillant, dont la position représente, à une échelle réduite, la position dans l'espace de la cible par rapport à l'axe de rotation de l'antenne.

L'image ainsi obtenue est une projection plane des échos détectés par le radar. L'aspect du scope dépend du pouvoir d'intégration de la couche sensible du tube cathodique et de sa rémanence. En particulier toute cible ponctuelle apparaîtra sur le scope comme une tâche d'une certaine surface constituant le « *plot* » radar, intégration des différents « *échos* » perçus par le récepteur. En plus des objets ponctuels, sont visualisés des plots de surface étendue dus : aux échos du sol, de nuage, de pluie et de mer, et à certaines réflexions parasites ou « anges ». La situation globale présentée à l'opérateur dépendra donc de l'environnement du radar et des conditions météorologiques. Pour améliorer les conditions de travail de l'opérateur, on fera en outre appel à la contribution des radars secondaires, et aux possibilités offertes par l'exploitation automatique.



Aspect schématique d'images radar

5.1.3 Exploitation automatique d'un radar panoramique

a Principes et objectifs

L'augmentation de la densité des objets à contrôler et des performances des radars de veille aboutit à des limitations au niveau de l'exploitation. En effet le nombre de cibles détectées par un radar de veille est considérable (jusqu'à plusieurs centaines) et les informations recueillies par le radar nombreuses et variées (distance, azimut, codes IFF, altitude).

Un seul opérateur ne peut prendre en compte toutes ces données sur un grand nombre d'objet, Il faut donc pouvoir les lui présenter à sa demande, sous une forme exploitable, pour qu'il puisse les utiliser.

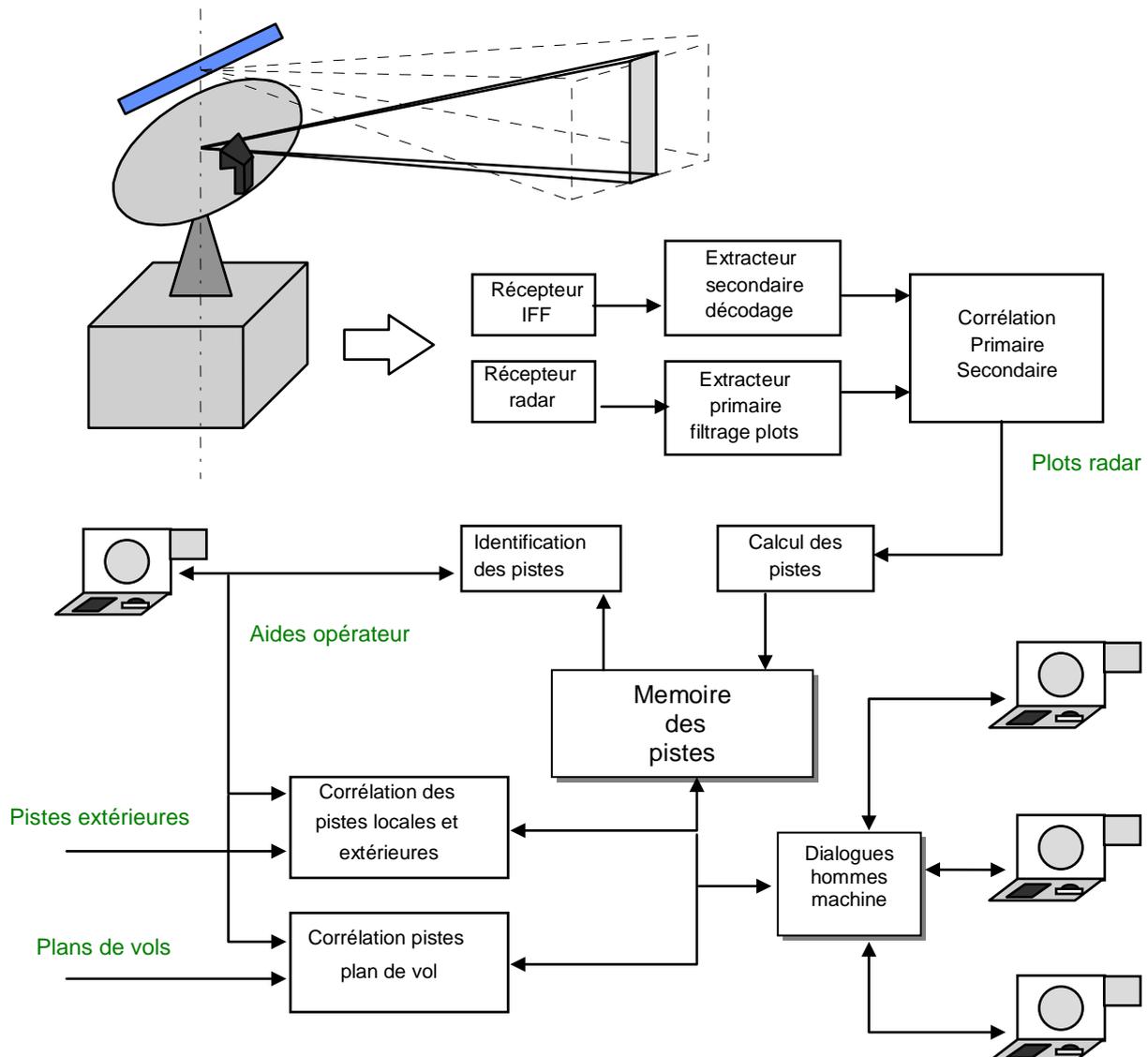
L'exploitation automatique a pour but essentiel de permettre cette présentation des informations à l'opérateur. Elle implique :

- l'extraction des informations du signal radar et leur mise en forme,
- la mémorisation de ces informations,
- leur classement par groupe d'informations attachées à un aéronef donné ou « formation des pistes »,
- la tenue à jour de ces pistes,
- l'élaboration de moyens de dialogue homme-machine.

D'abord mise en place sous des formes simples, l'automatisation de l'exploitation s'est trouvée pleinement justifiée par son apport important au confort de travail des opérateurs et à la sécurité des vols. De nombreuses extensions ont été rendues possibles grâce à la richesse de l'information ainsi recueillie parmi lesquelles :

- la corrélation des pistes au plan de vol,
- les dialogues entre les différents centres de contrôle.

Sans vouloir rentrer dans le détail de cette organisation, nous allons examiner sur un exemple type ses lignes principales.



b Organisation type d'une exploitation automatique

Le système de base est composé d'un radar primaire et d'un radar secondaire, tous deux sont orientés à un instant donné dans la même direction, les deux antennes étant liées mécaniquement.

Les signaux issus des récepteurs subissent alors les traitements suivants :

Extraction

Les échos issus d'une cible déterminée se trouvent tous à la même distance alors que la position des parasites (bruit, interférence, fruit...) varie d'une récurrence à la suivante. L'extraction est le processus qui à partir des échos élémentaires, permet de reconstituer les plots issus des objets à détecter. Les fonctions assurées sont :

- corrélation de position, de manière à faire ressortir les plots issus des cibles au milieu des parasites divers ;
- pour le radar primaire, pré-filtrage des plots qui a pour but d'éliminer les plots parasites issus du traitement précédent (réflexion sur des zones étendues, réceptions parasites par les lobes secondaires des aériens), qui est le plus souvent basé sur des paramètres géométriques, de manière à éviter la transmission des plots non intéressants pour la poursuite ultérieure ;
- pour le radar secondaire, « dégarblage » et « décodage » des informations reçues.

A ce niveau, les plots primaires et secondaires contiennent des informations de gisement et de distance calculées sur la moyenne des différents échos pris en compte.

Corrélation primaire secondaire

A ce stade, il convient d'associer les informations issues du radar primaire et du radar secondaire. La corrélation des coordonnées géographiques des plots issus des deux chaînes est couramment utilisée pour effectuer cette association, d'autres processus plus complexes peuvent être envisagés.

Calcul des pistes

A chaque tour d'antenne une certaine quantité de plots est délivrée qui peuvent être :

- issus du seul radar primaire - plots primaires,
- issus du seul radar secondaire - plots secondaires,
- associés par la corrélation - plots primaires-secondaires, ou mixtes.

Cette masse de plots contient une certaine quantité de faux plots, variable en fonction des conditions extérieures. Le "pistage" a pour but d'associer entre eux les plots issus d'un même mobile pour aboutir à la formation d'une piste (position, direction et vitesse à l'instant « t »). Dans les grandes lignes le processus est le suivant :

- Dans un secteur donné, comparaison des plots issus du radar avec les positions présumées des pistes déjà initiées, établissement des associations correspondantes.
- Initiation de pistes nouvelles par tentative d'association avec les plots non pris en compte au tour d'antenne précédent, à l'aide d'un filtrage basé sur des notions de vitesse maximale et minimale.

Ces pistes latentes seront plus tard confirmées ou infirmées en fonction des détections des tours d'antenne suivants. Ainsi prend corps une liste de pistes confirmées et une liste de pistes en attente. Les processus de mise en forme utilisent largement les informations du radar secondaire, qui permettent de faciliter les associations.

Identification des pistes

Cette opération a pour but d'associer à chaque piste "l'indicatif" du mobile correspondant, et de savoir qui est qui et qui va où ; ce qui est nécessaire pour guider en toute sécurité les différents mobiles. Pour ce faire, il peut être fait appel à l'aide d'opérateurs spécialisés capables, par des moyens radio, de converser avec les mobiles et de leur demander des manœuvres d'identification, ou des affichages IFF particuliers.

Corrélation pistes locales - pistes extérieures

Dans son parcours, le même mobile peut passer dans différentes zones de responsabilité, où il sera pris en charge par différents centres de détection. Pour ne pas avoir à recommencer toutes les opérations d'identification, il est nécessaire que les informations acquises par le centre amont soient transmises au centre aval, à qui incombera par la suite l'entretien de la piste pendant son passage. A un instant donné (les couvertures radar se recouvrant, ce qui est heureux) deux pistes coexistent, une piste locale nouvelle initiée par le centre receveur, une piste externe ancienne transmise par le centre donneur. La corrélation des pistes a pour but de les associer, certains opérateurs spécialisés peuvent aider à cette opération.

Corrélation piste - plan de vol

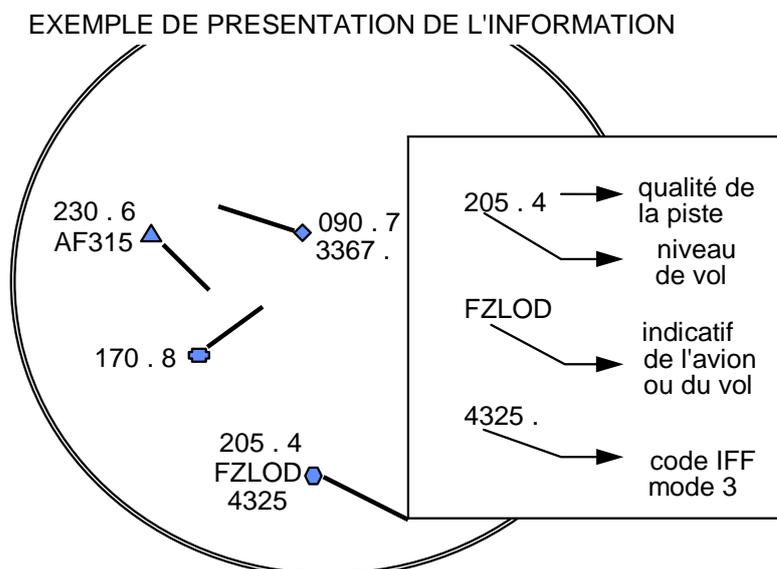
Une fois l'identification bien acquise, il est envisageable d'affecter à chaque piste des informations complémentaires (les spécialistes appellent cette opération "habillage des pistes"), en particulier, toutes les informations issues du plan de vol peuvent lui être affectées.

Dialogues hommes - machine

Une mémoire centrale regroupe toutes les informations réunies sur les mobiles contrôlés par la station. Il convient alors de les délivrer aux opérateurs de manière sélective, sans les saturer mais en leur assurant une information optimale. Le contrôleur composera lui - même son image en dialoguant avec le système, il dispose pour cela :

- d'un scope PPI,
- d'un moyen de désignation des mobiles sur ce PPI (manche ou boule roulante),
- d'un clavier fonctionnel lui permettant de poser un certain nombre de questions au système automatique.

Il peut ainsi afficher sur son scope, outre la vidéo brute du radar, tout ou partie des informations suivantes sous forme d'une "vidéo synthétique" comprenant à la demande :



- un symbole attaché à la piste,
- un vecteur vitesse,
- des informations : niveau de vol, qualité piste, indicatif de l'aéronef, code IFF, etc...

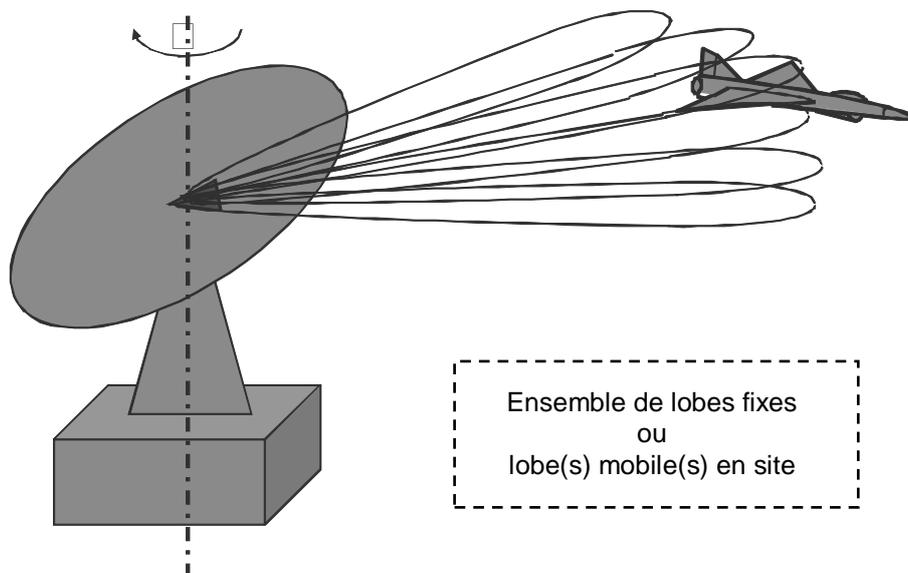
L'opérateur, à l'aide des commandes à sa disposition (clavier d'ordre, boule de désignation), compose son image selon ses besoins ; il dispose d'un certain nombre de fonctions globales comme :

- affichage toutes pistes (marqueur)
- affichage vecteur vitesse
- tri par tranche d'altitude
- tri par code IFF
- tri par zone
- etc...

5.2 LES RADARS VOLUMETRIQUES

Dans certaines conditions, la non connaissance de l'altitude des aéronefs peut devenir un handicap à la bonne reconstitution de leur piste, en particulier pour régler les problèmes de "conflits" et d'anticollision ou pour transférer des pistes d'une station à une autre (la connaissance de l'altitude est nécessaire à un changement de coordonnées).

L'altitude fournie par le mode C du radar secondaire peut dans une certaine mesure être utilisée à cette fin, mais elle n'est pas toujours disponible (tous les aéronefs ne répondent pas au mode C) et elle est liée à la précision d'un système extérieur au radar (alticodeur à bord de l'aéronef). Aussi, dans certains cas, il a été jugé préférable d'utiliser des radars donnant simultanément la distance, le site et le gisement des aéronefs, de tels radars sont dits "radars 3D" ou "radars volumétriques". Deux procédés principaux sont utilisés pour aboutir à cette performance :



Radars à faisceaux étagés

Dans cette version, le faisceau radar est découpé en site en un certain nombre de faisceaux élémentaires, qui reçoivent chacun une partie de l'énergie, soit par division de puissance sur un ensemble de sources les faisceaux étant formés par un réflecteur parabolique, soit par

division du signal émis en tranches de fréquences différentes et utilisation d'une antenne dispersive en fréquence. A chaque lobe ainsi formé est associé un récepteur particulier, la comparaison des signaux issus de chaque récepteur permet alors de mesurer le site de la cible.

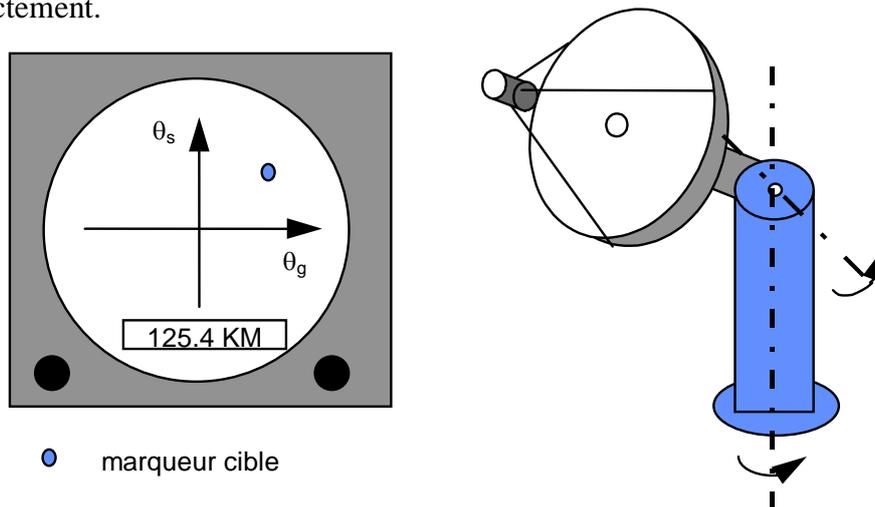
Double balayage de l'espace

Dans cette version un (ou un groupe de) faisceau directif en site et gisement est animé d'un balayage sectoriel en site et continu en gisement. Les diverses tranches d'espace sont ainsi explorées successivement. Il faut, pour que toutes les cibles soient détectées, qu'une énergie suffisante soit émise dans chaque direction, d'où les lois de balayage plus ou moins complexes. On peut aussi envisager un balayage électronique en site et gisement du faisceau radar, ce qui permet d'atteindre le maximum de souplesse dans l'exploitation.

5.3 LES RADARS A EXPLORATION CONIQUE

Dans cette application, on recherche à déterminer simultanément les trois paramètres définissant la position d'une cible, c'est-à-dire : sa distance, son site et son gisement. Le pinceau radar sera alors de même ouverture en site et gisement, l'antenne radar devenant circulaire. Pour rechercher une cible dans un certain domaine, on peut avoir recours à un balayage conique, ainsi dénommé parce que la portion d'espace à explorer est un cône. Le mouvement mécanique de l'aérien permettra d'explorer ce domaine par un balayage en spirale ou par un balayage de type télévision.

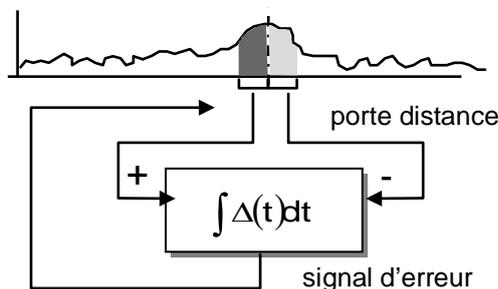
Les positions angulaires de l'aérien sont reproduites sous forme de tensions appliquées aux plaques de déviation horizontale et verticale d'un scope. La sortie du récepteur vient commander le « wehnelt » de ce scope pour visualiser le plot de la cible. La distance est alors affichée directement.



Les procédés suivants sont utilisés pour affiner la mesure du radar :

Poursuite distance

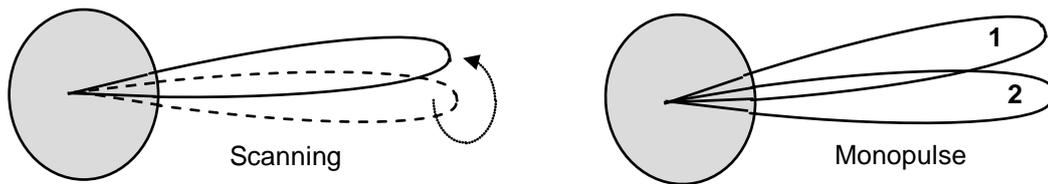
Une poursuite automatique de l'écho de cible, selon, par exemple, le schéma suivant :



La poursuite est basée sur une double pesée du signal dans deux demi portes de sélection « presque » centrées, qui permet, après intégration du signal d'erreur, de commander une boucle de positionnement pour recentrer la porte sur le signal reçu. La position de la porte est alors délivrée à l'opérateur ou au système de traitement.

Poursuite angulaire

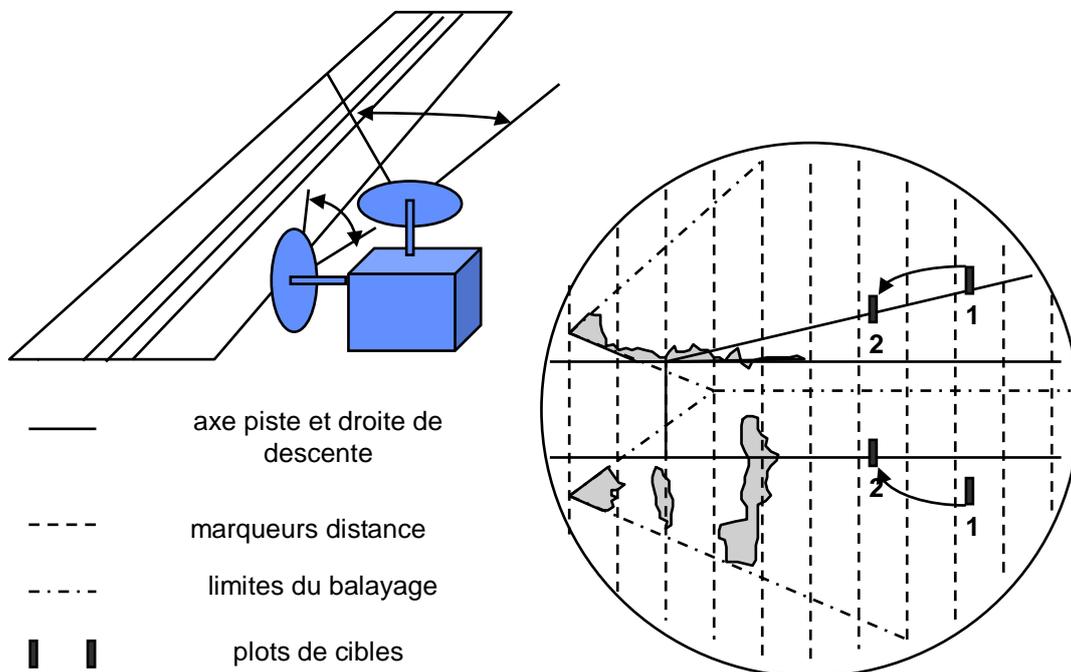
Deux procédés sont utilisés : Le « scanning » qui fait appel à une rotation très rapide du faisceau radar autour d'un axe de symétrie, ce qui entraîne une modulation d'amplitudes des échos reçus, exploitable pour restituer le dépointage angulaire de la cible, le « monopulse », qui utilise une antenne à directivité multiple, la pesée relative des échos dans les différents faisceaux réception permettant de situer angulairement la cible.



5.4 LES RADARS D'ATTERRISSAGE

La plupart des avions possèdent leurs propres moyens d'atterrissage sans visibilité utilisant le procédé ILS (Instrument Landing System) seul ou en association avec d'autres moyens (inertie, sonde altimétrique). Cependant l'utilisation d'un radar sol spécialisé, appelé radar GCA (Ground Control Approach) permet de réaliser cette même fonction avec un avion doté seulement de la radio et guidé par un contrôleur au sol. Ce radar doit donc être capable de guider un avion sur un axe de descente, il doit alors mesurer simultanément le site, l'azimut et la distance de l'avion, par rapport à son point de posée.

La solution retenue est celle d'un radar à deux antennes à balancement, l'une en site, l'autre en gisement, reliées cycliquement au même émetteur-récepteur



Chaque antenne a des ouvertures adaptées au volume à explorer, de telle manière que le volume analysé soit d'environ « -1+16° » en site et « +/- 30° » en gisement. Tout objet se présentant dans ce volume est vu par l'un des deux aériens. Lorsqu'il se rapproche de l'axe il est alternativement vu par les deux aériens. Le balayage des deux aériens est visualisé sur le même écran, ce qui permet un guidage complet de l'aéronef.

5.5 LES RADARS DE SITOMETRIE

Dans ces radars, le faisceau d'antenne est orienté de telle manière que sa plus faible ouverture soit dans le plan vertical. L'exploration de l'espace est obtenue par un « balancement » du lobe d'antenne, mécanique ou électronique, après une orientation préalable dans la direction visée ou une rotation synchronisée avec l'antenne du radar de veille.

L'organisation générale et celle du traitement du signal est similaire à celle d'un radar de veille classique. Les cibles sont identifiées par leur distance, ce qui permet le report de l'information d'altitude sur l'information du radar de veille associé.

5.6 LES RADARS AEROPORTES

Les radars aéroportés se distinguent des radars de surface par le fait qu'ils constituent des observatoires élevés, propres à la détection à grande distance des cibles de surface ou évoluant à très basse altitude. En contrepartie, ils sont beaucoup plus perturbés par les échos du sol du fait qu'ils regardent souvent vers le bas et qu'ils sont eux - mêmes mobiles. Dans beaucoup de cas la détection des cibles utiles exigera un filtrage doppler pour distinguer les cibles mobiles dans les échos fixes.

Enfin leur situation particulière les amènera à être utilisés dans des fonctions particulières comme la navigation, la cartographie et la reconnaissance.

5.6.1 Les radars de veille aéroportés

Les radars de veille aéroportés sont spécialement utilisés pour la surveillance des aéronefs évoluant à basse altitude, mais aussi des véhicules terrestres et maritimes.

On peut les décomposer en trois catégories :

a Les radars de surveillance aérienne

Ils sont destinés à détecter des aéronefs évoluant à basse et moyenne altitude, à des distances typiques de 400 kilomètres. Capables d'une détection volumétrique ils seront en mesure de créer des pistes "3D" (position et altitude) de ces objets. Le plus caractéristique est le radar du système AWACS américain (Airborn Warning And Control System) utilisant l'effet doppler pour la détection des mobiles et réunissant dans un seul aéronef l'équivalent d'une grosse station de détection sol.

b Les radars de surveillance maritime

Moins complexes que les précédents ils sont destinés à la détection des navires de surface (cibles de grande taille) ou des éléments émergés des sous-marins (cibles de petite taille). Ils ne peuvent utiliser l'effet doppler du fait de la faible vitesse des cibles, et ne les détecteront que si leur surface équivalente est supérieure à l'écho de retour du fouillis de mer. Des techniques particulières dont la "compression d'impulsion" et les "antennes synthétiques" sont utilisées pour y parvenir.

c Les radars de surveillance terrestre

Destinés à détecter les véhicules au sol, ils utilisent l'effet doppler pour les mobiles en mouvement (colonne de véhicules) et la comparaison de cartes successives pour déceler les

concentrations de véhicules. Souvent installés sur des hélicoptères ils peuvent procéder par « coup de phare », l'hélicoptère s'élevant à l'altitude adéquate pendant la durée nécessaire à chaque observation.

5.6.2 Les radars de conduite de tir

Appelés aussi "radars d'interception" ils sont installés dans la pointe avant des avions de combat et sont chargés d'acquérir la ou les cibles désignées par les systèmes de surveillance, de les poursuivre et de délivrer au système d'armes de l'avion toutes les informations nécessaires à la réalisation de l'interception. Ils sont capables d'une veille volumétrique dans un secteur donné, de fonctions de pistage et de poursuite des cibles et d'aide aux armements sélectionnés : désignation d'objectif et/ou illumination des cibles. Les cibles pouvant évoluer à basse altitude, on fera appel aux techniques de radars doppler à impulsions. Le balayage du faisceau d'antenne pourra être mécanique ou électronique.

5.6.3 Les radars de navigation

Ces radars sont destinés à apporter une aide à la navigation des aéronefs, plus ou moins complexe et complète selon le type de mission envisagée. Ils sont capables de tout ou partie des fonctions suivantes :

- météorologie pour l'évitement des nuages dangereux ;
- recalage de navigation par mesure continue ou discontinue de la vitesse sol ;
- reconnaissance de points fixes au sol par mesures cartographiques ;
- suivi de terrain par détection du profil du terrain à une distance suffisante devant l'avion, permettant un vol à altitude sol constante épousant aux mieux le relief ;
- détection et localisation des obstacles à développement vertical (pylônes, câbles, lignes haute tension...).

Les performances de ces systèmes sont telles que l'on peut envisager des "altitudes de garde" de 100 mètres à quelques dizaines de mètres.

5.6.4 Les radars de reconnaissance du sol

Chargés d'effectuer une cartographie fine du sol avec une finesse d'image pouvant atteindre quelques mètres, ils utilisent la technique des antennes latérales ou synthétiques ou SLAR : (Side Looking Airborne Radar). Leur faisceau d'antenne est dirigé latéralement par rapport à la route de l'avion, la zone totale observée (ou fauchée) étant en outre définie par le chemin parcouru par l'avion. Les images prises à distance de sécurité (50 à 100 km), sont stockées à bord de l'avion ou retransmises par une liaison hertzienne à grand débit (environ 50 Mégabits par seconde). De tels systèmes sont aussi embarqués sur les satellites d'observation radar.

5.6.5 Autres types de radar

Il serait fastidieux de décrire un par un tous les systèmes radar, il suffit de retenir que les applications du radar sont très nombreuses notamment dans les domaines suivants :

- | | | |
|----------------------|-----------------------|------------------------|
| - Contrôle aérien | - Anti - collision | - Navigation |
| - Atterrissage | - Météorologie | - Conduite d'armes |
| - Trajectographie | - Suivi de terrain | - Guidage des missiles |
| - Mesure de vitesses | - Surveillance du sol | - Autoguidage |
| - Altimétrie | - Cartographie | - Fusées de proximité |

Ces radars étant intégrés dans des systèmes : terrestres, maritimes, aéronautiques ou spatiaux. Leur progression est loin d'être terminée, comme le montre le niveau actuel des études.

6 CRITERES DE PERFORMANCES

6.1 PRECISION ET POUVOIR DISCRIMINATEUR

6.1.1 Définitions de base

Un radar est capable de détecter la présence de cibles et de déterminer leur position dans un certain volume appelé généralement « *volume de détection* », lié à la nature de son aérien, à son mode d'exploitation et aux caractéristiques du signal émis.

A l'intérieur de ce volume, le radar est caractérisé selon deux critères de performances, liés à la finesse des mesures qu'il est capable d'effectuer :

- le *pouvoir discriminateur*, ou pouvoir que l'on a de séparer deux cibles voisines, cette performance est directement liée à la dimension du "plot" radar.
- la *précision* avec laquelle l'observatoire radar permet de localiser une cible isolée, elle est liée à la finesse avec laquelle on saura déterminer le centre du "plot" radar

On désigne sous le nom de « plot » l'ensemble des réponses électromagnétiques ou « échos » issues d'un objet déterminé pendant la durée d'une mesure (Cf. § 4.1.2).

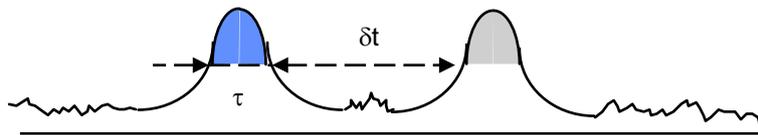
Précision et pouvoir discriminateur sont liés à deux caractéristiques du radar. La nature du lobe d'antenne, du signal radar utilisé et des traitements associés. Le lobe d'antenne détermine le développement angulaire du plot reçu d'une cible, la nature du signal émis, le développement radial de ce plot. Les moyens mis en oeuvre pour traiter l'information du radar ont une influence certaine sur les résultats obtenus. Il n'est pas question dans ce paragraphe d'effectuer l'analyse complète du problème, mais simplement de donner des notions simples qui permettent de déterminer des critères pratiques.

6.1.2 Mesure de la distance

Le pouvoir discriminateur en distance d'un radar, est liée à la *durée de l'impulsion obtenue en bout de la chaîne de traitement du signal*. On rappelle que la durée du trajet de l'onde est donnée pour la relation : $T = 2 D/C$. On retiendra en pratique que la différence de temps de trajet de deux ondes issues de la même direction doit être au moins égale à la durée " τ " du signal traité pour que ces ondes soient séparables.

Le *pouvoir discriminateur* en distance d'un radar sera donc exprimé par la relation :

$$\delta D = C \cdot \tau / 2 \quad (150 \text{ m par microseconde})$$



Le pouvoir discriminateur dépend du traitement du signal, il est lié à la durée de l'impulsion issue de ce traitement et non à la durée du signal émis.

Grâce à des techniques modernes de codage et de traitement du signal, on peut obtenir des pouvoirs discriminateurs très élevés (quelques mètres, voire centimètres), les radars classiques ont des pouvoirs discriminateurs de quelques dizaines à quelques centaines de mètres.

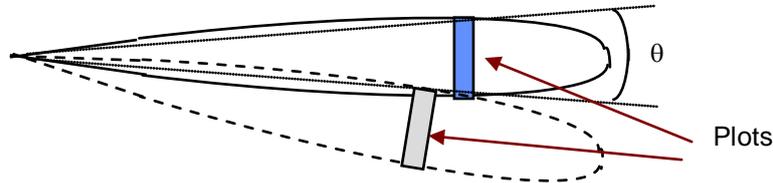
La *précision en distance*, dépend du procédé de mesure employé, elle est donc liée au système d'exploitation utilisé. Dans les radars de veille ou aucun affinage particulier n'est effectué, elle est du même ordre de grandeur que le pouvoir discriminateur.

Dans les radars de poursuite les procédés particuliers de poursuite distance permettent d'atteindre des précisions de l'ordre de 1 % à 10 % du pouvoir discriminatoire.

6.1.3 Mesure des angles

Le pouvoir discriminatoire angulaire d'un radar est lié à la nature de l'aérien utilisé notamment à l'ouverture angulaire à mi-puissance de son lobe d'antenne :

$$\theta \approx 65. \lambda / D.$$



1° correspond à 175 m à 10 km,.. 870 m à 50 km,.. 1740 m à 100 km

On estime en moyenne :

- qu'à l'intérieur de l'ouverture à mi-puissance de l'aérien, les échos sont perceptibles,
- qu'à l'extérieur de cette zone, ces mêmes échos deviennent rapidement très faibles.

Cela revient à admettre que deux objets forment deux plots angulairement distincts, s'ils ne se trouvent pas en même temps dans l'ouverture à mi-puissance de l'aérien, ce qui n'est évidemment vrai que dans une certaine plage de force d'échos. Le pouvoir discriminatoire angulaire d'un radar est donc défini par ses ouvertures angulaires liées à la dimension de son aérien. La précision de mesure angulaire dépend alors du procédé d'exploitation utilisé pour la mesure des angles. Comme la précision de mesure de la distance, elle est fortement liée à la nature de ces procédés et peut atteindre 1 à 10 % du pouvoir discriminatoire dans les solutions les plus élaborées.

On notera que pour que deux cibles soient discriminées angulairement, il faut qu'elles soient dans des domaines angulaires explorés successivement ou indépendamment par l'antenne du radar. En particulier, le pouvoir discriminatoire en site d'un radar panoramique est nul puisque qu'il n'explore pas les différents sites. L'ouverture en site de son antenne définit alors son domaine de détection dans le plan vertical.

6.1.4 Notions sur les performances de précision

La précision de la mesure (Cf. chapitres 12 et 18) est liée au rapport signal sur bruit en puissance : « S/B » et au nombre « n » de signaux pris en compte dans la mesure. Si on désigne par :

- σ_t et σ_θ les écarts type sur la mesure du temps de trajet et la mesure angulaire ;
- δt et $\delta \theta$ les pouvoirs discriminatoires correspondants en temps et angle ;

on peut dans le cas de *procédés de mesure élaborés*, retenir les ordres de grandeurs suivants :

$$\delta t \approx \frac{1}{\Delta F} \quad \text{et} \quad \delta \theta \approx \frac{\lambda}{L}$$

$$\frac{\sigma_t}{\delta t} \approx \frac{\sigma_\theta}{\delta \theta} \approx \frac{1}{k \sqrt{2.n.(S/B)}}$$

« ΔF » étant la bande du signal émis, « L » la largeur de l'antenne utilisée et « λ » la longueur d'onde utilisée. « k », selon le type de traitement, varie entre 1 et 2.

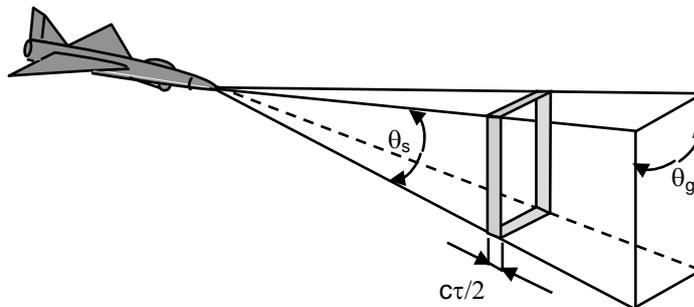
6.2 VOLUME DE CONFUSION

Deux cibles peuvent être séparées en distance ou angulairement, il existe donc un domaine d'espace associé à chaque radar, à l'intérieur duquel deux cibles ne peuvent donner naissance à deux signaux distincts. Ce volume est appelé *volume de confusion*.

Ce volume de confusion est défini à partir des trois pouvoirs discriminateurs :

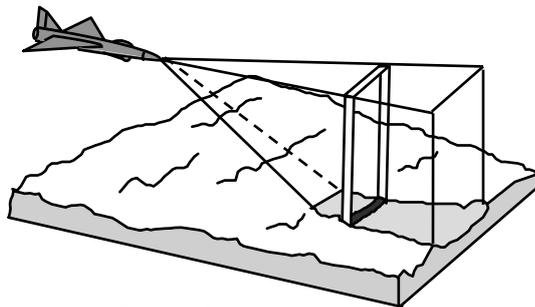
- en distance $\delta D = C \cdot \tau / 2$,
- en site θ_s et
- en gisement θ_g .

En effet, les ouvertures θ_s et θ_g définissent un angle solide à l'intérieur duquel deux cibles sont éclairées simultanément. Néanmoins, à l'échelle de temps du radar, ces deux cibles donneront des échos séparables par le récepteur de celui-ci si elles sont distantes de plus de : $\delta D = C \cdot \tau / 2$.



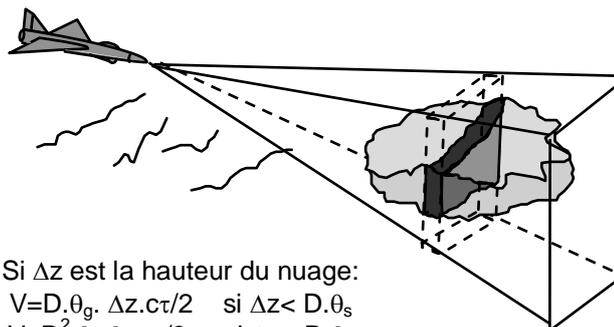
On notera cependant le cas particulier des radars de veille panoramiques pour lesquels l'aérien n'est mobile qu'en gisement. En pratique donc, le volume de confusion en site d'un radar panoramique est confondu avec son volume de détection.

Le volume de confusion d'un radar prend une autre signification dans le cas de la détection des échos étendus. C'est en effet son intersection avec la zone observée, qui conditionne la surface où le volume des échos pris en compte par le radar.



$$\Sigma = D \cdot \theta_g \cdot c \tau / 2$$

Surface de sol interceptée par un radar



Si Δz est la hauteur du nuage:

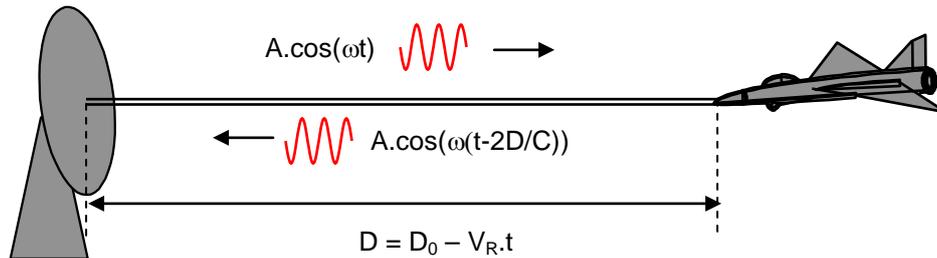
$$V = D \cdot \theta_g \cdot \Delta z \cdot c \tau / 2 \quad \text{si } \Delta z < D \cdot \theta_s$$

$$V = D^2 \cdot \theta_g \cdot \theta_s \cdot c \tau / 2 \quad \text{si } \Delta z > D \cdot \theta_s$$

Volume de nuage intercepté par un radar

6.3 MESURE DE LA VITESSE

Un autre paramètre mesurable par les radars sous certaines conditions est la vitesse radiale ou vitesse de rapprochement, des objets détectés, qui se manifeste à travers *l'effet doppler*.



Soit un mobile situé à l'instant d'origine à une distance D_0 du radar et s'en rapprochant à la vitesse V_R . Le temps de trajet de l'onde s'écrira :

$$\Delta T = \frac{2D}{C} = \frac{2D_0}{C} - \frac{2V_R t}{C}$$

Le signal émis est de la forme :

$$s_e = A \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$$

Le signal reçu aura pour expression :

$$s_r = A \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot (t - \Delta T)) = A \cdot \cos\left(2\pi \left(F + \frac{2V_R t}{C/F}\right) + \varphi_0\right)$$

avec :

$$\lambda = C/F$$

La fréquence du signal reçu a donc varié de :

$$f_d = \frac{2V_R}{\lambda}$$

Où « f_d » est la *fréquence doppler de la cible*. Cette variation de fréquence très faible peut être mise en évidence en comparant le signal reçu et le signal émis. On peut également constater que leur phase relative a varié, c'est souvent à travers cette variation de phase que l'on met en évidence l'effet doppler.

Nous noterons enfin que cette translation de fréquence est en réalité due à *une évolution de la durée du signal reçu*.

En effet si la distance entre la cible et le radar diminue pendant la durée du signal, le début du signal aura parcouru une distance supérieure à celle parcourue par la fin du signal. La « queue » de signal rattrape ainsi sa « tête », donc la durée du signal diminue et corrélativement sa fréquence augmente.

Si T_e est la durée du signal émis, T_r la durée du signal reçu, on peut vérifier que :

$$T_r = T_e \left(1 - \frac{2V_R}{C}\right)$$

Ainsi, le radar possède dans une certaine mesure le pouvoir de discriminer des cibles de vitesses radiales différentes même si elles sont dans le même volume de confusion.

7 PORTEE D'UN RADAR - DOMAINE DE DETECTION

La portée d'un radar est la distance jusqu'à laquelle il est capable de détecter la présence d'une cible, dans un domaine angulaire donné et dans un temps donné.

Sa définition dépend des performances recherchées. Des conditions de précision, par exemple, peuvent apporter des contraintes supplémentaires, ainsi que la présence du clutter ou fouillis.

Le problème du volume de détection d'un radar est à examiner sous un angle statistique. On ne peut affirmer qu'un radar voit ou ne voit pas une cible avec une limite précise, car la qualité de la détection se dégrade lentement.

Nous verrons ultérieurement que l'on est amené à évaluer un radar à l'aide de critères de performances auxquels on associe une certaine probabilité de réussite.

Il faut retenir en définitive qu'un radar est un objet très complexe qu'il faut examiner sous l'angle système. Sa conception doit être adaptée dans chaque cas aux performances à obtenir en fonction de caractéristiques parfois contradictoires.
