

HISTOIRE du RADAR dans le MONDE puis en FRANCE

par

Jacques DARRICAU et Yves BLANCHARD

Table des matières

PREMIERE PARTIE - LA NAISSANCE DU RADAR	2
Les précurseurs	2
L'éclosion du radar dans le monde.....	3
Aux USA	3
En Grande Bretagne.....	6
En Allemagne	9
La Russie et les autres pays.....	12
L'éclosion du radar en France	12
Des pionniers français à 1939.....	13
Un effort accéléré à l'approche et au début de la guerre	14
La situation sous l'occupation, l'équipement DEM de la Flotte.....	15
L'histoire particulière du magnétron et la naissance des radars centimétriques.....	16
Les échanges franco - anglais.....	16
Les échanges Angleterre - USA. La mission Tizard	17
Le TRE et le Radiation Laboratory	18
Les développements anglais.....	18
Les développements américains.....	19
Le radar à l'issue de la seconde guerre mondiale	20
DEUXIEME PARTIE - LE RADAR MODERNE EN FRANCE.....	21
Le contexte industriel	21
Le niveau de départ après 1945, les premiers radars de surface	26
La maîtrise de la puissance	28
Les radars volumétriques PALMIER et ARES	30
Le traitement du doppler	31
Les VCM	32
Les radars sols, doppler et pulse doppler	33
Le codage du signal : compression d'impulsion et corrélation	33
Les premières applications des techniques modernes : TIGER et IGUANE	36
Les radars d'imagerie à haute résolution (à antenne synthétique).....	37
Les radars hélicoptés de surveillance du champ de bataille	39
Les débuts des radars d'avions d'armes	39
La famille CYRANO.....	40
Les radars pulse doppler aéroportés.....	43
Le balayage électronique	45
Le balayage électronique dans une dimension.....	45
Le balayage électronique dans deux dimensions	47
Les antennes actives.....	49
Le balayage électronique aéroporté.....	50
Le retour aux bandes basses	51
Un mot de conclusion	53

LA NAISSANCE DU RADAR

PREMIERE PARTIE - LA NAISSANCE DU RADAR

Les précurseurs

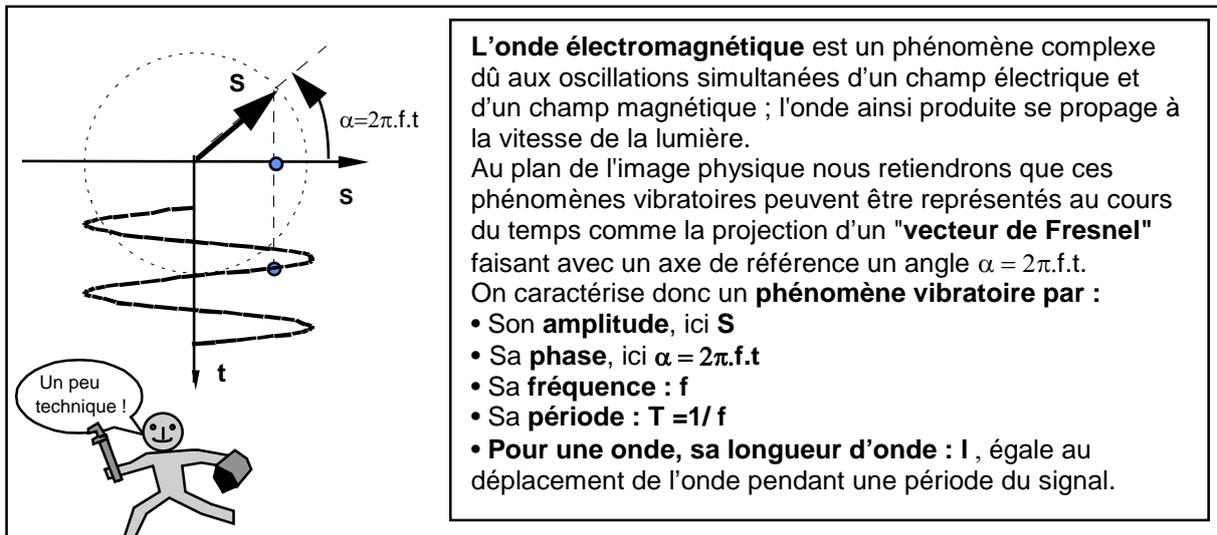
Les premières applications de la radioélectricité furent les télécommunications puis la radio-navigation, mais, dès le début du siècle, des précurseurs envisagèrent la possibilité de détecter la présence d'objets métalliques par l'utilisation d'ondes électromagnétiques. Cette nécessité de «détecter» 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*, émetteur récepteur radiofréquence, utilisé pour la détection à distance d'objets métalliques, qu'il avait testé avec succès à Cologne puis à Rotterdam avec des portées de l'ordre de 3 kilomètres sur des bateaux.

LA NAISSANCE DU RADAR

Ce même type d'expérience fut repris en 1916 par *Hans Dominik* et *Richard Scherl*. Dans les deux cas le signal émis provenait d'un générateur de "Spark" qui délivrait une onde électromagnétique engendrée par l'amorçage d'une lampe à arc.

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, les réflexions de *Guglielmo Marconi* rendues publiques en 1922 et diverses expérimentations, notamment celles de *A.H. Taylor* et *L.C. Young* aux USA utilisant une longueur d'onde de 5 mètres, qui conduisirent aux premières idées du *NRL* : Naval Research Laboratory et à un mémorandum de Taylor en septembre 1922.

En France, le *professeur Langevin* avait été pendant la première guerre l'inventeur de l'écholocation par ondes acoustiques - c'est à dire du *sonar* - et certains avaient bien pensé en transposer l'idée aux ondes hertziennes : ainsi un certain *M. Brard*, radio amateur chevronné, qui se livre en 1923 à de curieuses expériences de réflexion d'ondes radio sur une antenne bricolée avec... un réveille-matin, travaux rapportés par le capitaine J. Bion du département scientifique de la marine. Il propose son idée aux responsables de la recherche militaire, en se référant très explicitement aux *principes de Langevin*, mais il n'est pas pris au sérieux : un émule français d'Hülsmeier en somme.

D'autres expériences auront lieu un peu plus tard, notamment en 1927 celles de *C. Gutton* et *E. Pierret* sur une longueur d'onde de 16 centimètres, à la faculté des sciences de Nancy.

Pour sa part, *P. David*, membre du *Laboratoire National de Radioélectricité*, créé en 1919 par le *Général Ferrié*, après des expériences menées avec *R. Mesny* sur la détection des parasites radioélectriques émis par les moteurs d'avions, émet l'idée de « forcer les avions à émettre », en quelque sorte malgré eux, en les prenant dans un faisceau d'ondes courtes. Cette idée fut clairement exprimée dans un mémorandum de 1928. Il ne semble malheureusement pas qu'on en ait conservé de copie.

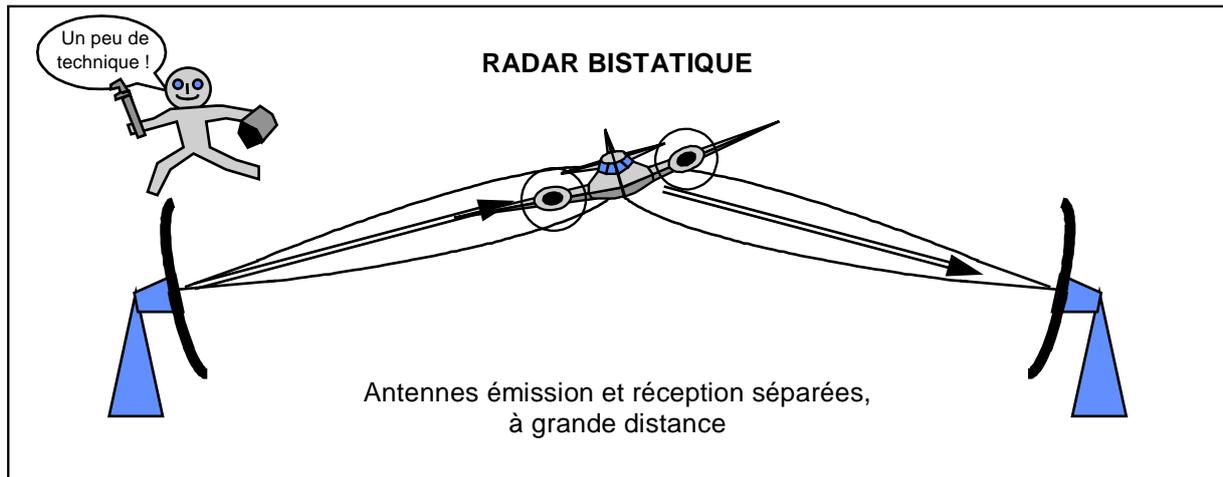
La véritable éclosion de cette technique se situe cependant entre 1930 et 1940, où des recherches et développements ont été menés simultanément dans de nombreux pays notamment les USA, la Grande Bretagne, l'Allemagne et la France, mais aussi la Russie, l'Italie, la Hollande et le Japon.

L'éclosion du radar dans le monde

Aux USA

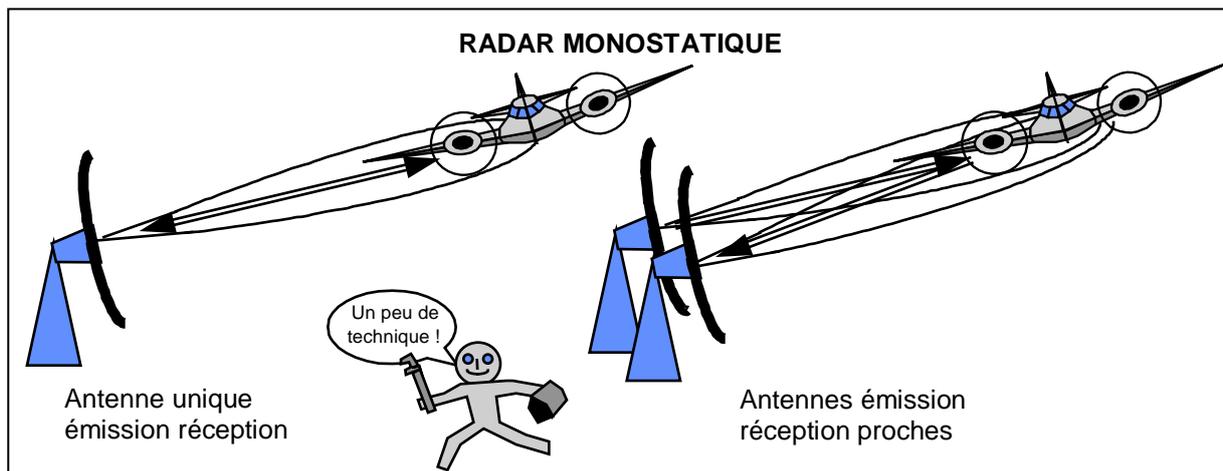
Outre atlantique, les premières observations de *A.H. Taylor* et *L.C. Young* au *Naval Research Laboratory* en 1922 n'avaient pas eu de suite immédiate. Mais en 1930, lors d'essais d'un radiocompas à 30 MHz, le même Young et son collègue *L.A. Hyland* observent à nouveau des perturbations de liaison nettement corrélées avec le passage d'un avion dans le voisinage. Ils les interprètent comme un effet de « battement » entre l'onde de trajet direct et une onde réfléchie par l'avion, et proposent d'utiliser cet effet dans un but de détection. Sous l'égide de Taylor, devenu entre-temps chef du laboratoire, le *NRL* expérimente le principe d'un « *radar bistatique en onde continue* » (émetteur de 500 W continus sur 29 MHz, récepteur éloigné de 5,5 km et isolé par une zone de collines), qui permet de déceler les mouvements d'un avion en vol à une distance de 50 km. Le brevet de ce système est déposé au nom de Taylor, Young et Hyland le 13 juin 1933.

LA NAISSANCE DU RADAR



Ces essais retiennent également l'attention de *l'Army Signal Corps Laboratory*, en charge des équipements de DCA côtière. Le SCL désigne *W.H. Hershberger* pour suivre les études de radio-détection du NRL, tout en explorant une voie beaucoup plus originale pour l'époque dans la gamme centimétrique. En août 1934, Hershberger expérimente un dispositif bistatique continu sur 9 cm, très voisin de celui que la SFR développe en France à la même époque pour équiper le « Normandie ».

Mais à vrai dire, quelle que soit la fréquence, ces systèmes sont encore éloignés du véritable radar, en ce sens qu'ils ne fournissent ni la distance ni la direction de la cible. En mars 1934 le NRL décide de se réorienter vers une méthode « *monostatique à impulsions* » qui utiliserait l'écho d'impulsions brèves réfléchies sur la cible, selon le principe déjà imaginé par *G. Breit* et *M.A. Tuve* pour mesurer l'altitude des couches réfléchissantes de l'ionosphère. Taylor confie à *R.M. Page*, jeune ingénieur du NRL, la responsabilité d'un groupe de projet constitué à cet effet.



Page réalise une première maquette de faisabilité dès décembre 1934 (60 MHz, 100 W crête, 10 μ s de durée d'impulsion), mais le développement d'un prototype plus puissant (30 MHz, 7,5 kW crête, 7 μ s) demandera trois ans, avec à la clé d'énormes problèmes technologiques à résoudre. Pour obtenir les niveaux de puissance nécessaire, un émetteur/oscillateur associant jusqu'à 16 triodes en boucle est mis au point. Le point le plus délicat concerne le récepteur, qui doit concilier haute sensibilité et grande largeur de bande pour passer les impulsions, et être capable de retrouver toute sa sensibilité aussitôt après avoir "encaissé" l'impulsion d'émission.

LA NAISSANCE DU RADAR

Page a rapporté dans ses mémoires comment il trouva la solution dans un article du *Professeur R. Mesny* publié par la revue française « *l'Onde Electrique* ». Enfin le problème du « *duplexeur* », l'aiguillage électronique qui permet l'usage d'une même antenne pour l'émission et la réception, est définitivement résolu en juillet 1936.

Le prototype intégrant toutes ces innovations technologiques, baptisé « *XAF* » (200 MHz, impulsions de 7 μ s et 7,5 kW crête) est disponible fin 1937 et subit ses premiers essais opérationnels en février 1938. Des détections d'avions sont obtenues jusqu'à 180 km. En décembre il est installé à bord du cuirassé « New York » pour des essais à la mer : les profanes découvrent alors dans les superstructures du bâtiment une mystérieuse antenne constituée d'un réseau carré de dipôles de 5 mètres de côté. Sa forme insolite lui vaut aussitôt le sobriquet de « sommier volant » !

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 « *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 et réalise une première maquette « rustique » de « *radar bistatique à impulsions* » en ondes métriques (110 MHz, 75 W puis 10 kW crête, antenne Yagi) en octobre 1936.

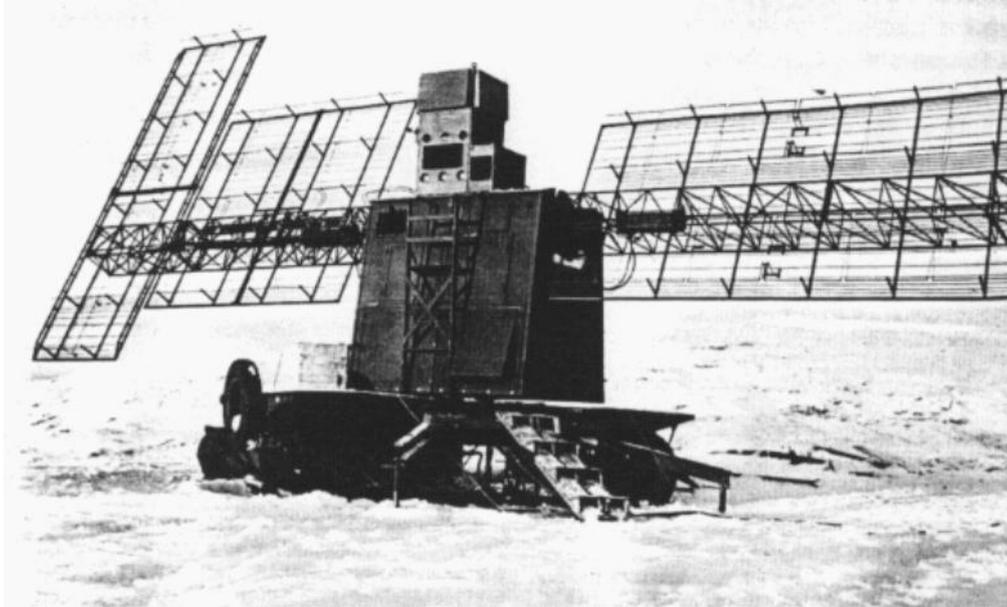
Entre les deux services étatiques *NRL et SCL*, il semble bien que l'esprit de concurrence l'emporte désormais sur celui de coopération, et leurs développements se poursuivent dans des voies relativement indépendantes. En mai 1937 Watson fait la démonstration d'un radar de conduite de tir qui détecte un bombardier à 20 km. La maquette se présente comme un radar de tir monostatique à impulsions. Mais l'Armée n'ayant pas les mêmes restrictions de place que la Marine, elle utilise 3 antennes séparées sur des châssis différents, une pour l'émission, une pour la réception en gisement, et une pour la réception en site. Le prototype définitif, disponible début 1940 avec des performances améliorées (205 MHz, 75 kW crête, 3 à 9 μ s), d'une portée de 35 km, regroupera les trois antennes sur un même châssis. Pour satisfaire aux spécifications de précision angulaire, le SCL imagine la technique du « *lobe-switching* », historiquement la première mise en pratique d'une méthode d'affinage de la mesure angulaire. Ce radar, industrialisé par la *Western Electric Compagny* 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). En août 1938 une maquette préliminaire, avec une antenne-réseau de 8 x 4 dipôles demi-onde commune pour l'émission et la réception, détecte un bombardier à 75 miles. Ce nouveau radar atteint sa pleine performance (100 MHz, 100 kW crête, 10 μ s) en octobre, quand il peut bénéficier des nouveaux tubes de puissance à refroidissement à eau WL 530 de *Westinghouse*, société chargée par la suite de la production de série. 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.

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.

LA NAISSANCE DU RADAR

Il avait pourtant plutôt raté son entrée en scène ! A l'aube du 7 décembre 1941, deux heures avant l'attaque sur *Pearl Harbor*, on sait qu'un nouveau radar tout récemment installé avait détecté à près de 200 km l'arrivée du raid japonais. Mais l'observation, mal interprétée, ne fut pas exploitée en temps utile. Le radar n'était pas réellement en cause, simplement on n'avait pas encore appris à s'en servir ! C'était l'un des premiers SCR-270.



SCR 268 (Army Signal Corps, 1940) sur la base de Signal Hill (Groenland)
US Army s Signal Corps

En Grande Bretagne

C'est plus tardivement que les Anglais se tournent vers le radar. En janvier 1935, le ministère de l'Air crée un « *Comité pour l'Etude Scientifique de la Défense Aérienne* » placé sous la présidence du physicien *H. Tizard* et, à la recherche d'idées nouvelles, consulte un chercheur du National Physical Laboratory *R.A. Watson-Watt* sur les solutions possibles. Watson-Watt n'a qu'une réponse : la « *radio-détection* ».

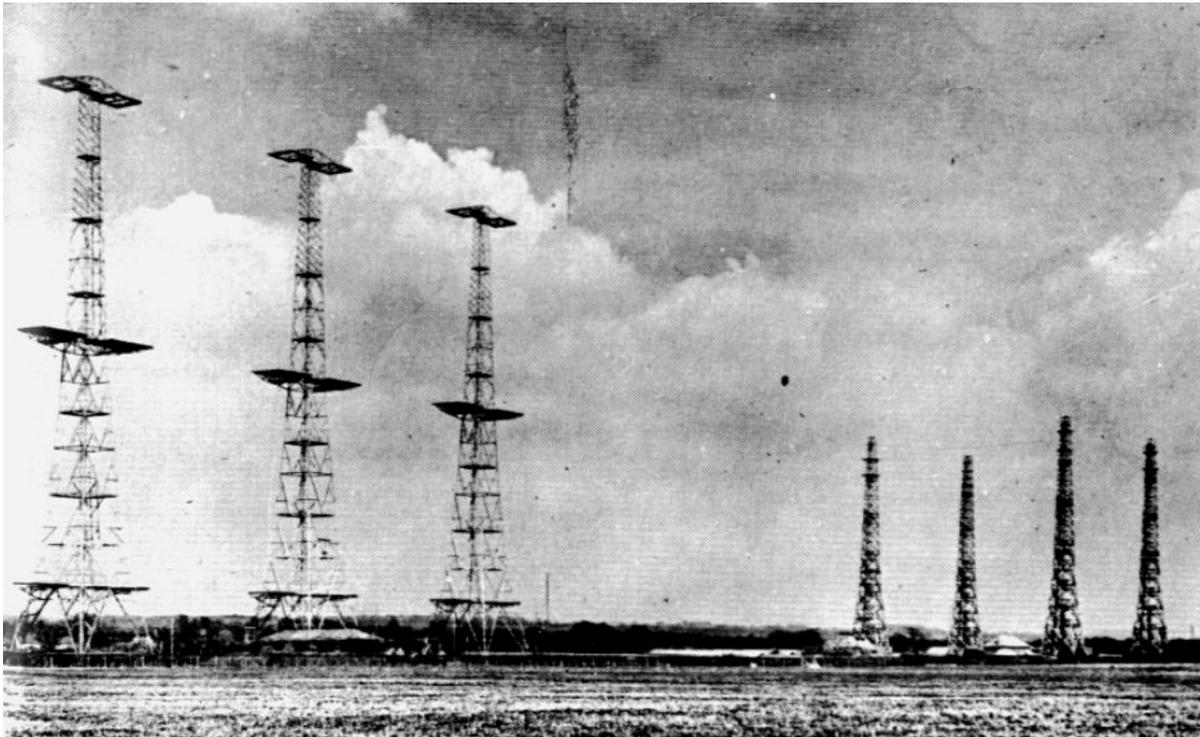
En moins de quinze jours, il précise son projet dans un célèbre *mémoire*, où il retient d'emblée le principe des systèmes à impulsions. Ce n'est pas une nouveauté, puisque cette idée avait déjà été adoptée depuis au moins un an aux USA. Mais en Angleterre, l'urgence de la situation ne permet plus de passer, comme avait pu le faire R. Page, par de longs développements technologiques ; les choix doivent être impérativement fixés en fonction des moyens immédiatement disponibles. On travaillera donc en ondes décimétriques, que l'on sait produire avec des puissances convenables, et on se contentera d'un diagramme de rayonnement aplati en site mais très peu directif en azimut. 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.

Le 26 février 1935, il organise une première expérience de faisabilité, en faisant voler un bombardier dans le champ de l'émetteur de radio transmissions de *Daventry* ($\lambda = 50$ m), pour mettre en évidence des battements qui révèlent la présence de l'avion à 8 miles. C'est assez pour convaincre l'Air Marshal *Sir Hugh Dowding*. Watson-Watt obtient carte blanche (et tous les fonds désirables !) pour créer une équipe de chercheurs qu'il installe sur le site d'Orfordness, dans une péninsule déserte de la côte du Suffolk.

LA NAISSANCE DU RADAR

Fin mai, un premier équipement sur une longueur d'onde de 50 mètres permet déjà de suivre un avion jusqu'à 17 miles. En juillet, avec des impulsions de 75 kW sur une longueur d'onde de 26 m, à partir d'une antenne portée par un mât de 70 pieds de haut, le système porte à 60 km. Et 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.



Station de la Chain Home vue générale (1939)
Impérial War Museum

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 décimétrique oblige, les antennes d'émission sont portées par 4 énormes pylônes de 110 m de haut, soutenant 3 réseaux de 6 à 8 dipôles à polarisation horizontale placés respectivement à des hauteurs de 90 m, 70 m et 30 m.

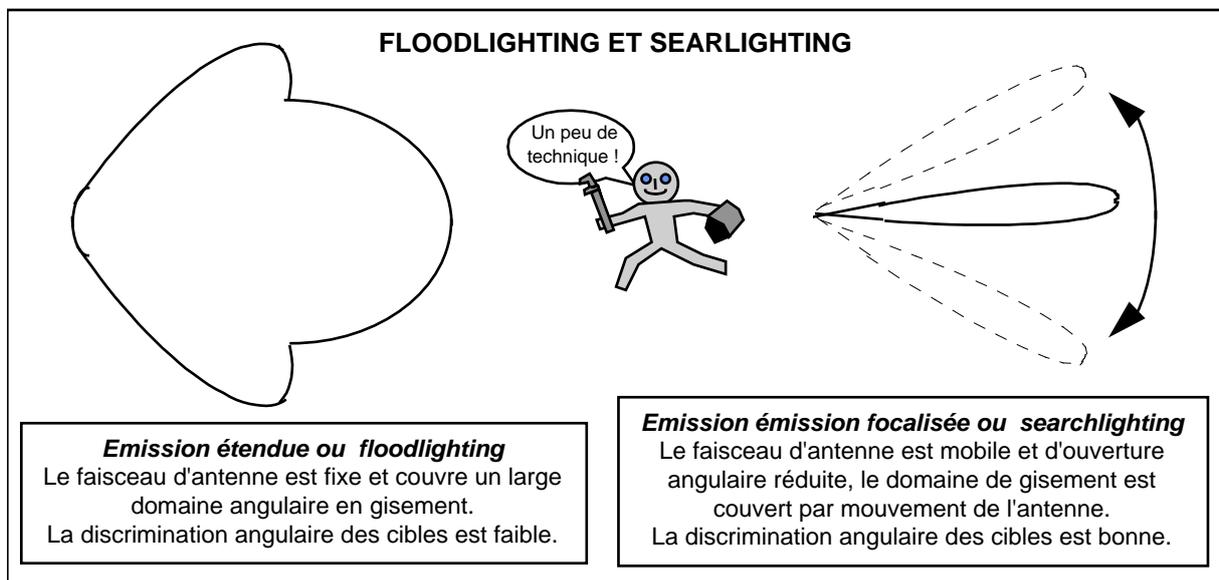
Le premier réseau émet sur deux fréquences ($\lambda = 12$ m et $\lambda = 6$ m), avec une puissance de 350 kW, puis 750 kW crête, une durée d'impulsion variable entre 4 et 45 μ s, et une fréquence de répétition entre 10 et 50 Hz. Le second réseau émet sur deux autres fréquences voisines, le dernier est utilisé en secours aux mêmes fréquences. L'émission, de type « *floodlighting* », couvre un secteur d'environ 60 degrés en gisement.

La réception se fait sur 4 pylônes de 75 mètres, éloignés des précédents de quelques centaines de mètres, et entièrement en bois pour ne pas perturber le champ reçu. 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.

LA NAISSANCE DU RADAR

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 la mesure est affinée par 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 distribuèrent 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 comportait malgré tout des zones d'ombre à basse altitude, qui ne pouvaient être éliminées qu'en montant en fréquence dans la gamme métrique, ce qui conduisit à des modifications de principe importantes : émission focalisée ou « *searchlighting* », entraînant l'usage d'antennes tournantes, au lieu de l'émission étendue ou « *floodlighting* » initiale...

Mais le problème principal était celui de la puissance. Il faut attendre la fin de l'année 1938 pour que les premiers résultats satisfaisants obtenus par les tubistes anglais, permettent le développement d'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. Ces stations bénéficient de l'invention américaine du duplexeur à tube à gaz, et utilisent une antenne tournante d'émission/réception montée au sommet d'un pylône de 56 m, avec le nouveau mode de visualisation type « PPI ». La première station fut installée à Foreness Point dans le Sussex le 1er décembre 1939. Une version mobile appelée « *GL Mark I* » (10 kW, $\lambda = 1,5$ m) sera utilisée en France par le corps expéditionnaire anglais avant l'évacuation de Dunkerque.

Pour les plus courtes distances, on développe encore des stations « *GCI* » (Ground Controlled Interception), qui permettent de diriger avec précision les chasseurs de nuit vers leurs adversaires. Ces radars GCI évolueront en 1942 vers la bande UHF (600 MHz), avec une impressionnante parabole tournante de 10 m de diamètre, éclairée par un dipôle à dépointage

LA NAISSANCE DU RADAR

mécanique assurant au rythme de 10 tours/seconde l'exploration d'une nappe couvrant 8° en site. Enfin il y eut également des *radars maritimes type 79 et 81* à réseaux plans de dipôles fonctionnant respectivement à des fréquences de 40 et 90 MHz.

La seconde innovation anglaise par ordre d'importance après la CH concerne les *radars aéroportés*. Quand Watson-Watt charge de cette question son collaborateur *Edward.G. Bowen* au *centre de recherches de Bawdsey*, à l'automne 1936, il s'agit d'une véritable gageure : comment embarquer dans l'habitacle d'un chasseur l'équivalent d'une installation qui tenait alors dans plusieurs pièces au sol, sans compter ses antennes de 100 m de haut ? Bowen réussit pourtant dès l'été 1937 à faire voler une première maquette sur un *Anson K-6260*.

Il devait s'agir au départ d'un radar d'interception, mais les circonstances le réorientent bientôt vers une autre application. En septembre, sollicité par le Coastal Command, Bowen accepte de tenter la détection de navires de guerre à l'occasion de manœuvres de la Royal Navy. Or le jour choisi, les conditions sont exécrables, au point que la manœuvre est finalement décommandée. Seul Bowen, qui a déjà pris l'air en ignorant l'ordre d'annulation, poursuit sa route en scrutant sur ses écrans des échos qui le conduisent au travers des nuages à la verticale du convoi. A lui seul, il avait débusqué la flotte!

Le premier radar aéroporté anglais est donc 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, l'un au nez de l'avion pour l'émission, et deux autres fixés sous les ailes pour la réception, légèrement dépointés pour mettre en oeuvre un principe analogue au « lobe-switching » américain (commutation alternée des antennes, permettant au pilote de déterminer si la cible se trouve plutôt à droite ou à gauche de sa propre trajectoire). 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, ils deviennent un élément essentiel dans la bataille contre les sous-marins de l'amiral Doenitz. *L'ASV Mark II* devait également être utilisé avec succès lors de l'attaque de nuit de bâtiments italiens à Tarente ou bien encore permettre de retrouver le cuirassé BISMARCK qui avait échappé à la flotte britannique.

De cette première application 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) dont les antennes étaient des réseaux de dipôles ou des antennes « Yagi », un dipôle émetteur sur une aile, deux dipôles récepteurs pour la mesure du gisement à l'avant du fuselage, et deux dipôles pour la mesure du site sur l'autre aile. Ces radars équipèrent les chasseurs de nuit de la RAF à partir de 1940. Mais les réseaux d'antennes externes amenaient de sévères contraintes de manœuvrabilité et étaient peu appréciés des pilotes. Ils ne permettaient en outre qu'une évaluation assez sommaire de la direction des cibles par l'observation de vidéos brutes sur oscilloscopes.

C'est l'utilisation des ondes centimétriques, dont il sera parlé plus loin, où, grâce à l'emploi du magnétron, les anglais allèrent jouer un rôle de pionnier, qui allait rapidement rendre possible l'intégration de l'antenne à l'avion, permettre de véritables mesures angulaires et finalement donner naissance à la famille de radars de conduite de tir que nous connaissons aujourd'hui.

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 d'un

LA NAISSANCE DU RADAR

spécialiste d'acoustique sous-marine du *NVA de Kiel*, le *Dr Kühnhold*. Ses premiers essais lancés début 1933 avec du matériel existant sont relativement décevants, aussi Kühnhold cherche un appui industriel, en suscitant la création de la société *GEMA* en janvier 1934.

Tout au long de 1934, il conduit les premiers essais de faisabilité avec le *Dr Schultes*, principal animateur de la *GEMA*, et obtient en octobre 1934 une portée de 12 km sur un bateau test, 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 mètres (165 MHz, 8 kW crête) atteint en 1936 une portée de 40 km sur bateaux. Il s'agissait jusque là d'applications « marine », mais l'observation fortuite le 24 octobre 1934 d'un avion passant dans le champ d'expérience va réorienter l'objectif vers la défense antiaérienne.

Une deuxième voie est ouverte par le *Dr Wilhelm Runge* de *Telefunken*, dont l'expérience décisive date de l'été 1935. Avec un émetteur de 100 mW sur $\lambda = 50$ cm et 2 antennes posées au sol et pointées verticalement, il détecte un avion à 5000 m d'altitude. Il transforme alors son émetteur pour en tirer des impulsions de 15 watts crête, avec lequel il effectue à l'été 1936 de nouveaux essais sur bateaux (portée 10 km). Ce *premier prototype* de Telefunken, baptisé « *Darmstadt* », est 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 à une altitude de 2000 m, précision distance < 10 m) et un radar de DCA (portée >25 km, précision distance <10 m, mesure site/gisement au 1/16 de degré). Les projets rentrent rapidement en phase de développement.

Pour la veille la *GEMA* fait le choix des longueurs d'onde métriques : $\lambda = 2,4$ m, (125 MHz, 20 kW crête, 2 à 3 μ S), et développe les radars de veille lointaine de la gamme des « *Freyas* » (d'une classe comparable au SCR 270 américain). Dès fin 1936 le premier prototype donne des détections d'avions à 80 km. Les premiers Freyas 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, suivi en 1939 du « *Kurpfalz* ». Mais Lorenz est bientôt écarté des marchés militaires du fait de son appartenance à l'ITT américaine. Le relais est pris par *Telefunken* avec le « *Würzburg A* » en ondes décimétriques ($\lambda = 54$ cm, 560 Mhz, puissance crête 8 kW, antenne parabolique circulaire de 3 m de diamètre, portée sur avion de 30 km). Essayé le 9 avril 1940 devant un panel de généraux de la Luftwaffe, il se révélera un excellent radar de tir antiaérien. Il est à l'origine, comme le Freya pour la veille, de toute une gamme 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 Kamhuber* 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*, issus au départ d'un radio-altimètre conçu par *Runge* à la Telefunken. Le premier avion d'arme opérationnel à être équipé d'un radar de tir aéroporté fut probablement le *Messerschmitt ME 110 G*, dès 1941. Son radar, le *FuG 212 « Lichtenstein »*, émettait en bande métrique, d'où une antenne assez encombrante, pour une portée de l'ordre de 5 km. Il fut produit en plus de 400 exemplaires.

LA NAISSANCE DU RADAR

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



Antenne parabolique du Würzburg-Riese

Musée Radar de Douvres la Délivrande. Collection des auteurs

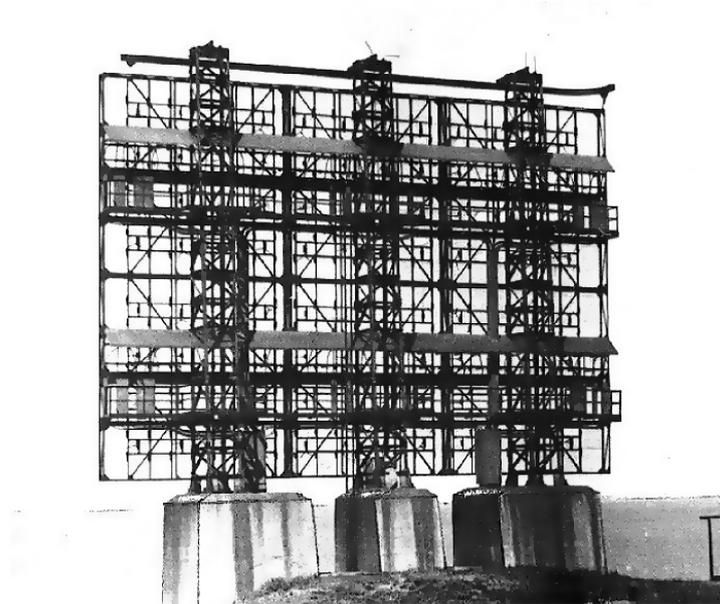
Pendant la guerre, les Allemands sont les premiers à tenter de leurrer les radars, lors de l'opération « *Owezarek / Netzer* » contre la Chain Home dans la nuit du 11 au 12 février 1942. Le **brouillage par bandelettes**, d'abord imaginé par les Allemands sous le nom de code de « *Düppel* », sera utilisé 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**.

Mais dès le déclenchement de la guerre, l'interdiction par le Haut-Commandement de poursuivre toute recherche qui ne déboucherait pas à moins d'un an, cantonne les concepteurs à des adaptations du matériel métrique existant en 1939, avec une nette tendance au « gigantisme », le **Würzburg Riese** (avec une parabole géante de 8 mètres de diamètre) pour Telefunken, la série des **Wassermann L, S et M** ou les **Mammut** pour la GEMA.

Cependant, faute de posséder le magnétron, les Allemands ne prirent pas rapidement le virage des ondes centimétriques. Fin 1941, le **Général Martini**, conscient du retard pris par rapport aux anglo-saxons, s'efforce de susciter un intérêt pour ces longueurs d'onde. Il ne rencontre pas beaucoup d'écho, jusqu'au jour où la découverte d'un « **H2S** » ($\lambda = 9$ cm) dans un bombardier anglais abattu à Rotterdam (3 février 1943) produit un grand effet de choc. Il crée alors la « **Communauté de Travail Rotterdam** », sous la direction de l'ingénieur **Leo Brandt**, avec pour première priorité de reconstituer un magnétron et de remettre le H2S en état de fonctionner. Les Allemands surent ainsi reconstituer en moins de six mois un radar à magnétron qui fit son premier vol le 22 juin 1943.

LA NAISSANCE DU RADAR

Le plan de travail de Brandt conduira au développement de plusieurs radars centimétriques, en particulier : le « *Berlin A* », réplique allemande du « H2S », le radar de veille panoramique « *FuMG 74 Kulmbach* » et le radar de poursuite « *FuMG 76 Marbach* », associés dans le système de conduite de tir de DCA « *Egerland* ». Mais il est trop tard... tout est dispersé en 1945, hommes et moyens.



Radar géant MAMMUT, antenne réseau à balayage électronique (1941)
Production GEMA

La Russie et les autres pays

La **Russie** pour sa part, où 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 ;
- le **STRELETS**, fonctionnant à une longueur d'ondes de 80 centimètres (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 mètres, 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 portée 30 kilomètres existait en 1939 ;
- au **Japon**, où malgré les travaux sur le *radar doppler* de **H. Yagi** en 1936 et sur le *magnétron en ondes centimétriques*, les réalisations ne démarrèrent concrètement qu'à partir de 1942.

L'éclosion du radar en France

En France, les recherches sur le radar se poursuivirent après les premières expérimentations de **P. David** et **R. Mesny** en 1928. Elles furent animées par **Pierre David** dans le domaine militaire et, dans le domaine civil, par **Maurice Ponte** et **Henri Gutton** également connu pour ses travaux sur le magnétron.

LA NAISSANCE DU RADAR

Cependant, jusqu'en 1939, les moyens mis en œuvre resteront limités. On peut ainsi retenir deux périodes.

Des pionniers français à 1939

En 1934, *Pierre David*, au *Laboratoire National de Radioélectricité*, obtint des crédits pour expérimenter 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. Le passage d'un avion au-dessus de ce barrage se révélait au casque par un battement Doppler entre le trajet direct entre les deux antennes et le trajet réfléchi par la cible. Des détections d'avions sont obtenues jusqu'à des distances de 10 km, et un plafond de 7000 mètres.

A la même époque la seconde initiative vint, non pas d'un laboratoire étatique, mais de la *CSF-SFR*, société de construction de matériel radio créée en 1920 par *Emile Girardeau*, et dotée d'un laboratoire de recherche dirigé par *Maurice Ponte*. *Henri Gutton*, entré au laboratoire en 1932, 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. Le 20 juillet 1934 il dépose le brevet d'un « nouveau système de repérage d'obstacles et ses applications », qui fonctionne sur le principe du « *radar continu monostatique à deux antennes proches* » principe voisin de celui de Pierre David, mais avec une disposition différente des antennes et sur une fréquence nettement plus élevée. Ces travaux conduisirent à la réalisation d'un « *détecteur d'obstacles* » en onde continues, 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.



Henri GUTTON près du radar de détection du Normandie. En arrière plan les quais de NEWYORK
Gracieuse autorisation de THALES

C'est l'origine du « *radar du Normandie* », dont la photo dans les docks de New York est célèbre, bien que ses résultats immédiats aient été assez décevants : en onde continue, le trajet direct et les échos multiples sur les superstructures et la mer masquaient souvent le signal utile. Il fallait en revenir au principe de Langevin, c'est à dire à un système à impulsions, pour lequel H. Gutton dépose un nouveau brevet le 29 janvier 1936.

Les nouveaux essais du « *système à impulsions* » sont conduits au Havre en juillet 1938 à partir d'une station à terre en vue directe de l'estuaire de la Seine.

LA NAISSANCE DU RADAR

Des impulsions de 6 μ s à $\lambda = 16$ cm (1900 MHz), sont émises avec une puissance de 10 W crête par un magnétron M16 placé au foyer d'un miroir parabolique de 1 mètre de diamètre. Une parabole identique à la réception focalise les échos sur un récepteur superhétérodyne, qui les transpose en gamme audible. Ce matériel, qui détecte des navires jusqu'à 10 km, est véritablement le *premier radar centimétrique à impulsions au monde*. Ce dispositif 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*. En effet, les résultats des essais du Bourget et de ceux qui suivront incitèrent l'Armée de l'Air à commander 30 dispositifs (avec émetteurs de 300 W à $\lambda = 5$ m), qui seront livrés au printemps 1939. De son côté la Marine décida d'en équiper les abords de Brest et de Toulon. Les « *Barrages David* » deviennent les premiers systèmes français opérationnels de Détection Electromagnétique.

Un effort accéléré à l'approche et au début de la guerre

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.

Citons seulement le plus remarquable : en février 1940 les laboratoires *LMT* installent dans l'île de *Port Cros* au large de Toulon, un *radar métrique de très grande puissance*, fonctionnant à 6 mètres de longueur d'ondes (48 MHz, 350 kW crêtes, 10 et 25 μ s de durée d'impulsion, 50, 250 ou 1250 Hz de fréquence de répétition), réalisé par *A. Clavier* à partir d'un émetteur conçu à l'origine pour l'émetteur de télévision de la tour Eiffel.

Son étage de puissance est constitué de deux tubes à refroidissement par eau conçus par *G. Chevigny*, avec un filament spécialement étudié pour fonctionner en impulsions. L'antenne d'émission est constituée par un réseau de dipôles supporté par un mat non haubané, l'antenne de réception en est éloignée d'environ 200 mètres.

Cet ensemble, installé sur un promontoire à environ 200 mètres au dessus du niveau de la mer, fut le premier véritable radar de surveillance aérienne de conception française. Dès les premiers essais, la portée sur avions dépasse largement les 130 km, limite de l'échelle de l'oscillographe utilisé pour la visualisation des échos.

Au moment de la déclaration de guerre, la France dispose ainsi pour la surveillance antiaérienne d'une panoplie de matériels d'origines diverses, qu'on peut résumer de la façon suivante.

La Marine a installé des « *Barrages David* » aux abords de Cherbourg, Brest, Toulon et Bizerte.

LA NAISSANCE DU RADAR

De son côté *l'Armée de l'Air* a créé une « *Compagnie de Détection Electromagnétique* », chargée de déployer un « *Barrage David* » continu de la frontière belge aux Alpes, pour lequel elle dispose des 30 stations commandées en 1938. Mais elle n'aura pas le temps d'assurer ce déploiement. Lors de l'invasion allemande, elle se replie à Cavaillon, où elle installe un seul barrage couvrant sur environ 150 km les approches nord de Marseille. Il ne s'avérera pas dans la suite d'une grande utilité.

Dans la *filière décimétrique*, la *SFR* n'a pas disposé du temps qui aurait été nécessaire pour porter le magnétron à une puissance qui aurait permis de détecter des avions, malgré les progrès décisifs obtenus par *Henri Gutton*. Après des essais au Havre, la Marine a expérimenté à Brest en août 1939 un « *télémetre décimétrique* » : ces essais ne seront pas poursuivis.

Puis l'effort principal a été reporté sur les *radars métriques à impulsions*, que la Marine a installés aux abords de Toulon et à Bizerte en Tunisie. En région parisienne, deux radars métriques sont installés à Sannois et à Châtillon. Enfin, en complément de ces matériels, l'Armée de l'Air a installé au Rove, près de Marseille, une station mobile « GM » fournie par les anglais en début d'année.

Malgré leur insuffisance criante, ces matériels démontreront leur efficacité opérationnelle lors de l'offensive de juin 40, en détectant des attaques aériennes contre Paris le 2 juin, en Tunisie contre Bizerte le 10, et surtout à Toulon : dans la nuit du 12 au 13 juin, des attaques italiennes sont détectées par la station de Port-Cros avec un préavis de 120 km, et les Italiens perdent 38 appareils dans l'opération.

La situation sous l'occupation, l'équipement DEM de la Flotte

L'avancée allemande vient interrompre brutalement cette phase d'équipement et d'expérimentations, et l'essentiel du matériel est dispersé ou détruit. Les laboratoires se cantonnent dans une activité d'études, certains s'installant en Zone Libre dans la région lyonnaise : ils y bénéficient du soutien de fonctionnaires patriotes, tels le *Commandant Labat*, ancien organisateur des essais de David, devenu chef d'un service clandestin d'écoute au profit de la Résistance. Arrêté par la Gestapo le 30 mars 1944, il le paiera de sa vie.

Pendant ce temps la Marine, en vertu des accords d'armistice qui autorisent, pour un temps !... le maintien en activité de la Flotte basée à Toulon et outre-mer, se préoccupe désormais 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 depuis l'armistice. Le *capitaine de frégate Agenet* réinstalle à son bord l'un des *matériels SADIR* fonctionnant en 1,2 mètre de longueur d'onde (250 Mhz, 15 kW crête), ramenés de Bizerte, avec lequel il obtient rapidement des portées intéressantes : 80 km sur avion à site élevé, 50 km à site moyen, 20 km sur croiseur. Suivent le « *Strasbourg* » en janvier 1942, puis « *l'Algérie* » en avril. Avec un *radar LMT* de 50 kW de puissance crête, plus du triple des précédents, sur $\lambda = 2$ m, les résultats progressent à nouveau, des avions sont détectés à 110 km, des navires à 25 km. Un dispositif de télémétrie sur échelle fine permet d'obtenir une précision de 25 m pour les distances inférieures à 30 km.

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

LA NAISSANCE DU RADAR



L'antenne radar du Colbert (sabordage de Toulon, 27 novembre 1942)
Photo ECPA

L'histoire particulière du magnétron et la naissance des radars centimétriques

Les échanges franco - anglais

Au centre de cette histoire du radar, l'histoire du magnétron revêt une importance particulière. Son début se situe à partir de 1924, avec les travaux de **A.W. Hull** (USA), **A. Zacec** (Prague), **E. Habann** (Gênes) et **K. Okabe** (Japon). En France la **SFR** (Société Française Radioélectrique) avec **H. Gutton** et **S. Berline**, produisait dès 1932 des magnétrons continus de faible puissance (10 W) fonctionnant à 80 centimètres de longueur d'onde, tandis qu'en Europe et aux USA de nombreux travaux se poursuivaient.

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**, selon l'idée brevetée par **Samuel** (laboratoire Bell) en 1934. Dans ce tube, les circuits oscillants sont remplacés par des cavités cylindriques directement creusées dans l'anneau de cuivre épais constituant l'anode. Les oscillations sont entretenues par interaction avec le mouvement circulaire très rapide du faisceau d'électrons.
Un premier prototype à 6 cavités fournit, en février 1940, 400 watts continus sur une longueur d'onde de 9,9 cm, puissance considérable par rapport aux expériences antérieures. Les recherches sont alors poursuivies par **E. Megaw** à la **GEC** (General Electric Company) à Wembley.
- En **France**, parallèlement, **H. Gutton** et **S. Berline** étudièrent une **cathode à oxyde**, permettant d'obtenir des courants très élevés, et en l'introduisant dans la structure à segments imbriqués du magnétron M-16, aboutirent dès 1940 à des puissances de crête de 500 W puis 4 kW.

LA NAISSANCE DU RADAR

A défaut de pouvoir exploiter eux mêmes 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 (le **SFR M16**) 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, au-delà de tous les espoirs, 10 kW crête sur 10 cm. Trois mois plus tard, il atteignait une centaine de kilowatts ! On peut dire que dès lors, le principal problème du radar centimétrique, celui de l'émission de puissance, était virtuellement résolu, les radars entraient dans le domaine des « **hyperfréquences** ».



Le magnétron SFR M16 à cathode à oxyde (juin 1940)
Gracieuse autorisation de THALES

Les échanges Angleterre - USA. La mission Tizard

Les échanges de technologie entre alliés n'en restent pas là. 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. Le promoteur le plus convaincu en est **Sir Henri Tizard**, qui propose d'échanger les récentes découvertes anglaises, jusqu'aux plus secrètes, contre une participation du potentiel de production américain à leur effort de guerre. L'idée est acceptée par **Churchill** en juillet 1940, et une **mission** d'échange d'informations conduite par Tizard, se rend à Washington au début du mois de septembre. Son interlocuteur aux US est le **National Defense Research Committee** qui vient d'être créé.

Par la complémentarité qu'ils révèlent, les échanges dans le domaine du centimétrique s'avèrent particulièrement fructueux. Les USA bénéficiaient d'une certaine avance dans la technologie des récepteurs à klystrons, et maîtrisaient bien l'utilisation des guides d'ondes et des cornets. Mais les Anglais apportaient l'élément essentiel absent de la panoplie américaine, le magnétron à cavités et à cathode à oxydes.

A la première réaction d'incrédulité des spécialistes **Samuel** et **Pierce**, découvrant un tube capable de produire 6 kW crête sur 10 cm (soit près de 1000 fois ce qu'eux - mêmes savaient obtenir !), succéda la décision rapide de se lancer dans sa fabrication de série. En quelques semaines, trente copies furent réalisées.

LA NAISSANCE DU RADAR

C'était le début d'une production qui allait atteindre durant les années de guerre le million d'unités, grâce à la mise en commun des moyens de production des USA et du Canada. Il s'agit évidemment d'un atout fondamental, dont seuls disposent pour l'heure les Anglais et les Américains. Ils décident de le faire fructifier en structurant et en harmonisant la suite de leurs recherches et de leurs développements.

Le TRE et le Radiation Laboratory

En Grande Bretagne, les études sur le radar centimétrique, entamées dès l'automne 1939 à l'université de Birmingham par le *Pr. Oliphant*, ont été regroupées à partir de l'été 1940 dans un laboratoire spécialement créé dans ce but, le « *Telecommunications Research Establishment* ». Le *TRE* est d'abord installé à Swanage sur la côte du Dorset, puis transféré en mai 1942, dans la crainte d'un débarquement possible, au Malvern College près de Worcester. Ce laboratoire regroupa pendant cette période près de trois mille personnes. C'est toujours aujourd'hui l'un des centres de recherches les plus actifs en matière de radars modernes.

Aux Etats-Unis, le « *Comité Micro-ondes* » du *NDRC*, présidé par *A.Loomis*, décide bientôt la création d'un nouveau laboratoire de recherche, consacré à l'étude du radar centimétrique à usage militaire. Le « *Radiation Laboratory* » installé à *Cambridge* sera organisé sous responsabilité civile et en association avec le « *Massachusetts Institute of Technology* » de Boston.

Une pléiade de scientifiques éminents, dont allaient bientôt émerger cinq ou six lauréats du prix Nobel, se lance sur trois premiers projets, arrêtés d'un commun accord avec les anglais de la mission Tizard : un « *radar aéroporté d'interception* », un « *radar de conduite de tir anti-aérien* » et un « *système de radionavigation* ».

Il en résultera rapidement, une large panoplie de radars d'interception, le radar de conduite de tir « *SCR 584* », et le « *système LORAN* » (Long Range Navigation). A la fin de la guerre, plus de quatre mille personnes étaient en activité au Radiation Laboratory, et furent à l'origine du développement de plus de 150 radars différents.

Les développements anglais

Au *TRE* anglais, différents types de radar fonctionnant autour de 10 centimètres sont mis au point, dont le *modèle 271* essayé en mars 1941 et mis en service en septembre par la *Royal Navy* et le *radar sol de guidage de tir* « *GL Mark 3* » mis en service à l'été 1942.

Mais 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 d'un radar de détection de sous-marins, « *l'ASV Mark 3* » (50 kW, 10 cm), de conception semblable au *H2S*, et de performances très supérieures à *l'ASV Mark 2* à ondes métriques utilisé jusqu'alors, mais que les allemands avaient appris à repérer par un détecteur de radar « *Metox* ». Sa puissance sera portée en 1944 à 200 kW, sous l'appellation « *ASV Mark 6* ». Grâce à l'emploi de ces matériels, on compta à partir de 1943 presque un sous marin allemand détruit par jour.

LA NAISSANCE DU RADAR

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

La mise en service de ces radars centimétriques fut délibérément retardée par les militaires britanniques, qui voulaient éviter aussi longtemps que possible de révéler aux spécialistes allemands l'état d'avancement des nouvelles techniques centimétriques. Les risques en effet étaient très grands, puisqu'un premier exemplaire du « H2S » sera récupéré par les Allemands dès le 2 février 1943 sur un bombardier Stirling abattu près de Rotterdam, moins d'une semaine après sa mise en service.

Les développements américains

Aux Etats-Unis, parmi les 150 systèmes développés au Radiation Laboratory, le spécialiste *Merryl I. Skolnik* a proposé d'en retenir trois comme étant les plus importants ou les plus caractéristiques.

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 complémentaires qui étaient encore indispensables sur le SCR 268. Un balayage hélicoïdal permettait une recherche dans un secteur de 20°, avec une portée de 55 km sur bombardier. Le développement débuta au Radiation Laboratory en janvier 1941, la production débuta en avril 1942, et le premier exemplaire fut livré le 15 juin 1943. Son arrivée était particulièrement bienvenue depuis que les Allemands avaient appris à neutraliser le SCR 268. Au total 2000 exemplaires de ce radar très apprécié 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), répond aux besoins du combat aérien de nuit. Avec une puissance de 150 kW dans un faisceau de 10°, une impulsion de 0,75 μ s et une fréquence de répétition de 1575 Hz, il avait une portée de 7 km sur chasseurs et 15 km sur bombardiers, et était doté d'un système de poursuite automatique du but. Il fut opérationnel au printemps 1943 et produit à plusieurs centaines d'exemplaires par *Western Electric*.

Le système le plus original fut probablement le radar à haute résolution « *Eagle AN/APQ-7* » pour bombardement nocturne. Fonctionnant en bande X (9375 MHz soit : $\lambda \sim 3$ cm), il utilisait une antenne cylindro - parabolique de 5 mètres de long produisant un faisceau de 0,4° d'ouverture, éclairée selon un mode tout à fait original par un guide à fentes, fonctionnant en « réseau phasé » pour le pointage d'azimut. Le balayage dans +/- 30°, à la cadence de 1,5 scrutations par seconde, était obtenu par variation mécanique de la largeur du guide, soit un « *balayage électro - mécanique* ». Son étude, sous la responsabilité de *Alvarez* et *Robertson*, commença en novembre 1941 et le premier essai en vol eut lieu en juin 1943. L'arrivée de ce radar fut trop tardive pour participer aux combats européens, mais il participa avec succès à la bataille du Pacifique.

Le principe de cette antenne fut également transposé à d'autres applications, comme le *radar de contrôle d'atterrissage AN/MPN-1* développé à partir de 1945, qui restera en utilisation pendant de très longues années, et qui servira de modèle au premier radar d'atterrissage GCA développé en France par le LRH de *V. Altovsky* à la CFTH

LA NAISSANCE DU RADAR

Le radar à l'issue de la seconde guerre mondiale

La grande maîtrise des applications du radar que les USA et la Grande Bretagne possédaient dès le début de la seconde guerre mondiale, eut une influence notable sur l'évolution du conflit. C'est notamment grâce à la ***Chain Home*** que les Britanniques purent tenir les assauts allemands en échec pendant la bataille d'Angleterre, c'est grâce à l'existence de radars embarqués que les navires alliés, disposant de la détection à distance de ces radars, purent régler à leur avantage de nombreuses batailles navales.

On peut citer notamment :

- la ***bataille de Cape Matapan*** le 28 mars 1941 au détriment des navires italiens,
- le repérage du ***Bismark*** au sortir du détroit du Danemark par le nouveau radar « Type 284 » du ***croiseur anglais Suffolk*** le 23 mai 1941, suivi du coup de grâce donné le 27 mai par les avions torpilleurs anglais guidés par leur « AVS »,
- enfin un épisode célèbre de la guerre du Pacifique, le 11 août 1942, où le ***croiseur américain Boise***, seul face à six navires ennemis, les localisa au radar et les détruisit à distance avant qu'ils aient pu intervenir.

Grâce aux efforts conjugués des Américains et des Britanniques la technique radar évolua, comme on l'a vu, de manière très profonde **entre 1940 et 1945**. Sur la base des principes découverts avant 1940, les radars à impulsions bénéficièrent ainsi 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.

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*** ».

Les développements en France de ces techniques font l'objet de la deuxième partie de cet article

DEUXIEME PARTIE - LE RADAR MODERNE EN FRANCE

Le contexte industriel

On ne peut évoquer l'évolution du radar en France sans souligner d'emblée un paradoxe, qui peut être la question centrale : bien que la France ait été tenue à l'écart par les circonstances du formidable développement du radar consécutif à la guerre, son industrie maîtrisera rapidement ce nouveau domaine pourtant réputé spécifique et difficile, pour se hisser au tout premier rang des producteurs mondiaux, place qu'elle conserve encore de nos jours.

On a vu que quelques pionniers avaient préparé le terrain avant la guerre, exploré des voies originales et, qu'aux approches de la guerre et dans ses premiers mois, un effort accéléré avait permis le développement de premiers matériels opérationnels. Certaines études se sont également poursuivies sous l'occupation dans le secret des laboratoires, mais la France occupée a été tenue à l'écart de toute l'évolution industrielle du radar jusqu'en 1945.

Il n'est donc pas besoin d'un gros effort pour imaginer le handicap dont souffre l'industrie française au sortir de la guerre. Chez les Alliés, le radar a été le principal moteur d'un bouleversement technologique sans précédent. Pendant toute la guerre, des laboratoires tels que *le Radiation Laboratory du MIT* ou les *Bells Labs* ont regroupé des moyens considérables et rassemblé les efforts de plusieurs milliers de chercheurs. Les résultats ont été immédiatement traduits au plan industriel, avec des capacités de production explosant dans un rapport de 1 à 4 en moins de 5 ans ! C'est la même transformation que la France doit maintenant faire subir à son industrie de la "Radio", dans un contexte qui n'est plus celui d'une économie de guerre.

Il est clair *que l'initiation du processus est fortement soutenue, pour ne pas dire conduite, par l'administration*, qui développe une politique volontariste, destinée à redonner à la France la capacité de produire par elle-même tous les nouveaux matériels dont elle a besoin, en particulier dans le domaine de la Défense.

Pour ce qui concerne le Radar, cette politique est mise en pratique par trois Ingénieurs de l'Armement qui vont marquer fortement de leur empreinte cette phase de reconstruction. *Jean-Pierre Bouysonnie*, qui fut à cette époque leur interlocuteur à la CFTH avant de devenir PDG de Thomson-CSF, à lui même souligné :

*" ...la valeur exceptionnelle des ingénieurs généraux **Combaux** (Armée de Terre), **Pénin** (Aéronautique), et **Ragonnet** (Génie Maritime) qui, jeunes ingénieurs en chef, permirent chacun dans leur secteur le développement de l'électronique française. Peu connus du public, ils ont laissé dans la profession le souvenir du talent, du courage et du " bon choix " : têtes pensantes des Armées en matière d'équipements nouveaux, ils repoussèrent l'idée de créer un arsenal d'Etat spécialisé dans la recherche et la fabrication électroniques, et décidèrent sereinement de confier leurs marchés d'études à l'industrie, à contre-courant de bien des idées de l'après-guerre. Nous continuons aujourd'hui à récolter les fruits de la stratégie de Combaux, Pénin et Ragonnet. Je souhaite trouver un jour, dans un manuel d'histoire, le nom de ces pionniers... "*

L'Ingénieur du Génie Maritime *Louis Ragonnet* fut, avec son aîné l'Ingénieur Général du Génie Maritime *Eugène Giboin*, l'un des rares responsables étatiques en position de faire le lien avec les expériences des précurseurs de l'avant guerre. Affecté en 1939 au " Service des Transmissions " du port de Brest, il y avait suivi avec le *Pr. René Mesny* les derniers essais du " télémètre décimétrique " de la CSF. Après l'invasion de juin 40, il fut dirigé sur Toulon, où il fut chargé d'installer les premiers radars des unités de la flotte.

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

En 1944, il est à Casablanca responsable de l'installation des nouveaux équipements radar sur le croiseur " Richelieu ".

C'est donc déjà avec une forte expérience de radariste qu'il est appelé, dès les premiers jours de la libération, à venir diriger au STCAN (Service Technique des Constructions et Armes Navales) le « *bureau CAN/DEM* ».

Il y travaillera pour l'équipement des bâtiments de la Marine en radars de veille surface et aérienne et en radars de conduite de tir, tout en entretenant des contacts fréquents et réguliers avec ses homologues : **Francis Pénin** du STTA (Service Technique des Télécommunications de l'Air) et **Edmond Combaux** de la SEFT (Section d'Etudes et de Fabrication des Télécommunications).

Ce sont ces hommes qui vont mettre en œuvre une politique dont les répercussions sur l'industrie électronique française seront énormes. Certes celle-ci peut s'appuyer encore sur le socle préexistant d'une industrie de la Radio, mais alors que le radar n'existait pratiquement pas avant 1940, c'est maintenant lui qui devient le moteur principal. Ceci modifiera profondément le caractère de l'industrie électronique, en assurant son développement et sa croissance, tout en l'obligeant à se réorganiser très fortement.

L'ambition clairement affichée est de disposer aussi rapidement que possible de matériels français équivalents à ceux que les alliés ont développés pendant la guerre, et si possible meilleurs ! Les ingénieurs et techniciens de l'administration auront à l'origine un rôle de maître d'œuvre dans la conception des stations de détection alliant les radars, leurs moyens d'exploitation et les moyens de communication associés, à partir d'éléments séparés conçus par les industriels.

Au STTA par exemple, associée à la Section d'Etudes Radar (SER), à la Section d'Etudes Télécommunications (SET) et à la Section Production (SP), la Section d'Installation à Terre (SIT) est chargée de l'intégration des stations de défense aérienne et des contrôles locaux d'aérodromes.

Des unités équivalentes existent au Service des Constructions et Armes Navales (STCAN) pour les systèmes de détection embarqués et à la Section d'Etudes et de Fabrication des Télécommunications (SEFT) pour l'équipement des stations terrestres. L'organisation pour les radars aéroportés est différente, l'avionneur jouant le rôle d'intégrateur du système d'armes.

De cette pépinière d'ingénieurs, nombre d'entre eux rejoindront l'industrie dont, parmi tant d'autres, à quatre périodes différentes : **Georges Naday** ex ingénieur SFR, qui après un court passage au STCAN rejoindra la CSF, **Maurice Chabrol** et plus tard **Michel Carpentier** qui rejoindront la Thomson et **Jacques Mijonnet** qui rejoindra l'ESD, pour y mener des carrières les conduisant aux plus hauts niveaux.

Du côté industriel la montée en puissance est rapide. On assiste bientôt à un mouvement de concentration, qui s'organise autour des *deux pôles* :

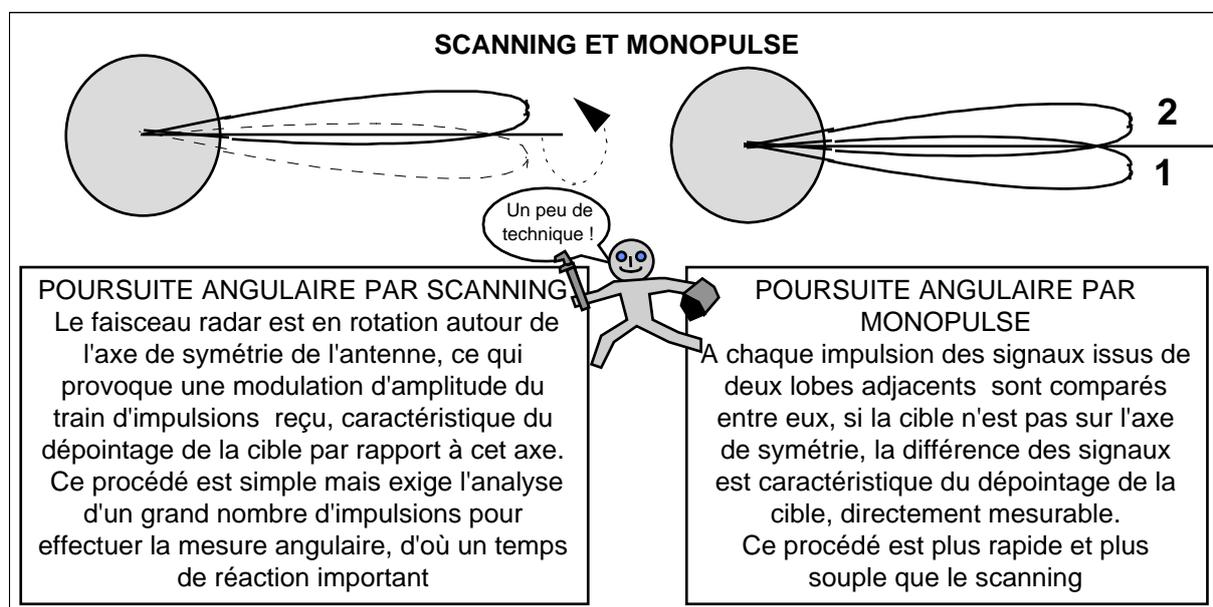
- **CSF**, Compagnie Générale de Télégraphie sans Fil, créée en 1918 et qui absorbera la Société Française de Radioélectricité : SFR en 1957 ;
- **Thomson-Brandt** : héritière de la **CFTH** : Compagnie Française Thomson Houston créée en 1893, toutes deux pionnières de la radiodiffusion, des radiocommunications, et de l'électroacoustique.

Deux autres entreprises ont également tenu un rôle significatif dans l'histoire moderne du radar français :

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

- A son retour des Etats-Unis, E.M. Deloraine reprend la direction du nouveau **Laboratoire Central des Télécommunications**, successeur des Laboratoires LMT. Le LCT sera le pionnier des radars cohérents dès 1949.
- En 1954, l'avionneur Marcel DASSAULT crée l'Electronique Marcel Dassault “ **EMD** ” qui deviendra l'**ESD** puis **Dassault Electronique**, challenger français dans le domaine du radar aéroporté et qui se distinguera également, pour ce qui concerne les applications radar, dans le secteur des autodirecteurs de missiles.

Thomson et CSF suivent pendant vingt ans des démarches nettement différenciées. La **CSF** sous l'égide de **Maurice Ponte** fonde son expansion sur une innovation scientifique et technique permanente, fruit d'un effort de R&D intensive, avec le **Laboratoire Central de Corbeville** qui regroupera à sa plus belle époque près de sept cents personnes dans le domaine. Installé à l'origine dans les nouveaux locaux de CSF rue du Maroc, le “ **Département des Applications Radar** ”, créé en 1950 par **Georges Naday** vient s'installer en 1956 à Malakoff. Un premier succès sera l'obtention en 1958 du contrat du **CYRANO** pour l'équipement du nouvel intercepteur monoplace **Mirage III C** de l'Armée de l'Air.



L'affaire, on le verra plus loin, se présentait dans un contexte de très vive compétition avec l'Electronique Marcel Dassault, qui proposait une solution dérivant d'un radar à « **scanning conique** » équipant déjà les Etendard IV de l'Aéronavale. Avec une équipe très imaginative menée par **Guy Le Parquier**, la CSF l'emporta en réalisant en moins de six mois une maquette qui mettait en œuvre, pour la première fois sur un radar aéroporté, le principe du « **monopulse** », qui sera le point de départ d'une nombreuse famille, vendue sous différentes versions successives à plus de 1000 exemplaires en près de 20 ans.

La **CFTH**, à l'origine fabricant de gros matériels d'équipements électriques, n'avait abordé le domaine de la radio qu'en 1936, après la reprise des Etablissements Kraemer, et n'avait en 1945 aucune expérience de la détection électromagnétique. Quand **Gabriel Boreau** décide de s'engager activement dans la nouvelle industrie du Radar, il se dote d'un **Laboratoire de Recherche en Hyperfréquences (LRH)** dirigé par **Vladimir Altovsky**, mais sa stratégie sera surtout de s'appuyer sur le “ **Principal Agreement** ”, accord ancien passé avec l'américain General Electric qui lui donnait toutes facilités pour en exploiter les brevets sans se préoccuper, à l'inverse de la CSF, de lourds investissements de recherche.

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

Les premiers radars *CFTH* sont donc très largement inspirés de réalisations américaines. La première réalisation du LRH est un radar d'atterrissage sans visibilité, de type *GCA (Ground Control Approach)*, immédiatement retenu pour l'équipement de l'aéroport de Bruxelles. Ce succès conduit au contrat pour le développement d'un radar de "Conduite de Tir d'Artillerie Lourde", sur la base des SCR 584 américains et AA3 MK 7 anglais.



Stations CFTH COTAL
Gracieuse autorisation de THALES

L'affaire *COTAL* qui porte sur un marché de près de 300 unités, va apporter à Thomson une référence internationale, et asseoir définitivement sa place dans l'industrie du radar, particulièrement dans les domaines des *systèmes de tir* (programme HAWK en 1958), des *radars de trajectographie spatiale* (l'*Aquitaine* en 1955 et la famille des radars de poursuite aux noms de provinces françaises), et enfin, après la reprise de la *Radio-Industrie*, des grands radars de surveillance aérienne 3D : les *Palmier* et *ARES* du réseau *NADGE*.

La fusion de Thomson et de CSF interviendra en 1968 à la suite d'un processus de rapprochement qui avait fini par devenir inévitable : Thomson cherche désormais à se dégager de la tutelle américaine, qui certes lui avait fourni les moyens d'une ascension rapide dans le domaine du radar, mais au prix de royalties qui s'alourdissaient maintenant au fur et à mesure de l'expansion du Groupe. Un rapprochement avec CSF lui offre l'opportunité de compenser sa relative faiblesse technologique propre, et de se donner les moyens de son indépendance. De son côté, il est clair que CSF souffre d'une rentabilité compromise par le coût de plus en plus élevé de la recherche. Enfin l'Etat lui-même pousse à la fusion, avec tout le poids de ses arguments budgétaires, dans le but de doter la France d'une entité industrielle capable de rivaliser avec ses concurrentes américaines ou japonaises. La signature d'un protocole de regroupement est annoncée le 13 septembre 1967, et la fusion effective définitivement réalisée en décembre 1968.

Dans les années 70, *Thomson-CSF* poursuit une politique active à l'exportation, notamment au moyen orient avec la vente des systèmes de défense aérienne : *Crotale, puis Shahine et Al Thakeb* en 1975, et au Brésil, avec la mise en place d'un système complet de détection aérienne. En parallèle elle poursuit sa diversification dans le domaine de la communication téléphonique par l'acquisition des filiales françaises du groupe ITT : *Le Matériel Téléphonique LMT* (qui produisait à cette époque les radars de LCT) et *La société française des téléphones Ericsson*.

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

Après sa nationalisation en 1982, *Thomson-CSF*, outre une restructuration en profondeur entamée en 1987, mènera une politique active de croissance, notamment par l'acquisition des activités électroniques du groupe Philips : *TRT* en France, *SIGNAAL* en Hollande et *MLBE* en Belgique, finalisée en 1989. Pour sa part, le *LCT* qui avait poursuivi une voie parallèle, jusqu'à sa nationalisation en 1982, rejoindra à son tour le groupe Thomson-CSF en 1986.



Système d'armes intégré crotale et ses radars
Gracieuse autorisation de THALES

Les années 90 voient la poursuite de l'internationalisation de Thomson-CSF avec notamment, l'acquisition en Grande Bretagne de l'activité de défense de Thorn EMI, devenue *Thomson-Thorn Missile Electronic Limited* en 1995 et la création de *Thomson-CSF North America*.

En octobre 1997, dans le cadre d'une privatisation annoncée en 1996, l'Etat français décide de regrouper les activités électroniques de défense autour de Thomson-CSF, dans le cadre d'un accord plus général passé avec Aérospatiale, Alcatel et Dassault Industrie. **Le nouveau groupe Thomson-CSF, privatisé en juin 1998**, s'enrichit alors des activités de communications militaires d'*Alcatel – Alsthom*, des activités d'électronique professionnelle de *Dassault Electronique* et des activités satellites d'*Aérospatiale* à travers sa filiale *Alcatel Espace*. Ce dispositif sera renforcé en juin 2000 par l'acquisition du groupe britannique *Racal Electronic*, accompagné en septembre 2000 par une réorganisation du groupe autour de trois grands axes d'activité : la défense, l'aérospatial, et les technologies et services de l'information.

Dans le domaine de l'électronique de défense, Thomson-CSF, qui prendra en **décembre 2000** le nom de *Thales*, se présente désormais comme le premier groupe européen et le troisième groupe mondial. Il est organisé par secteurs de produits, les "business groups" :

- systèmes aéroportés ;
- systèmes de défense aérienne et systèmes de missiles ;
- systèmes navals ;
- systèmes de communication ;
- optronique.

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

Cependant, cette internationalisation autour de la Thomson-CSF ne doit pas faire oublier que *le Groupe Thales est aussi l'héritier de tous ceux qui firent l'histoire du radar en France* comme : le Laboratoire National de Radioélectricité, SADIR, SFR, CSF, la Radio Industrie devenue en 1960 la SNERI, le laboratoire LMT, LCT, Dassault Electronique... Quel est cet héritage ? Nous avons déjà évoqué l'apport des pionniers, nous allons maintenant nous attacher au développement du radar après 1945.

Le niveau de départ après 1945, les premiers radars de surface

Les premières productions s'inspireront des principes et de la technologie des "*radars classiques*", décrite dans la *documentation du radar éditée par le MIT*, qui traitait aussi bien des principes que des technologies. Aussi presque tous les "gros" radars produits dans les années 1950, étaient construits sur le même modèle type :

- Un "émetteur", oscillateur de puissance, qui engendrait une suite (ou un train) d'impulsions de courtes durées (quelques microsecondes) et de fortes puissances de crête (quelques centaines de kilowatts à quelques mégawatts), à des cadences régulières (quelques centaines d'émissions par secondes).
- Une "antenne" (ou plusieurs) qui concentrait les ondes émises dans un secteur angulaire approprié de taille relativement réduite, tant à l'émission qu'à la réception, de manière à bien séparer les "cibles" dans l'espace.
- Un "récepteur superhétérodyne" qui amplifiait le signal après l'avoir transposé à une fréquence intermédiaire à l'aide d'un "mélangeur" et le filtrait pour le séparer des bruits parasites avant de "détecter" son enveloppe.
- Une "visualisation" utilisant des oscilloscopes, basée sur le principe du PPI (Plan Position Indicator) pour les radars de veille, dont la fonction était de calculer dans une direction donnée la distance de "l'écho" détecté, en mesurant le temps écoulé entre l'arrivée de cet écho et l'instant d'émission, (l'onde se déplaçant à 300 000 kilomètres par seconde) et d'en délivrer le résultat sous forme d'une image présentée à l'opérateur.
- Une horloge de "synchronisation" donnant la base de temps à l'ensemble.
- Les dispositifs annexes, mais cependant d'une technologie délicate : isolateur d'émission, duplexeur, joint tournant, protections du récepteur..., reliant l'antenne, l'émetteur et le récepteur et leur permettant de cohabiter en remplissant chacun sa fonction.

La finesse de la mesure de la distance était conditionnée par la durée de l'impulsion émise et la précision angulaire par la dimension du secteur angulaire sélectionné par l'antenne.

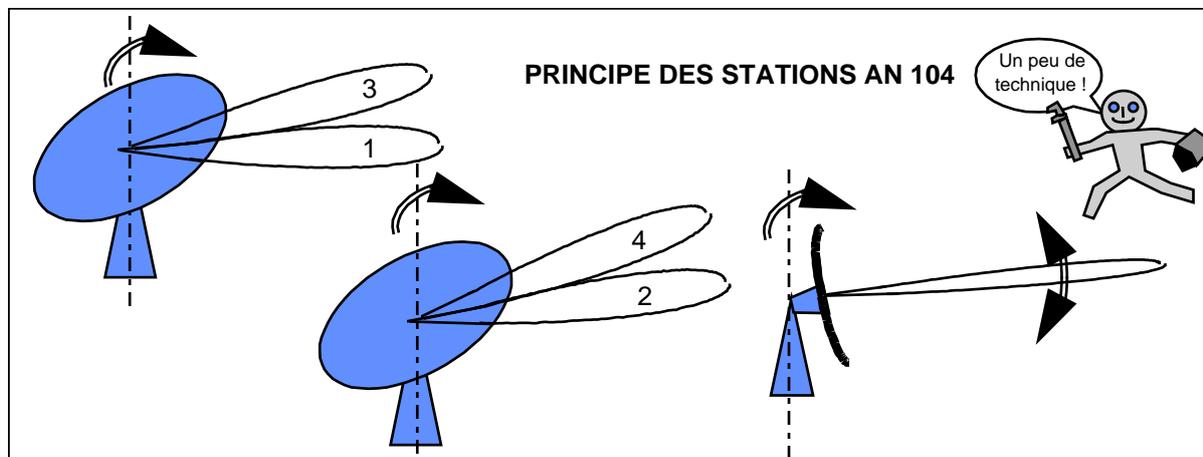
Pour ce qui concerne les "*radars de défense aérienne*", les premières réalisations opérationnelles furent dans les années 50 les *AN 104*, fonctionnant en 10 centimètres de longueur d'onde. Ne maîtrisant pas encore les diagrammes "étaillés" en site la couverture était assurée par deux antennes comportant chacune deux sources primaires pour réaliser au total quatre diagrammes de rayonnement, ou faisceaux, étagés en site.

Chaque antenne était ainsi reliée à deux émetteurs récepteurs CSF *ER 37* (chacun de 1 MW de puissance crête, 4 μ s de durée d'impulsion, 250 Hz de fréquence de répétition). Dans l'ordre des sites croissants la première antenne supportait les diagrammes 1 et 3 et la seconde antenne les diagrammes 2 et 4.

Il fallait bien évidemment que la rotation des deux antennes soit parfaitement synchronisée, ce qui était assuré, non sans quelques difficultés, par des asservissements hydrauliques d'entraînement des deux antennes. En outre une (ou plusieurs) antenne de "sitométrie" à

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

balayage sectoriel en site, tournait en synchronisme avec les deux antennes de veille et mesurait à la volée le site des “cibles” détectées par ces antennes, la corrélation des ces diverses informations étant assurée par la mesure de la distance des objets détectés. On aboutissait ainsi sur la base de trois antennes synchronisées à un système complet de mesure “3 D” de la position des cibles.



Ces antennes furent ensuite remplacées par les *AN 110* du service antenne de la *CSF* dirigé par *Léo Thourel*, fonctionnant également en 10 centimètres de longueur d’onde et utilisant les mêmes émetteurs récepteurs. Une seule antenne *AN 110* remplaçait deux *AN 104*, ce qui résolvait le délicat problème de la synchronisation des rotations. Elle comportait deux diagrammes en site : un diagramme “focalisé” pour la couverture des sites bas et un diagramme “étalé” pour la couverture des sites moyens et hauts. Chaque diagramme était alimenté par deux émetteurs récepteurs, toujours selon le modèle classique, fonctionnant en “diversité de fréquence” de manière à augmenter la portée du radar. Dans ce nouveau dispositif, le site était toujours mesuré par des antennes de sitométrie à balancement, cette fois non synchronisées, mais s’orientant en gisement sur désignation des cibles par le système d’exploitation des informations.

La génération suivante vers 1966, les radars *VULCAIN* (Veille Unilobe bande L pour Contrôle Aérien et Interception), consista uniquement à renforcer la portée de ces radars : choix d’une longueur d’onde de 23 centimètres, utilisation d’une antenne de 100 mètres carrés de surface, couverture dite “cosécantée”, ne comportant qu’un diagramme en site associé à trois émetteurs récepteurs (chacun de 2 MW de puissance crête, 4µs de durée d’impulsion, 250 Hz de fréquence de répétition), fonctionnant en diversité de fréquence.

Pour la mesure du site ces radars furent ensuite associés aux radars *SATRAPE* à balayage électronique en site, enfin le dispositif de détection aérienne fut complété par les radars volumétriques *PALMIER*, sur lesquels nous auront l’occasion de revenir.

Le premier système d’exploitation automatique associé aux radars de défense aérienne fut le “*CESAR*” qui utilisait des calculateurs analogiques. Il fut remplacé au début des années 60 par le “*STRIDA*” à base de calculateurs numériques *IBM France*. Ce dernier subira de nombreuses modifications, tant technologiques que logicielles, mais restera le système d’exploitation des systèmes de défense aérienne français jusqu’à la fin des années 90, lors de la naissance du *SCOA*.

Pour ce qui concerne le *contrôle local des aérodromes CLA* les mêmes technologies ont été tour à tour utilisées. Dans un premier temps ce furent des radars à base d’*ER 37* associés à une antenne à diagramme unique, qui ont été progressivement remplacés par des radars de

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

23 centimètres de longueur d'onde à diversité de fréquence, les *CENTAURE* à partir des années 1970, complétés dans certains sites par des radars *ALADIN*, version armée française du *TIGER*, qui fut le premier radar à compression des impulsions français utilisé de manière opérationnelle.

Au milieu des années 70, les CLA furent dotés de leur propre système d'exploitation automatique : le *STRAP*, relié au *STRIDA*, ce qui permit aux aéronefs militaires d'être sous contrôle automatique, du décollage à l'atterrissage, pendant toute la durée de leur mission.

Comme on peut le voir sur ces exemples, les technologies "classiques" ont su évoluer, notamment dans la course à la "couverture" des radars, elles sont encore utilisées de nos jours, en raison de leur coût de revient peu élevé, le grand progrès étant l'apparition des émetteurs "état solide" à la place des magnétrons.

La maîtrise de la puissance

Les réalisations précédentes ne furent permises que par la maîtrise progressive en France des technologies hyperfréquences, notamment des composants de puissance. La première urgence en 1944/45 a effectivement porté sur l'approvisionnement des composants clés de la chaîne radar, au premier chef les magnétrons d'émission, qu'il faut encore aller se procurer, par des voies très diverses, chez les anglais ou les américains.

La *CSF* bénéficie dans ce domaine de son expérience passée avec la mise au point du magnétron à cathode à oxyde M16, et des études clandestines sur les klystrons de puissance qu'elle avait poursuivies sous l'occupation. Dans cette continuité, un nouveau "*Département Tubes Hyperfréquences*" dirigé par *R. Warnecke* dépasse vite le stade de la simple recopie de composants américains, en développant par lui-même de nombreuses idées originales. Après que *J. Bernier* et *P. Lapostolle* aient établi de manière définitive en 1947 la théorie du *TOP* (Tube à Onde Progressive), *R. Warnecke* développe l'idée d'un "*TPOMI*", amplificateur à onde progressive, qui combine principe et avantages du magnétron et du TPO. Ces tubes (5 KW moyens en bande L) équipèrent des radars de grande portée, notamment les radars de veille des porte avions FOCH et CLEMENCEAU.

Par ailleurs *B. Epsztein* engage l'étude des "*amplificateurs à champs croisés*", qui débouche en 1951 sur le brevet du "*Carcinotron*", connu aux USA sous le nom de "backward oscillator". Cet "oscillateur à onde inverse" (où la propagation de l'onde électromagnétique se fait en sens inverse de celle du faisceau d'électrons) possède une bande d'accord de fréquence beaucoup plus étendue que celle de tous les tubes oscillateurs connus. Il sera utilisé comme "pilote" pour les radars large bande, et surtout comme tube d'émission pour les *brouilleurs de contre-mesures*.

La *CFTH* avait pour sa part une solide expérience des tubes de puissance pour émetteurs de radiodiffusion, et elle sera renforcée dans ce domaine par l'invention du "*Vapotron*", dispositif de refroidissement des tubes de puissance par un liquide en phase vapeur, par *C. Beurtheret* en 1951. En hyperfréquences, les travaux initiés dès 1945 par *V. Altovsky* au *LRH* s'orientent vers les klystrons de puissance. Le "record" est atteint en 1957 par *R. Métivier* avec un "*klystron à quatre cavités*" expérimental le *TH2010* donnant 30 MW crête en bande S, duquel sera dérivé le klystron *TH2011* de 20 MW crête 20 kW moyens, qui fut un élément essentiel de la réussite du radar *PALMIER*, puis le *TV2030* des radars *ARES* du système NADGE (Nato Air Defense Ground Environment).

La course aux puissances crête se calmera après l'adoption de la compression d'impulsion, mais celle de la puissance moyenne continuera. Pour ce qui concerne les klystrons, deux

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

tubes prototypes de klystron à 8 cavités le “*Tératron*”, atteignent, en 1968, 7 MW crête et 200 kW moyens dans une bande de 12%. Ces tubes destinés à un programme de détection spatiale imaginé “avant l’heure” au STTA : le projet COMETE (CONtrôle d’une Menace par Engins à Trajectoire Elliptique), ne seront pas produits en série.



Radars volumétrique de surveillance aérienne PALMIER sous son radome
Gracieuse autorisation de THALES

La course à la puissance moyenne des grands radars de défense aérienne verra l’émergence dans un premier temps des “amplificateurs à champs croisés” ou CFA, d’origine américaine, donnant des puissances allant jusqu’à 10 kW moyens. Mais la relève française sera bientôt assurée par le développement par *Thomson* des *TOP de puissance*, utilisant des lignes à retard à structure métallique dite « en Π », qui atteignaient un même niveau de puissance, avec de meilleures qualités de stabilité du signal émis, et amenaient une simplification de la chaîne d’émission du fait de leur gain plus élevé. Ce furent le TOP 705 (1965), puis les TOP 1304 (1970) et TOP 3666.

En 1977 la Division Radars de Surface demanda à la division Tubes Electroniques de THOMSON-CSF un TOP de forte puissance et à large bande pour le futur radar de défense aérienne *TRS22XX*. Son développement durera 10 ans. La chaîne d’émission constituée de deux TOP, séries *TH26* et *TH36*, constituera un véritable tour de force compte-tenu de son facteur de mérite (produit puissance x bande de fréquence), exceptionnel.

Un autre exploit sera, en 1988, la réalisation, en bande C, de la chaîne d’amplification du radar de trajectographie *ARMOR* composée d’un étage d’entrée état-solide, d’un TOP et d’un *klystron de grande puissance*.

Les TOPs, qui permettaient d’assurer la cohérence de phase requise par le traitement doppler, furent également retenus pour équiper les radars d’avions d’armes modernes dès le début des années 70, avec des niveaux de puissance moindre. Pour ces nouveaux TOPs, Thomson-CSF choisit une structure « à cavités couplées », qui était jusque là une exclusivité des fabricants américains Hughes, Varian et Litton.

Fidèle à sa politique d’indépendance, le constructeur français soutenu par la DRET et le

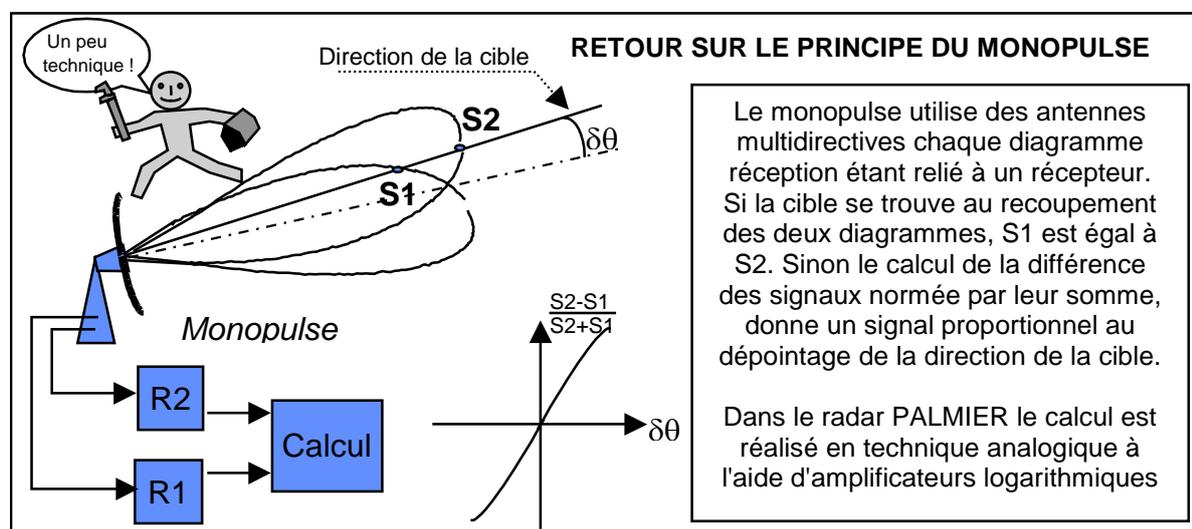
LE RADAR MODERNE EN FRANCE

STTA, développa sa propre technologie pour des tubes destinés aux radars **RDI** et **RDM**. Les contrats de développement furent signés en 1977, et la fabrication débuta en 1983. Plus tard le radar **RDY** nécessita le développement d'un **TOP** « *bi-crête* » spécifique, de puissance crête commutable entre deux niveaux dans un rapport huit.

Parallèlement, des TOPs ont été développés pour des applications aux brouilleurs de contre-mesures, ou pour les télécommunications spatiales. Dans le domaine radar, c'est encore un TOP à cavités couplées qui équipe en 1986 le radar multifonctions ARABEL destiné au Porte-Avions Nucléaire « Charles de Gaulle », tandis qu'à plus faible puissance, la DTE devenue « Thomson Tubes Electroniques » développe le TOP du RBE2 (1994), ainsi que des TOPs bande Ku pour autodirecteurs de missiles.

Les radars volumétriques **PALMIER** et **ARES**

Le radar **PALMIER**, développé par Thomson-CSF vers le milieu des années 65, en partenariat avec la SNERI ancienne Radio-Industrie (contrôlée à 65% par Thomson depuis 1960), réunissait les performances suivantes exceptionnelles pour son époque :



- émetteur agile en fréquence 20 MW crête 20 kW moyens ;
- antenne de 100 mètres carrés à 14 faisceaux étagés (12 pour la version ARES), couvrant les sites de 0 à 40 degrés ;
- traitement “ monopulse d’amplitude ” pour interpoler la position de la cible entre deux faisceaux consécutifs avec une précision de l’ordre de 4 milliradians ;
- ouverture en gisement de 0,6 degrés favorisant l’évitement des brouilleurs éventuels.

L’ensemble constituait le premier radar volumétrique antibrouillé de grande portée :

- mesurant simultanément le site, le gisement et la distance des aéronefs,
- ayant des capacités d’antibrouillage grâce à son agilité de fréquence et à son faisceau étroit en gisement,
- de portée : 450 kilomètres et 100 000 pieds.

Cette avance technologique lui permit de remporter le concours OTAN pour l’équipement des stations de longue portée du NADGE avec la version ARES, produite à près de 30 exemplaires, laquelle fut ultérieurement équipée de la compression des impulsions pour améliorer son pouvoir discriminatoire en distance (mieux que 50 mètres) et ainsi de mieux résister au brouillage par chaffs.

LE RADAR MODERNE EN FRANCE



Radar volumétrique ARES, version NADGE du PALMIER (1965)
Gracieuse autorisation de THALES

Le traitement du doppler

Très tôt, la nécessité de détecter les mobiles dans un milieu “ pollué ” par les échos fixes est apparue comme une performance essentielle. Au début de la seconde guerre mondiale les **Laboratoires LMT**, sous l’impulsion de **Henri Busignies**, chef du Département de Radiogoniométrie, développèrent l’idée d’une “*réduction des échos fixes dans les goniotélémetres*”, objet d’une note déposée en octobre 1940. L’écho d’un objet mobile, mélangé à l’onde émise, produit des «*battements doppler*» qui sont passés dans un filtre pour être séparés des échos fixes : c’est le principe du filtrage doppler que les Américains baptiseront plus tard “*MTI ou Moving Target Indicator*”.

L'EFFET DOPPLER

Si la distance de la cible au radar diminue pendant la durée du signal, le début du signal aura parcouru une distance D_1 , supérieure à celle parcourue par la fin du signal, égale à D_2 sur le schéma.

La queue du signal rattrape ainsi sa tête donc la durée du signal diminue et corrélativement sa fréquence augmente. C'est l'effet doppler.

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

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

Entre-temps les laboratoires LMT ont rejoint les Etats-Unis, c'est ainsi que l'invention française du MTI fera l'objet d'un brevet américain du 5 mars 1941, qui ne sera repris en France qu'après la guerre.

Pour mieux appréhender les progrès réalisés dans le filtrage doppler il faut distinguer trois domaines d'applications de ce traitement, qui ont chacun leur histoire :

- L'amélioration de la détection dans les échos fixes des " grands " radars de veille par les procédés VCM (Visualisation des Cibles Mobiles, équivalent français du procédé MTI : Moving Target Indicator).
- Les radars doppler spécialisés autour de cette fonction, continus ou à impulsions dits " pulse doppler ".
- Les radars doppler aéroportés qui constituent une classe à part et qui seront présentés avec les autres radars aéroportés.

Les VCM

Les échos de reliefs venant occulter la vision des aéronefs dans les radars de veille, des procédés " d'élimination des échos fixes " ont été étudiés, parmi ceux ci les procédés utilisant le doppler ont été désignés sous le vocable " Moving Target Indicator " outre atlantique et " Visualisation des Cibles Mobiles ", en France, par opposition aux simples " éliminateurs " ou " épurateurs " jouant sur l'amplitude et l'étendue des échos de relief.

Les filtres doppler réalisés étaient basés sur l'observation de la dérive de phase d'une impulsion à la suivante dans un train d'impulsions, celle ci étant nulle (ou quasi nulle) pour les échos fixes et liée à l'effet doppler pour les objets mobiles. Divers procédés analogiques ont été mis en oeuvre pour réaliser cette comparaison, tous nécessitaient d'obtenir un retard égal à la période de répétition du radar, de manière, en retardant la première impulsion, à pouvoir la mettre en coïncidence avec la suivante.

Les premières réalisations de *lignes à retard acoustiques* avaient déjà été expérimentées clandestinement sous l'occupation par **Gérard Lehmann** au Laboratoire LMT. Le LCT en fut l'héritier naturel dans les années 50, tandis que d'autres solutions étaient développées tant par Thomson que par CSF. On a vu ainsi réaliser et expérimenter :

- des lignes acoustiques à eau, véritables " piscines " car il faut environ 10 mètres d'eau pour créer un retard d'une milliseconde ;
- des lignes acoustiques à mercure, environ dix fois plus petites, dont LCT était un des promoteurs ;
- des mémorisations des signaux dans des tubes à mémoires (procédé CSF), véritables monuments pesant des centaines de kilos ;
- plus tardivement des lignes métalliques, plus compactes et plus souples d'emploi.

Notamment, en 1949, le STTA passe un contrat au LCT pour réaliser un sous-ensemble récepteur cohérent et élimination par ligne à retard, associé à un radar CSF de veille lointaine.

Le véritable progrès en la matière fut cependant lié à l'utilisation des techniques numériques pour stocker le signal sous une forme contenant l'information doppler. La première réalisation « série » en France, au début des années 60, fut le **VCM à seuil de phase** mis au point par **R. Carré** et **P. Josse** de la **CSF** dans lequel la phase des différentes impulsions était codée puis la variation de phase entre deux impulsions comparée à un seuil, seuls étant autorisés les mobiles ayant franchi ce seuil. Ce matériel simple, à la hauteur des possibilités technologiques du moment, a équipé avec succès tous les radars de veille de l'Armée de l'Air.

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

Sont ensuite apparus, après la fusion entre *Thomson et CSF*, des procédés plus élaborés dit de *filtrage linéaire numérique*, d'abord limités à une élimination renforcée des échos fixes, puis dans les années 70, lorsque la technologie le permit, étendus à la réalisation de véritables filtres de vitesse, assimilables à un " pulse doppler " numérique.

Les radars sols, doppler et pulse doppler

Parallèlement, une démarche était menée de construire des radars spécialisés, de courte portée, organisés autour du traitement doppler. Il s'agissait soit de radars traitant des ondes continues dits " radars doppler ", soit de radars traitant des " trains d'impulsions " ou " radars pulse doppler ", par des procédés à base de filtres de fréquence réalisés en analogique.

Un des acteurs des ces travaux fut le *LCT*, héritier du brevet " MTI " de *Henri Busignies* et des travaux de *Gérard Lehmann*, qui fondèrent la spécialisation de ce laboratoire dans les radars à Elimination d'Echos Fixes. Au delà de la simple suppression d'échos fixes, les essais conduits par *H. Tanter* à partir de 1953 sur les prototypes *DMRT*, révèlent les capacités étonnantes de la signature doppler dans les applications sol : " Ces damnés français parviennent à distinguer une femme d'un homme par la seule traduction doppler de sa démarche ! " s'étonnent les américains à la suite d'essais aux USA en 1957/58. Il en découlera plusieurs familles de radars sol : radar doppler à ondes continues type *RB12 B* et pulse doppler type *RATAC* et *RASIT*, qui connaîtront un très grand succès à l'export.

Le *RATAC* (Radar d'Aide au Tir d'Artillerie de Campagne), est le premier programme militaire franco-allemand, conception et développement par le *LCT* et fabrication (400) par *LMT et SEL* (série en 1966). Les Etats-Unis achètent la licence pour le fabriquer sous l'indicatif TPS 58 en 1970.

Le *RASIT*, version simplifiée du *RATAC*, est fabriqué en série (800 exemplaires) par *LMT et SEL*, après les essais très concluants du prototype *RAPIERE* (1974). Il sera fabriqué par *Thomson-CSF/SDC* jusqu'en 1995, après l'intégration de *LMT* à *TH-CSF* en 1976.

LCT a mené bien d'autres études sur ce thème dont elle avait fait une de ses spécialités, notamment en développant avec succès le prototype de radar MFR « *Diphane 2* » qui allait préfigurer le mode « sites bas » du radar « *Arabel* ».

Par ailleurs, tant à Thomson qu'à CSF et à EMD/ESD des développements de petits radars pulse doppler, pour conduite de tir notamment comme le *RA 20 S* d'*ESD* et *L'OEIL NOIR* de *Thomson-CSF*, ont amené à des réalisations opérationnelles. *L'OEIL NOIR* sera produit à 80 exemplaires et son successeur, à partir de 1977, *L'OEIL VERT* le sera à plus de 100 exemplaires. La généralisation du traitement numérique du signal, entamée dans les années 70, fera rejoindre les deux approches VCM et pulse doppler. Le radar de veille du système d'arme *SHAHINE* sera ainsi, à Thomson-CSF, le premier radar pulse-doppler à traitement numérique composé d'un filtre « *VCM 70 dB* » et d'un filtrage vitesse par « *FFT 16 points* ».

Le codage du signal : compression d'impulsion et corrélation

La *compression d'impulsion*, invention allemande de la guerre (brevet de *E. Huttman le 22 mars 1940*), n'avait pas eu d'application avant la parution en 1950 de l'ouvrage du Britannique *P.M. Woodward*, qui déclencha tant aux USA qu'en France des réflexions qui ont amené à la conception des " radars modernes ".

Aux USA les ingénieurs de la Sperry la proposent dès 1954 pour un radar d'alerte antimissile. En France, le principe suscite très tôt l'intérêt du *STTA* : Service Technique des Télécommunications de l'Air, dirigé par *l'Ingénieur Général Francis Pénin*. C'est dans ses

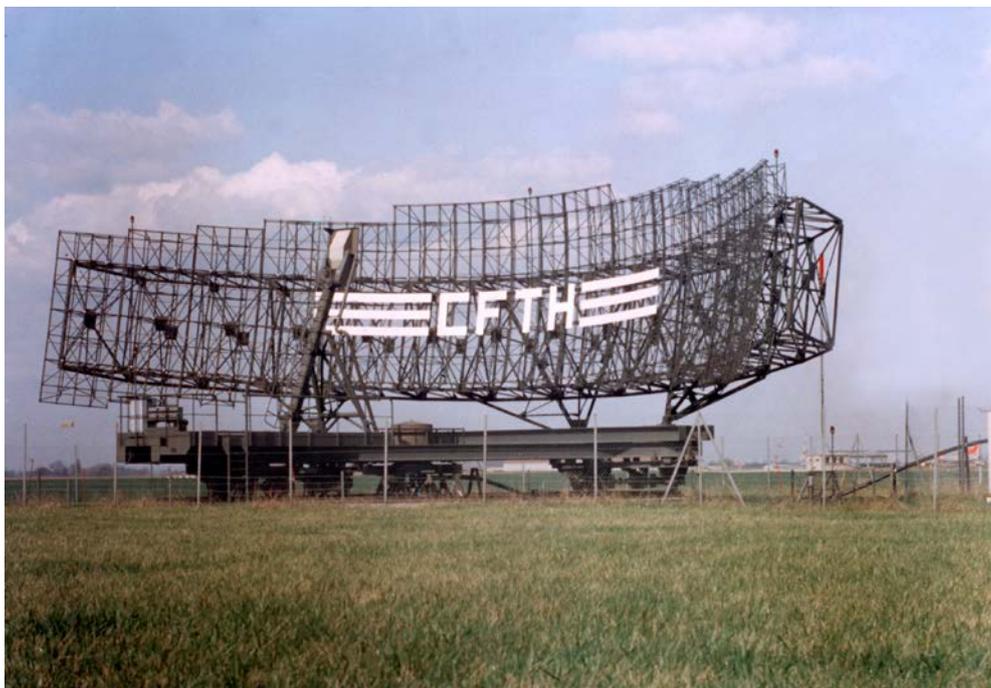
LE RADAR MODERNE EN FRANCE

laboratoires que *Michel Carpentier* et *André Adamsbaum* réalisent en mars 1959 une maquette qui est, après les essais américains, la deuxième réalisation mondiale répertoriée. Ces idées sont repercutées à la Thomson par *Y. Fouché* et à la CSF par *P. Tournois*.

La réalisation d'un premier radar expérimental à compression d'impulsion par modulation linéaire de fréquence, baptisé **CONRAD**, est confiée en 1961 à la **CFTH** : ce radar métrique ($\lambda=70$ cm), avait une puissance crête limitée à 40 KW mais émettait une impulsion de 320 μ s, lui permettant d'être équivalent à un radar classique de 2,5 MW de puissance de crête. Il était doté d'une grande antenne de 25 m d'envergure, montée sur un rail circulaire. Il détecta ainsi des avions jusqu'à des distances supérieures à 500 km.

Pour obtenir une bonne précision en distance, l'impulsion est comprimée de 320 μ s à 5 μ s, soit un rapport de compression de 64. Pour la petite histoire, on peut se souvenir que le filtre de compression était réalisé en technique analogique à base de "circuits discrets" et occupait un volume supérieur au mètre cube !

Un dérivé du CONRAD fût proposé par CFTH lors du remplacement des AN 110. Trop en avance sur son temps il lui fut préféré la solution plus mature des "classiques" radars VULCAINS déjà citée.



Radar expérimental à compression d'impulsion CONRAD sur son site de Brétigny (1962)
Gracieuse autorisation de THALES

Les études se sont néanmoins poursuivies pour améliorer les technologies des filtres de compression des impulsions. D'abord orientées, dans les années 60, sur l'emploi de *lignes acoustiques dispersives à onde de volume* : bandes et fils métalliques avec lesquelles un taux de compression de rapport mille fut réalisé en laboratoire.

Elles ont connu un essor significatif dans les années 70 avec le développement par la division acoustique sous - marine de **THOMSON CAGNES** des *lignes SAW à onde de surface*, issues des recherches de *E. Dieulesaint* et *P. Hartmann*, dont les premiers prototypes ont été obtenus dès 1965. Ces lignes utilisent sur un support en quartz les technologies de la microélectronique, plus tard des *lignes RAC* feront appel à la microgravure sur quartz.

Dès lors tout est possible, des taux de compression supérieurs à mille aux durées de signal

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

comprimé de quelques nanosecondes, et les applications de la compression des impulsions vont se multiplier. Dire qu'avec ces techniques le filtre de compression du CONRAD aurait tenu dans un paquet de cigarettes ! On mesure le chemin parcouru.

Dans le même temps des études étaient menées sur les *radars à corrélation*, autre technique de traitement du signal répondant aux principes énoncés par P.M. Woodward. Au lieu des signaux à modulation linéaire de fréquence de la compression d'impulsion, ces radars émettaient des signaux aléatoires, traités par une corrélation adéquate. Deux études ont été lancées par *Michel H. Carpentier* : une maquette de "*radar à bruit*" confiée à la société *ELECMA*, division électronique de la SNECMA dirigée par *A Adamsbaum*, et une maquette *MACBETH* à modulation pseudo aléatoire de phase réalisée par *Y. Fouché* à la *CFTH*, qui furent expérimentées en 1961, au Centre d'Essais en Vol de Brétigny, parallèlement au CONRAD.

Les puissances de crête ne sont que de quelques watts sur des signaux continus (radar à bruit), ou de durée de quelques millisecondes (MACBETH). Pour la corrélation, on utilise le calcul analogique, d'où une complexité importante ne permettant de traiter que quelques distances de réception en veille, ou amenant à travailler en « mode poursuite ». Mais les résultats sont significatifs, des portées de plusieurs centaines de kilomètres ont été observées. Ces récepteurs à corrélation n'ont pas amené de réalisation "radar" mais on les retrouvera dans leur principe dans d'autres dispositifs : sondes altimétriques et fusées de proximité.

COMPRESSION D'IMPULSION ET CORRELATION

Les deux techniques utilisent un signal long codé, de manière à obtenir un signal court par un traitement adapté.

Dans la **compression d'impulsion** le code choisi est une modulation linéaire de fréquence les fréquences hautes étant, par exemple, émises avant les fréquences basses.

Le "**filtre adapté**" retarde les fréquences hautes par rapport aux fréquences basses de manière à compenser l'avance de ces fréquences hautes.

Il en ressort donc, à quelques défauts près appelés "**lobes secondaires**", un **signal court**, comprimé dans le temps.



Dans la **corrélation** le code choisi est une modulation de la phase du signal sur un certain nombre d'échantillons courts successifs.

Le traitement adapté consiste à faire le produit de chaque échantillon par sa "réplique" pour annuler la modulation, puis à faire la somme tous les résultats obtenus.

Lorsque chaque échantillon rencontre sa réplique les résultats des produits sont tous en phase et la somme très grande. Il suffit d'un **décalage d'un échantillon** pour que les résultats des produits soient "décorrélés", leur somme est alors quelconque et forme des "**lobes secondaires**".

En analogique le dispositif permettant ce calcul est appelé "**corrélateur**". En numérique la construction du calcul se ramène à former un "**filtre adapté**" au signal émis.

Les études sur la corrélation se sont cependant poursuivies dans les années 60 sur des codes prédéterminés de contenu connu a priori, les "*codes pseudo aléatoires*" notamment : codes de Barker, de Gallois, de Franck... qui firent le bonheur des mathématiciens. C'est la grande époque des études d'optimisation de codes sur la base de la "fonction d'ambiguïté", notion introduite et développée en France notamment par *C. Skenderoff*.

Au plan des réalisations remarquables il faut citer les "*corrélateurs optiques*", dont le corrélateur optique sous porteuse en lumière non cohérente : «*MONACO*» de *Thomson* (brevet : *C. Skenderoff - J. Darricau*), qui fut expérimenté en laboratoire en 1966, et le

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

corrélateur optique en lumière cohérente du *RAFAL* seul procédé ayant alors une vitesse de calcul suffisante pour traiter le signal des radars d'imagerie à haute résolution.

La “*corrélation numérique*” apparut au début des années 70, d'abord sur des cas simples compte tenu des vitesses de traitement réalisables. Ce fut le cas en particulier de la voie traitement différée du radar de trajectographie SAVOIE toujours en service sur le bâtiment d'essais Gaspard MONGE. En 1974 elle présentait une double originalité : la compression d'impulsion était réalisée en numérique et en aval du banc de filtres doppler. Puis les applications se sont diversifiées dans les années 80 à 90. Elle présente aujourd'hui une solution alternative pour tout type de filtrage adapté ou de corrélation.

D'ailleurs ne démontre-t-on pas mathématiquement que *corrélation* et *filtre adapté* sont les deux facettes du “*traitement linéaire du signal*” ?

Les premières applications des techniques modernes : TIGER et IGUANE

Le “*radar TIGER*”, on devrait plutôt parler de famille TIGER tant ses versions furent nombreuses, est une synthèse réussie, apparue vers la fin des années 60 des différentes technologies d'émetteur amplificateur, de filtrage doppler linéaire et de compression des impulsions. Le problème à résoudre pour Thomson – CSF était de mettre sur le marché un radar tactique, de mise en œuvre facile, ayant de bonnes qualités de détection à basse altitude et certaines capacités d'antibrouillage.

La nécessité conjointe de pouvoir utiliser l'agilité de fréquence et de réaliser un émetteur récepteur de bonne stabilité compatible d'un VCM de hautes performances, avait conduit au choix d'un émetteur amplificateur (CFA, $\lambda = 10$ cm, 60 kW crête, 800 W moyens durée d'impulsion émise 12 μ s), qui fut dans les différentes versions du TIGER associé à plusieurs générations successives de filtres doppler numériques dérivés du « *VCM45* ». Le besoin d'obtenir une très bonne discrimination distance entraînait l'emploi de la compression d'impulsion de 12 μ s à 0,5 μ s, soit un rapport de compression de 24 obtenu avec une ligne SAW. L'ensemble fut associé à une antenne de 12 mètres carrés qui lui conféra une portée de l'ordre de 120 km en espace libre et de 40 km à basse altitude dans les échos fixes.

De nombreuses versions du TIGER furent produites par Thomson - CSF : le *TIGER S* et sa version française dite *ALADIN*, le *SEA TIGER* sa version marine et le *TIGER G* basé sur la même structure mais travaillant en bande C ($\lambda=5$ cm). La petite histoire parle même d'un projet *GIRAFE*, heureusement resté sur le papier, d'installation d'un réseau de TIGER sur des tours de 600 mètres de haut pour réaliser un système de détection à basse altitude.

Une autre application directe de la compression d'impulsion fut son utilisation sur les *radars de lutte ASM* lors du lancement en 1977, dans le cadre du programme *ATL2*, de la rénovation des radars *DRA2A* des *BREGUET ALISE* et de celle des radars *DRA2B* des *ATLI*.

Le problème posé était celui de la détection des sous - marins, ou du moins de ce qu'ils laissent apercevoir à la surface des océans par mer agitée, donc de séparer les échos utiles du retour de mer. Les “cibles” étant peu mobiles, seule la “*réduction de la cellule de confusion*”, associée à des “*traitements d'intégration tour à tour*” du signal étaient envisageables pour atteindre les performances exigées.

Le radar de surveillance maritime *IGUANE*, réalisé sous la direction de *Jean Genuist*, fit donc appel à une *compression d'impulsion* au taux de 500, de 5 microsecondes de durée émise à 10 nanosecondes de signal comprimé pour aboutir à une résolution métrique, réalisée à l'aide de *lignes SAW*. Ce récepteur est associé à un *émetteur amplificateur* à tube à ondes

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

progressives “*TOP.*” modulé par la grille, pour éviter la lourdeur des modulateurs par la cathode utilisée sur les radars sol. Le pari difficile, tenu pour l’IGUANE, était d’assurer une bonne qualité de la compression des impulsions, ce qui exigeait de maîtriser les rotations de phase de l’émetteur pendant la durée de l’impulsion longue. Un pas décisif était franchi avec ces nouvelles technologies.



Radar IGUANE embarqué sur un BREGUET ATLANTIC
Gracieuse autorisation de THALES

Les radars IGUANE furent produits en 97 exemplaires pour 2 pays à partir de 1980 ; ils donneront lieu à plusieurs dérivés : les *VARAN* et *AGRION* et leur émetteur se retrouvera sur le radar de cartographie *RAPHAEL*.

Enfin, pour accroître ses positions à l’export, Thomson-CSF a développé sur fonds propres à la fin des années 80 un radar plus compact, l’*OCEAN MASTER* dont 35 exemplaires ont déjà été produits pour 4 pays dont le Japon. Une version nouvelle de l’*OCEAN MASTER* développée en coopération devrait équiper très prochainement les hélicoptères NH90.

Les radars d’imagerie à haute résolution (à antenne synthétique)

Une autre application des techniques modernes est celle des radars *RAFAL* puis *RAPHAEL*, qui combinent la compression des impulsions et une utilisation originale du doppler, dite “*antenne synthétique*” ou “*synthetic aperture radar*” : *SAR*, pour réaliser des radars de cartographie à haute définition.

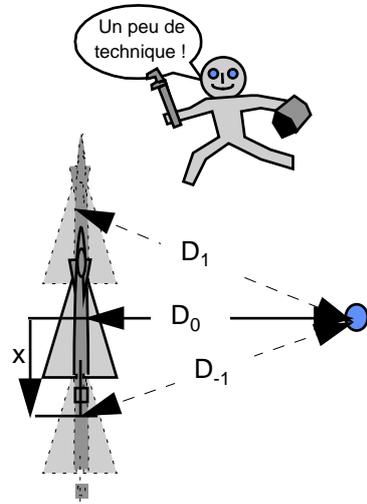
L’idée, apparue vers 1951 aux *Etats-Unis* avec les travaux de *Wiley et Sherwin*, avait été immédiatement classifiée, et Wiley ne sera autorisé à publier son brevet qu’en novembre 1964. Mais aussi bien protégée qu’elle soit, une idée arrivée à maturité finit toujours par transpirer : il semble qu’à la *CSF*, c’est *G. Naday* qui en eut vent le premier, à l’occasion d’un voyage aux Etats-Unis vers 1960. En réalité, il a suffi sans doute de quelques bribes d’explication pour que l’esprit inventif de *G. Le Parquier*, saisi de l’énigme, fasse le reste. Peu de temps après sortait un projet de *RAFAL* (Radar à Faisceau Latéral), affaire jugée très importante à l’époque sur le plan technique, bien qu’elle ne puisse espérer être soutenue par un développement de série.

La compression d’impulsion, nécessaire à la résolution distance, fut réalisée d’abord à base de lignes métalliques puis de lignes SAW. Le traitement du doppler, nécessaire à l’obtention de la résolution transversale, était réalisé par un calcul en temps différé sur des signaux

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

enregistrés pendant le vol. Sa réalisation ne put être possible dans un premier temps, que par l'emploi d'un corrélateur optique en lumière cohérente qui traitait le spectre doppler.

LES "ANTENNES SYNTHÉTIQUES"



Un peu de technique !

Supposons un avion en vol rectiligne observant une **cible fixe** placée latéralement par rapport à la direction du vol. Lorsque l'avion se déplace il voit la cible à différentes distances : $D_{-1} \dots D_0 \dots D_1 \dots$ d'abord décroissantes puis croissantes telles que l'on peut écrire à chaque instant "i": $D_i = D_0 + x^2 / 2.D_0$.

La distance cible avion et donc la **phase du signal reçu** suivent une "**loi parabolique**" dépendant de D_0 et de x , conférant au signal un spectre doppler caractéristique.

" D_0 " est mesuré avec précision grâce à la compression d'impulsion. La mesure de " x " demande l'analyse du spectre doppler, sa loi étant connue à priori le signal reçu peut être traité par corrélation, ce qui permet de **calculer "x"** position latérale de la cible **avec une très grande précision**.

On démontre qu'on a utilisé en fait une antenne fictive liée au déplacement de l'avion pendant la durée de la mesure. D'où l'expression "**d'antenne synthétique**"

Les premiers essais en vol en 1964 donnent de premières images de 10 mètres de résolution, et le traitement optique permet d'approcher une résolution voisine du mètre en 1969. L'image célèbre du pont de Tancarville, où on distingue par exemple l'ombre portée des haubans du pont, est obtenue le 24 juin 1971.



Image haute résolution du pont de Tancarville
Gracieuse autorisation de THALES

Le **RAPHAEL TH**, version militarisée du RAFAL réalisé sous la direction de **Jean Genuist**, est apparu en 1982, il sera longtemps le seul système militaire de ce type conçu en Europe. Radar de cartographie à antenne synthétique, de résolution métrique, il utilisait un émetteur à compression d'impulsion au taux de 500 comme l'IGUANE et un traitement du spectre doppler en temps réel, le signal étant retransmis au sol par télémétrie. Ce traitement faisait appel à une corrélation numérique.

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

C'est alors tout un système, avec radar en nacelle, transmissions de données en temps réel à haut débit, cabine de traitement au sol, qui est constitué et fourni à l'Armée de l'Air française pour l'équipement de ses avions de reconnaissance MIRAGE FI CR ainsi qu'à l'export. La production à partir de 1987 a porté sur 14 nacelles et 5 stations sol.

L'imagerie radar s'est ensuite développée sous la conduite de *Jean Philippe Hardange*. Aujourd'hui elle est à la base de grands projets spatiaux, tels les satellites d'observation terrestre *ERSI*, et l'expérience acquise avec le RAPHAEL est une contribution essentielle à l'adjonction de fonctions d'imagerie aux radars de conduite de tir aéroportés *RDY et RBE2* ou encore aux radars de patrouille maritime *OCEAN MASTER* (imagerie directe SAR ou imagerie inverse utilisant les mouvements de la cible ISAR).

Son application aux radars de cartographie a donné naissance au *SLAR 2000*, héritier du RAPHAEL, au début des années 90.

Les radars héliportés de surveillance du champ de bataille

Les travaux concernant la surveillance du champ de bataille à partir de radars héliportés, dont l'acteur industriel était le *LCT*, ont connu à différentes reprises des vicissitudes qui les amènent à plusieurs reprises près de l'abandon, avant de finalement aboutir.

Le radar *ORPHEE* (Observatoire Radar sur Plate-forme Héliportée), est essayé avec succès en vol à bord d'un Super Frelon (1969), mais la plate forme associée connaît un échec. L'hélicoptère captif *KIEBITZ* de *DORNIER* lui est alors associé et donne naissance (1974), au système *ARGUS*, ORPHEE renaissant de ses cendres. La portée est de 60 km, le traitement des données est réalisé au sol dans un centre de contrôle et de commandement. ARGUS est réalisé en deux exemplaires et fait l'objet d'essais probants à Friedrichshafen, RFA, en 1980.

Mais les Français veulent une portée double. *ORCHIDEE* remplace ARGUS avec l'ambition de porter à plus de 150 km à partir d'un hélicoptère COUGAR d'AEROSPATIALE. En 1986, un démonstrateur fait la preuve de la validité du concept avec un radar ORPHEE modifié. Mais le programme ORCHIDEE sera interrompu en raison de choix budgétaires.

Le démonstrateur *HORUS*, réponse des utilisateurs et réalisateurs d'ORCHIDEE face à l'arrêt du programme, est réalisé pour répondre aux besoins de la Division DAGUET dans le Golfe. Opérationnel pendant l'offensive terrestre en 1993. Il s'attire les félicitations de l'Armée française, mais aussi de la XVIIIème Brigade aéroportée US.

Le programme *HORIZON* est alors lancé à la suite de cette démonstration d'efficacité. Deux systèmes, comprenant chacun deux hélicoptères radar et deux stations sol, seront construits et mis en service en 1997. Ils démontreront leurs performances dans les Balkans, là où l'ambitieux JSTARS US ne voit que les sommets des montagnes.

Les débuts des radars d'avions d'armes

En France, ce n'est qu'avec le lancement en 1952 du programme de « chasseurs nocturnes bombardiers » VAUTOUR de la CNASO (Constructions Nationales Aéronautiques du Sud-Ouest), future composante de Sud - Aviation, puis SNIAS, puis Aérospatiale) que débute réellement l'industrie des radars aéroportés.

Auparavant, les avions d'armes qui avaient marqué le renouveau de l'industrie aéronautique française : les Ouragan, Mystère IV et Super Mystère SMB2 de la GAMM (Générale Aéronautique Marcel Dassault), étaient des chasseurs de jour dépourvus de radar.

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

Il aurait d'ailleurs été difficile d'en implanter un en pointe avant, celle-ci étant alors réservée aux entrées d'air des réacteurs.

Quatre Sociétés cherchaient alors leur place dans le domaine:

- **Les Etablissements René Derveaux**, qui allaient être repris par **COTELEC** en 1958 puis intégrés à la CFTH en 1965 étaient alors en pleine expansion. Ils fabriquaient notamment en série les télémètres équipant les MYSTERE de la GAMM. Une équipe conduite par **Jean Danzac**, sous la direction de **Sylvain Berline**, un ancien de la SFR qui avait participé à l'aventure du premier radar sur le Normandie, avait en charge, sous contrat du STAé, l'ensemble de navigation- bombardement des VAUTOUR et avait mis au point deux prototypes de radars, l'un en millimétrique ($\lambda = 8$ mm), l'autre en centimétrique ($\lambda = 3$ cm)
- **La société SADIR Carpentier**, qui allait être absorbée par CSF en 1958, avait pour sa part une bonne expérience de la production de télémètres pour les avions OURAGAN. Elle avait aussi acquis, dès avant la guerre, une connaissance des radars pour la Marine.
- **La CFTH**, qui avait constitué, à partir de son Laboratoire Hyperfréquences, une équipe de radaristes et s'était établi dès le début des années 50 une solide réputation avec les premiers GCA et surtout les COTAL. Elle entendait bien être présente aussi dans le domaine des radars aéroportés. Elle s'était vue attribuer par le STTA, tout comme CSF, l'étude d'un prototype de radar pour le VAUTOUR.
- **La CSF** enfin, avait constitué sous l'autorité de **Maurice Ponte** à partir du Laboratoire de Recherches Physiques de **Henri Gutton**, son équipe "APPLICATIONS RADARS", dirigée par **Georges Naday**, installée Rue du Maroc à Paris.

C'est l'équipe CSF, qui allait finalement l'emporter sur les VAUTOUR. Elle avait su, en un temps record, alors que la solution CFTH semblait avoir l'avantage, reconfigurer son prototype de la bande S à la bande X et faire à l'Etat Major de l'Armée de l'Air des démonstrations convaincantes. **Bernard Le Tellier** eut alors la responsabilité de l'affaire. Le premier radar allait voler en 1955, ce qui devait conduire, à partir de 1956, à la production de 60 radars des familles **DRAC 25**, puis **DRAC 32**, pour les "VAUTOUR" biplaces.

La famille CYRANO

La " saga " des CYRANO débute en 1958, après le choix du **MIRAGE III** des **Avions Marcel Dassault** comme avions d'armes de l'Armée de l'air française. Ces avions devaient être équipés d'un radar de pointe avant et Marcel Dassault, dont le **département électronique** sous la direction de **Bertrand Daugny** avait conçu un radar aéroporté pour intercepteurs légers le "**Super ALADIN**", mettait en doute la capacité de CSF à produire un radar de ce type.

La CSF décida de relever le défi et promit alors la démonstration au sol dans les six mois d'une maquette de **radar monopulse** compatible avec le MIRAGE IIIC. C'était une première mondiale, les radars concurrents utilisant la **poursuite par scanning** bien moins performante.

G. Le Parquier eut alors pour mission de convaincre une commission étatique de l'intérêt d'une antenne monopulse et d'un calculateur de tir très original... sans donner trop d'informations susceptibles de profiter à la concurrence !

Mais la maquette CSF était encore peu avancée et, aucun risque ne pouvant être couru, c'est la solution classique avec antenne à scanning proposée par Dassault qui fut retenue dans un premier temps.

Fort heureusement, pour CSF, les événements d'Algérie en 1958 " gelèrent " cette première

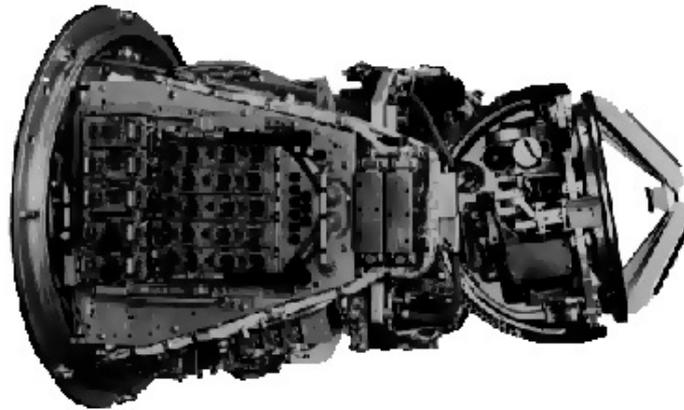
LE RADAR MODERNE EN FRANCE

décision et, à la mi-juillet, il lui était possible de présenter à nouveau sa maquette, qui surprit par ses performances et remit en cause le choix initial.

C'est ainsi que furent passés successivement en octobre 58 et à quinze jours d'intervalle d'abord le marché de série, puis celui de développement et enfin celui d'études du prototype.

Les conditions étaient draconiennes : délai d'un an pour le prototype, de deux pour la présérie et de 27 mois pour le premier de série, avec montée en cadence jusqu'à un radar tous les deux jours ouvrables. Les pénalités étaient doublées en cas de retard.

Trois *prototypes CYRANO I* furent réalisés, pour évaluer le système d'armes, par la suite 8 radars de présérie *CYRANO I bis* furent ajoutés pour assurer cette évaluation. Puis la production fut engagée d'abord avec les *CYRANO I bis* pour *MIRAGE III C* et rapidement après avec les *CYRANO II* pour *MIRAGE III E*.



Radar Cyrano 1 bis du Mirage III C (1958)
Gracieuse autorisation de THALES

Les principales caractéristiques du *CYRANO I bis*, qui fut produit en 223 exemplaires à partir de 1958, sous la direction de **A. Perato**, sont les suivantes :

- Pointe avant pressurisée du fait des hautes tensions (classe 10kV) de l'ensemble émetteur).
- Circuits refroidis par circulation d'eau/glycol (par la suite FHS).
- Antenne monopulse de 36 cm de diamètre orientable en site gisement avec formation de voies par guides sur la partie mobile et 3 joints tournants sur guide.
- Emetteur 300 kW crête (magnétron 4 J 50) en bande " X " ($\lambda = 3\text{cm}$).
- Récepteur de facteur de bruit 9 dB, avec mélangeurs et préamplificateurs sur partie mobile et alimentation par toron mobile "souple".
- Ensemble des traitements comprenant : le récepteur 3 voies, la télémétrie distance, les écartométries et servomécanismes site-gisement, le calculateur d'ordres de navigation avant et après tir, le calculateur de domaine de tir missile.

L'ensemble est à base de tubes subminiatures (6111,6112...) implantés sur 30 "bandes" de trois types (9, 7, ou 5 tubes).

Les évolutions technologiques du *CYRANO II*, qui fut produit en 635 exemplaires à partir de 1964, tiennent surtout au choix d'une antenne " Cassegrain " lui assurant un meilleur rayonnement.

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

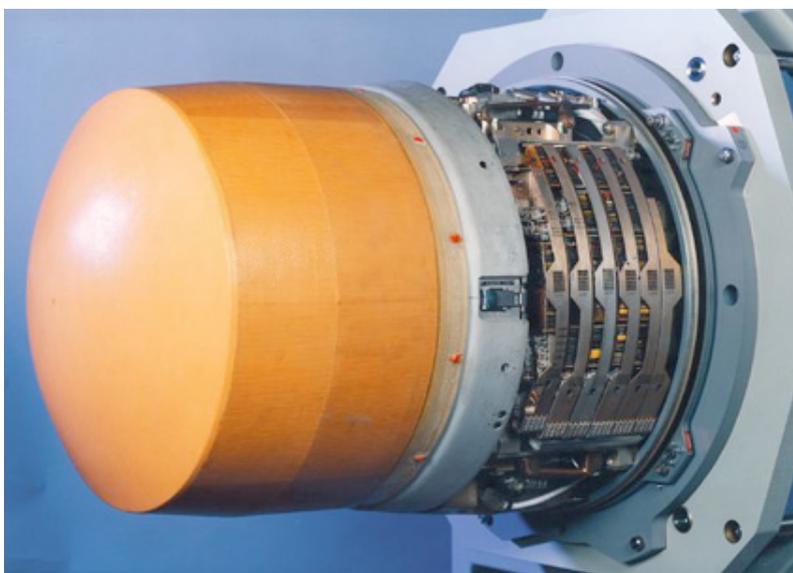
C'est cependant au plan système pour la version *MIRAGE III E*, que cette réalisation fut remarquable pour l'époque, elle permettait de réaliser les *fonctions air-sol* suivantes :

- **Visualisation du sol ou « ground mapping »** : une carte du sol est présentée sur l'indicateur en mode PPI (gisement- distance). Elle est affinée par utilisation des écartométries monopulse. Le pilote est maître du balayage antenne et peut éclairer des zones particulières.
- **Découpe iso-altitude ou « contour mapping »** : seuls sont présentés les échos situés au dessus d'un plan horizontal de garde. Le pilote peut ainsi contourner les obstacles apparaissant sur son écran.
- **Percée aveugle** : la fonction est identique à la précédente, mais le plan de garde n'est plus horizontal mais parallèle au vecteur vitesse avion.
- **Anticollision** : fonction identique, mais le dernier tiers du plan de garde est incurvé vers le haut pour assurer la sécurité.
- **Télémetrie Air Sol** pour tir du missile AS30 : l'antenne est alors fixe dans l'axe avion.

Avec le développement du *MIRAGE F1*, ce fut le tour des *prototypes CYRANO III*, puis des radars de série *CYRANO IV* produits à partir de 1972.

Toujours à base d'un émetteur à magnétron, leur évolution porta sur plusieurs facteurs :

- **Nouvelle antenne** “ Cassegrain inversée ” à très grande mobilité, d'un diamètre porté à 57 centimètres pour améliorer la portée du radar.
- **Transistorisation** des circuits de réception et traitement, avec des montages “ en fagots ” pour réduire le volume occupé par ces circuits.
- **Conception modulaire** des ensembles émission réception, mise en place pour la version modernisée *CYRANO IV M*, et qui a servi de norme pour les développements ultérieurs.



Radars Cyrano IV du Mirage F1 (1972)
Gracieuse autorisation de THALES

850 CYRANO IV et CYRANO IV M furent à leur tour produits tant pour la France que pour l'exportation, qui avait été le moteur de leur développement.

Les radars pulse doppler aéroportés

Les techniques de filtrage doppler sont à leur tour apparues sur les radars aéroportés, poussées par la nécessité de détecter les cibles dans le “ fouillis ” de sol, pour les interceptions à basse altitude.

Des tentatives de visualisation des cibles mobiles menées sur les CYRANO IV, en travaillant sur l'émetteur à magnétron pour améliorer sa stabilité et en utilisant des oscillateurs cohérents pour recopier et mémoriser à chaque récurrence la phase des signaux émis, ne furent pas couronnées de succès malgré les efforts consentis.

C'est encore le besoin de compétitivité à l'export qui amena Thomson - CSF, à se lancer dans le développement de radars pulse doppler aéroportés, actions initiées et animées par **Jean Claude Marchais** et **Philippe Lacomme**, sous la direction de **Henri Poinsard**, qui ont amené le développement et la production à partir de 1983, du radar **RDM** : Radar Doppler Multifonctions.

De conception “ classique ”, à **basse fréquence de répétition** comme les CYRANO, son innovation portait surtout sur le choix d'une chaîne d'émission réception cohérente, basée sur un émetteur à TOP, de puissance crête et moyenne comparables à celles du Cyrano IV, compatible d'un filtrage doppler de bonne qualité. Des résultats intéressants purent alors être obtenus : portée de quelques dizaines de kilomètres dans le fouillis, limitée néanmoins par l'étalement du spectre des échos fixes lié au déplacement de l'avion, propre aux radars aéroportés.

L'aspect système de ce radar avait également été particulièrement étudié, notamment grâce à l'emploi des techniques numériques dans le traitement et l'exploitation du signal, pour développer ses **capacités multicibles multifonctions** : air - air et air - sol, en exploitant au mieux la souplesse de son émetteur à TOP et la mobilité de son antenne Cassegrain inversée.

Les **RDM** rencontrèrent un certain succès, notamment celui d'équiper dès 1985 la première escadre de **MIRAGE 2000** de Dijon, du fait de la non disponibilité des RDI développés pour l'Armée de l'AIR. Il furent produits en 238 exemplaires, principalement pour l'exportation.

Cependant, la performance en détection aéroportée en présence de fouillis de sol passait par le choix des **radars pulse doppler à haute fréquence de répétition**, comme le proposait à l'ESD, **Gérard Thouvenel**. Cependant, bercée par ses succès antérieurs, la France ne mesura pas immédiatement l'avance prise par les Américains dans ce domaine. Aussi c'est sans études ni expérimentations préalables que fut lancé à Thomson CSF, sous contrat STTA, le développement du **RDI** : Radar Doppler à Impulsions, devant utiliser ces principes.

Les sauts technologiques nécessaires pour réussir ce radar concernaient principalement :

- La qualité des lobes secondaires de son antenne, qui conduisit au choix d'une **antenne plate à guide à fentes**, dans lesquelles la difficulté majeure à surmonter était de réaliser l'alimentation de l'antenne émission et la formation des voies monopulse de la manière la plus simple possible, pour préserver la légèreté de l'ensemble et conserver la rapidité des mouvements d'antenne nécessaires aux poursuites multicibles.
- La maîtrise de la **stabilité des signaux** émis et de la **pureté spectrale des oscillateurs** pilotes, nécessaire à la qualité des traitements doppler, et ceci malgré la proximité des circuits de traitement numériques perturbateurs naturels.
- La conception de **filtres doppler** de hautes performances de dynamique suffisante, notamment pour la **réjection du “ fouillis principal ”**, supérieur aux échos utiles d'environ 80 décibels.

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

- La généralisation des *techniques de calcul numérique*, à ce stade en circuits câblés, pour le filtrage vitesse, le traitement du signal et l'exploitation des informations. L'ensemble des traitements numériques demandait quelques centaines de millions d'opérations par seconde.

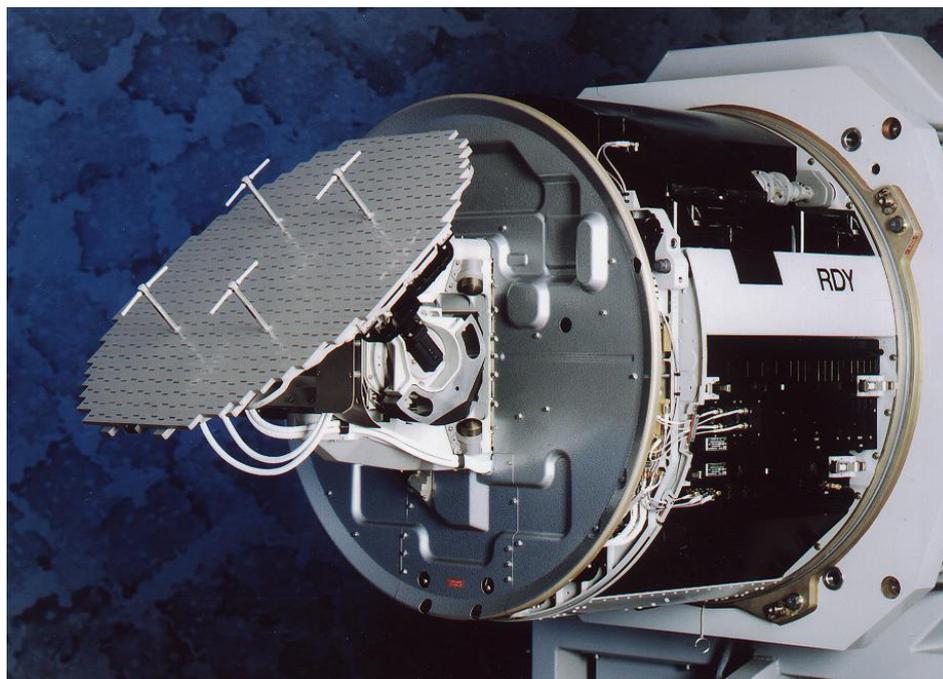
Ces radars ont été produits à 133 exemplaires, à partir de 1986, uniquement pour les besoins de l'Armée de l'Air.

Parallèlement, étaient développés par l'*ESD* : Electronique Serge Dassault les *radars de suivi de terrain ANTILOPE* qui allaient équiper d'abord les *MIRAGE 2000 N* (emport d'armes Nucléaires) puis, ultérieurement les *MIRAGE 2000 D* de pénétration. Ces radars allaient particulièrement contribuer à la maîtrise des chaînes de pilotage sécurisées. Ils furent produits en 188 exemplaires pour les besoins français.

Ces deux affaires étaient étroitement liées car issues d'une compétition lancée dans le cadre du développement du mirage 2000 en 1976, avec deux batailles:

- La première porta sur l'équipement des MIRAGE 2000 N de pénétration nucléaire en radars de suivi de terrain, l'avantage fut à l'ANTILOPE de la société ESD.
- La seconde porta sur l'équipement des MIRAGE 2000 DA de défense aérienne, l'avantage fut au RDI de Thomson – CSF.

Les choses ne s'éclaircissent réellement que lorsque l'ESD, après s'être vu attribuer la maîtrise d'œuvre des radars ANTILOPE pour Mirage 2000 N de pénétration, avec sous-traitance à Thomson - CSF, fut à son tour placé en position de sous-traitant de Thomson CSF sur le RDI.



Antenne à fentes du radar pulse doppler RDY de l'avion MIRAGE 2000-5 et 2000-9 (1992)
Gracieuse autorisation de THALES

Une évolution du RDI, le *RDY* fut à son tour développée par Thomson - CSF pour les besoins de l'exportation. Produit à partir de 1992, il se différencie du RDI par :

- Une évolution de son antenne et de son joint tournant amenant une simplification et un allègement des parties mobiles.
- L'emploi d'un émetteur " bicrête " (puissance moyenne accrue, deux puissances de crête commutables), issu d'une étude financée par la DRET (Direction des Recherches Etudes

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

et Techniques), lui permettant de fonctionner aussi bien en basse fréquence de répétition comme le RDM pour les fonctions air - sol, en haute fréquence de répétition comme le RDI et en moyenne fréquence de répétition, pour les fonctions air - air.

- L'emploi de la compression d'impulsion en mode air - sol basse fréquence de répétition, une première en France pour les radars d'avion d'armes.
- l'évolution du traitement numérique du signal par l'emploi de circuits programmés en technologie microcircuits, lui permettaient d'atteindre les vitesses de calcul nécessaires de plusieurs milliards d'opération par secondes.

Le RDY, est aujourd'hui en production pour les Mirage 2000-5 et 2000-9. Il a ramené la France au meilleur niveau mondial dans le domaine. Plus de 200 RDY ont été produits.

Le balayage électronique

Le balayage électronique dans une dimension

L'avènement des antennes réseau à balayage électronique constitue certainement l'une des mutations les plus significatives qui ont modifié profondément la physionomie des radars modernes.

Ici encore l'idée n'est pas nouvelle. *Les antennes réseau*, ensembles de lignes de sources rayonnantes disposées sur une surface plane, sont de conception ancienne : les panneaux de dipôles des radars métriques de la seconde guerre mondiale, dont le fameux "sommier volant" *XAF* du cuirassé "New York", les réseaux de dipôles des *radars embarqués britanniques type 79 et 81*, les antennes géantes des *Mammut* allemands et celles des *radars métriques français* développés au tout début de l'après-guerre étaient des antennes réseaux.

L'application du *balayage électronique* à ces antennes réseaux fut la conséquence logique de l'impossibilité de faire tourner mécaniquement les structures d'antennes géantes, et cette solution fut adoptée, dès 1942, par les allemands pour le *Mammut*, qui était doté d'un "Kompensator", ensemble de déphaseurs qui assurait un balayage du faisceau dans une ouverture en gisement de +/- 50° .

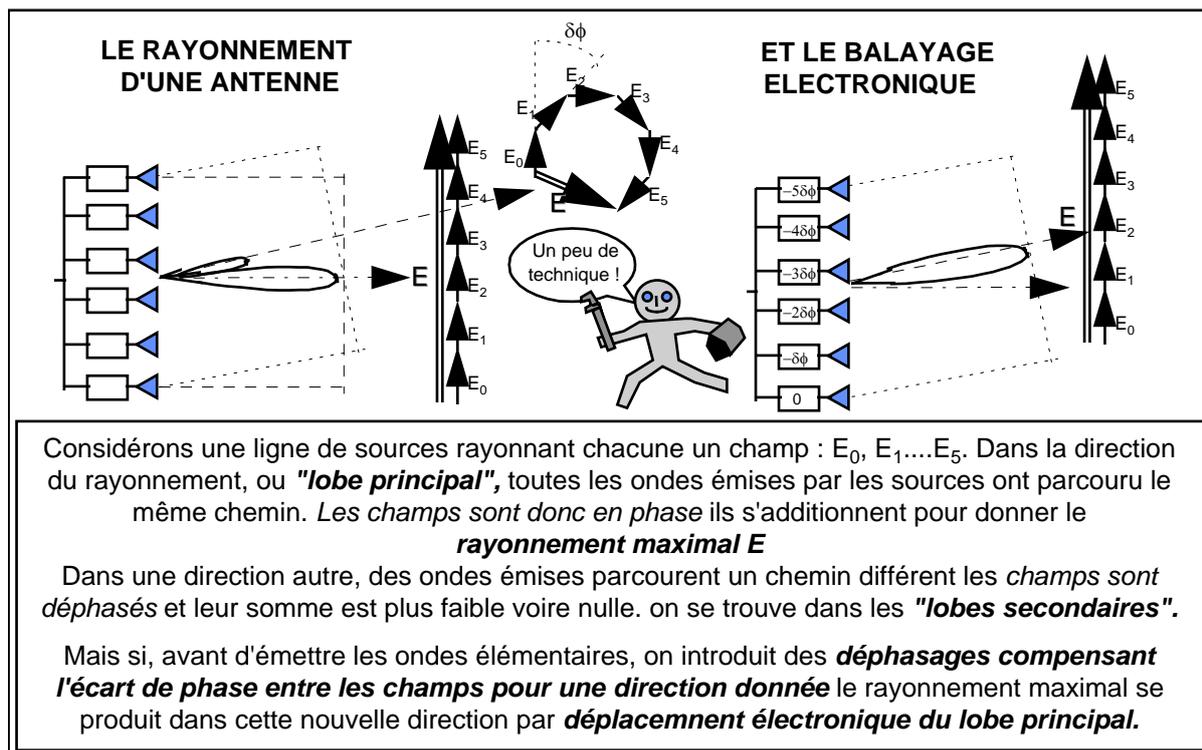
Dans la période moderne, la première réalisation opérationnelle fut celle des radars des *porte-avions type ENTREPRISE* aux USA à partir de 1950. En France, la théorie en sera développée dans le milieu des années 60, particulièrement par *Serge Drabovich* à la Thomson, en relation étroite avec les nouveaux développements du traitement de signal.

Pour la petite histoire on peut rappeler les réalisations de balayage « électro - mécanique » :

- Celle de l'« *Eagle AN/APQ-7* » déjà cité, qui utilisait une antenne « cylindro - parabolique », éclairée par un guide à fentes, le balayage du faisceau étant obtenu par variation mécanique de la largeur du guide. Le principe de cette antenne fut également transposé à d'autres applications, comme le premier radar d'atterrissage *GCA* développé en France par le LRH de *V. Altovsky* à la *CFTH*.
- Celle de l'*antenne Crusoe*, développée également par *V. Altovsky* après son passage à la Radio Industrie devenue *SNERI*, qui utilisait la commutation de sources primaires au voisinage du foyer d'un réflecteur parabolique selon un procédé de commutateur tournant dit *source Robinson*.

Mais le véritable balayage électronique est celui utilisant des déphaseurs associés à une ligne ou à un réseau de sources rayonnantes.

LE RADAR MODERNE EN FRANCE



En France, les premières études sur le sujet datent du début des années 60 avec la réalisation du « radar d'analyse de raid » **RADHAMANTE** par la société **ALCATEL ALSTHOM**. Le prototype réalisé en bande C ($\lambda = 5$ cm) pour obtenir un faisceau très étroit, utilisait une ligne de sources à déphaseurs à ferrites placée devant un réflecteur cylindro - parabolique. Cette antenne était orientable en site et en gisement vers le « raid » à analyser et pouvait en outre tourner continûment autour de son centre de symétrie, de manière à ce que le balayage électronique explore un cône autour de sa direction de pointage.

Mis à part ce mouvement assez particulier, c'est ce schéma de réalisation d'antenne « cylindro - parabolique » que l'on retrouve dans d'autres modèles de radars de veille réalisés par Thomson - CSF au début des années 70. L'antenne est alors animée d'un mouvement continu de rotation en gisement et le balayage électronique utilisé pour explorer les différents sites pendant cette rotation, selon le principe du « **balayage électronique 1D** ».

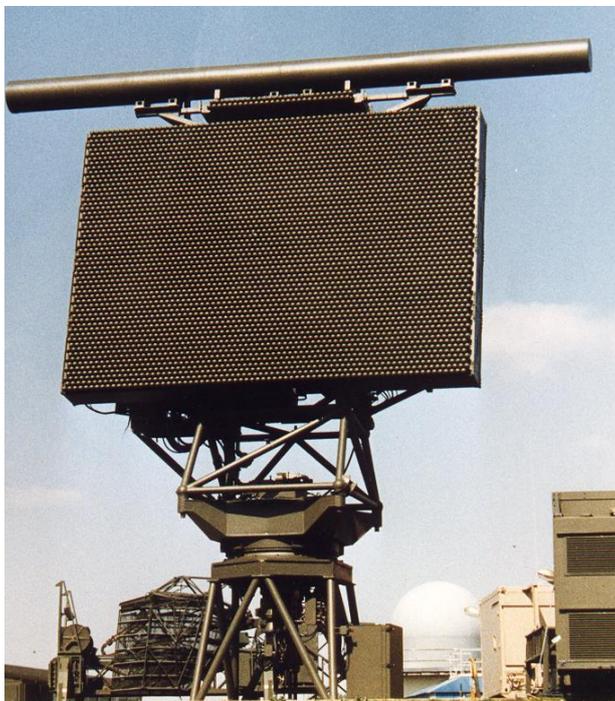
Les premiers déphaseurs employés utilisaient des ferrites, d'abord à commande continue ou « analogique », puis par sauts discontinus (un élément discret par saut) dits à commande « numérique ». Une autre technologie utilisant des diodes PIN comme élément de commande des phases a fait ensuite son apparition. Ces deux technologies perdurent, avec des succès variables dépendant de la maturité de l'une ou de l'autre à un instant donné.

Les deux réalisations les plus remarquables de balayage électronique 1D à antenne cylindro - parabolique furent :

- les radars de mesure du site **SATRAPE** en 1974, réalisés en bande S et utilisant des émetteurs récepteurs ER37, ils furent associés aux radars de veille bande L **VULCAIN** de défense aérienne pour la mesure de l'altitude des cibles ;
- le **prototype** de radar de veille **TRS 2215**, également à balayage électronique en site mais cette fois pour obtenir une veille complète ; il utilisait la chaîne d'émission réception du **TIGER** montée en puissance (700 kW crête, 10 kW moyens) par l'adjonction d'un étage supplémentaire à CFA.

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

Un progrès décisif est apporté à ces antennes par le développement *d'antennes réseaux* à lignes de sources alimentées par des circuits « triplaques à air » (brevet Thomson – CSF), où chaque ligne de source est commandée par un déphaseur à ferrite pour obtenir le balayage électronique en site, avec un très faible taux de lobes secondaires, favorable aux performances de détection en présence de brouilleurs.



Antenne à balayage électronique du radar de surveillance aérienne TRS 22XX
Gracieuse autorisation de THALES

C'est là, au début des années 80, sous la conduite de **P. Candau-Thill**, le début réel de la série TRS : le **TRS 2215** déjà cité dans sa version définitive (10 kW moyens, antenne de 17,5 mètres carrés, pour une portée de 370 kilomètres et 40000 pieds), le **TRS 2230** version fixe pour l'aviation civile (10 kW moyens, antenne de 27,5 mètres carrés, pour une portée de 400 kilomètres et 100 000 pieds) et finalement la version mobile militarisée **TRS 22XX** associée à un nouvel émetteur à TOP plus puissant (antenne de 27 mètres carrés, pour une portée de 470 kilomètres et 100000 pieds), destiné à remplacer les radars de veille aérienne à antenne géante (100 mètres carrés) de type Palmier.

Le balayage électronique dans deux dimensions

Pouvoir utiliser le balayage électronique à la fois en site et en gisement fait appel à des organisations plus complexes dans lesquelles chaque source est commandée séparément par un déphaseur individuel. D'où un problème de coût des déphaseurs, partiellement résolu par l'apparition des déphaseurs à diodes PIN.

La première conception en France d'une antenne à balayage électronique 2D date de 1968, à partir d'un projet de 1966 de l'équipe antenne **CSF** dirigée par **Mr Landesmann**, sur un cahier des charges du STTA, dans le cadre d'un projet ambitieux d'un prototype de radar de surveillance spatiale le **STRADIVARIUS** :

STation Radar Automatique et DIVersifiée Apte la Recherche de l'Identification Universelle des Satellites

(Excusez du peu!... L'auteur, responsable à l'époque des projets COMETE puis STRADIVARIUS, est seul responsable de ces acronymes).

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

Ce projet était réellement en avance sur son temps, son antenne *CSF* “ type télescope à deux réflecteurs ” ne comportait que quatre lignes de sources et mesurait 30 mètres de haut et 55 mètres de large, les sites explorés variaient de 4 à 10 degrés. Elle était orientable sur un rail circulaire pour “ aller chercher ” en phase descendante les satellites détectés lors de leur phase montante.

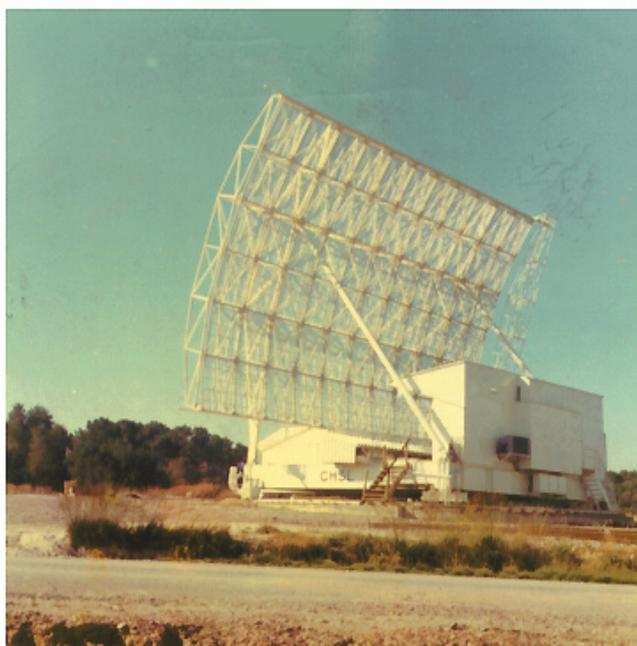
Les déphaseurs étaient des déphaseurs à diodes dont la mise au point s’avéra plus que délicate notamment en raison du bruit qu’ils introduisaient en réception.

L’émetteur à triodes (150 kW crête, 30 kW moyens, bande de 12%) réalisé par la *division « tubes classiques »* de *Thomson* sous la direction de *Pierre Gerlach*, utilisait une technologie originale de grille en graphite pyrolytique étudiée sur contrat de la *DRET*.

La compression d’impulsion de 4 ms à 16 μ s était une première pour l’époque, elle fut réalisée dans un premier temps en analogique avec des lignes métalliques *CSF*, puis ultérieurement par un codage numérique proposé après la fusion *Thomson – CSF*.

Le système d’exploitation et de trajectographie étudié par la *SESA* et réalisé par *IBM-France* délivrait son information à une visualisation originale développée par la *SINTRA*.

L’architecture du système avait été étudiée par le *STTA* qui assura la définition technique et la maîtrise d’œuvre d’ensemble. Et cette opération fût un succès technique, *STRADIVARIUS* détecta ses premiers satellites en 1973...Mais hélas ce projet, trop futuriste peut être, n’intéressait plus les armées et fut abandonné.



Radars expérimental de détection des satellites STRADIVARIUS sur son site de Bruz (1970)
Collection des auteurs

Cette technique évolua cependant dans un cadre plus « classique », *Thomson - CSF* étudia et mit en production le *DRBJ-11A*, destiné aux frégates de la Marine, et en 1975 le *LOUXOR*, radar expérimental de surveillance et de poursuite pour engins sol-air. Suit en 1980 le développement d’un nouveau radar *ARABEL* associé au missile *ASTER* pour le système d’armes *SAAM* destiné à équiper le Porte-Avions Nucléaire “ *Charles de Gaulle* ”, pour lequel est choisie une antenne circulaire du type « lentille électronique » fonctionnant sur trois modes et deux polarisations simultanés.

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

En 1985, le radar multifonctions moyenne portée ARABEL assure à la fois, grâce à son agilité de faisceau veille, acquisition, poursuite et transmission de données vers le missile.



Antenne à balayage électronique ARABEL sur véhicule - Bourget 2001
Gracieuse autorisation de THALES

Les antennes actives

Le développement des composants de puissance « état solide » à base d'amplificateurs à transistors « silicium » ou « arséniure de gallium : AsGa », a permis une nouvelle évolution du balayage électronique : les antennes actives.

Cette nouvelle technologie appliquée au balayage électronique 1D s'est développée, en réalisant une « émission état solide » intégrée dans l'antenne : un « module émetteur - récepteur - déphaseur » alimentant chaque ligne de sources. La première réalisation de ce type est, en 1990, le radar moyenne portée (classe 150 km) **FLAIR**, que l'on peut considérer comme le premier radar à antenne active, dont les amplificateurs d'émission utilisent des transistors bipolaires silicium, tandis que les récepteurs et les déphaseurs associés sont en technologie intégrée AsGa. De nouveaux matériels faisant appel au même principe et à une technologie d'antenne dérivée des TRS, seront développés à la fin des années 90, les radars longue portée (classe 300 à 450 km) **MASTER T** successeur du TRS 2215 et **MASTER M** successeur des TRS 2230 et TRS 22XX.



Antenne "MASTER T" radar tactique longue portée à balayage électronique
Gracieuse autorisation de THALES

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

En balayage électronique 2D, le **COBRA**, radar de localisation des batteries d'artillerie sur le champ de bataille, à « modules émission - réception » associés à chaque source de l'antenne, est lancé à la même époque dans le cadre d'un accord associant l'américain **Lockheed Martin** à un consortium européen comprenant **Thomson-CSF** pour la France, **Siemens** pour l'Allemagne, et **Racal** pour la Grande Bretagne. C'est le premier radar européen à réseau 2D intégralement conçu sur une technologie de modules actifs à état solide.

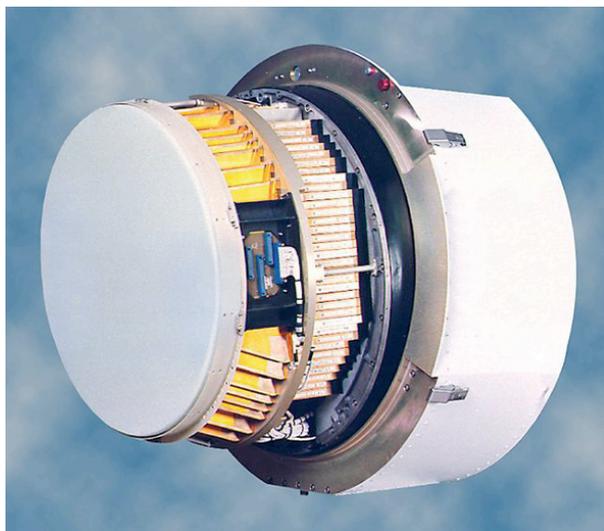
En parallèle **Thomson - CSF** étudie une version 2D de sa série MASTER, le **MASTER A**, qui conserve la technologie des lignes de sources alimentées par des émetteurs-récepteurs état solide, le balayage électronique étant assuré par des déphaseurs placés derrière chaque source. Elle prépare également la future technologie à modules actifs prévue dans le cadre du développement **M3R**, tout en travaillant sur les générations futures d'antennes à formation de faisceaux par le calcul.

Le balayage électronique aéroporté

Les radars aéroportés sont restés plus longtemps à l'écart de la tendance : Thomson - CSF avait développé les RDI et RDY sur une technologie d'antenne à fentes à balayage mécanique, bien adaptée au besoin, et le balayage électronique ne s'imposera qu'à partir de 1986 avec l'avion de combat multifonctions **RAFALE**.

En effet, pour répondre à la demande de "polyvalence élargie" de cet avion et cumuler la détection et l'engagement simultané d'un grand nombre de cibles avec les fonctions de suivi de terrain que demandait l'Armée de l'Air, et aussi pour satisfaire aux besoins spécifiques de l'Aéronavale puisqu'il s'agissait d'un programme commun Air/Marine, il fallait franchir un pas technique supplémentaire et passer au balayage électronique.

Le radar **RBE 2**, retenu pour ce programme à l'issue d'une compétition entre Thomson-CSF et ESD, utilise une technique de balayage originale, mise au point à partir de 1973 sur contrats d'étude du STTA, par la société **RADANT** qui rejoindra à cette occasion le Groupe Thomson-CSF.



Antenne " RBE2 " à balayage électronique deux dimensions de l'avion RAFALE
Gracieuse autorisation de THALES

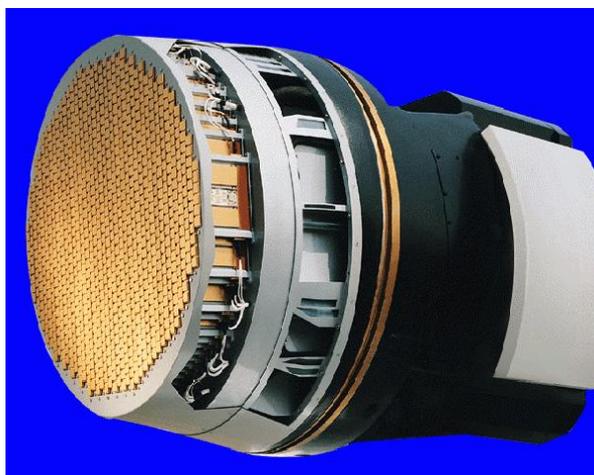
L'antenne est faite de deux " lentilles- prismes", constituées de canaux adjacents, contenant chacun une succession de diodes PIN commandables sur deux états, associées par un panneau polariseur et alimentées par une structure plate assurant la formation des voies nécessaire. La combinaison de ces états par plans successifs dans chaque lentille produit les déphasages, qui permettent le balayage 2D.

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

C'était, à la fin des années 80, le seul mode de balayage électronique 2D économiquement accessible, mais restait encore un pari industriel de taille, notamment du fait des contraintes de poids et d'encombrement qui étaient imposées. Toute une technologie nouvelle difficile à maîtriser ; et elle l'a été. Le RBE2 est maintenant entre les mains de son premier client : l'Aéronavale, et il tient ses promesses.

Mais l'évolution s'accélère toujours : le RBE 2 est encore en phase de développement quand est lancée pour l'Avion de Combat Futur la première phase du projet européen **AMSAR**. Cette phase, conduite de 1992 à 1998 par un **GIE** groupant **Thomson-CSF Detexis**, **GEC** (aujourd'hui MES), et **DASA**, a montré la faisabilité d'une antenne de radar aéroporté utilisant intégralement une technique de modules actifs.

Elle doit maintenant se poursuivre par la réalisation d'un démonstrateur pleine échelle sur la base d'un ensemble émetteur récepteur traitement RBE2 de Thomson -CSF, associé à une antenne à modules actifs.



Antenne à modules actifs émission réception
Gracieuse autorisation de THALES

Le retour aux bandes basses

Dès les années 70, les problèmes de la résistance au brouillage, et surtout de la détection des cibles furtives, ont ramené l'attention des concepteurs sur l'intérêt des fréquences basses, dans les gammes métriques ou décimétriques, qui avaient été les premières utilisées par les radaristes. Mais ce choix bénéficiait maintenant de nouvelles possibilités technologiques, notamment dans le domaine du traitement de signal, qui transformaient cet apparent retour en arrière en une très réelle innovation.

Le précurseur en la matière fut un chercheur de **l'ONERA** : Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales, **Jacques Dorey**, qui proposa en 1973 une approche tout à fait nouvelle de la conception des radars de surveillance aérienne.

Le **RIAS**, " Radar à Impulsion et Antenne Synthétique ", s'avéra un **concept révolutionnaire**, qui associait au choix d'une fréquence métrique un principe original d'antenne active à formation simultanée du signal et du faisceau par le calcul. A l'époque l'idée se heurtait à un réel problème de faisabilité au niveau du volume de traitement de signal temps réel qu'elle impliquait. Mais elle bénéficia du soutien de la DRET, qui finança en 1975 la construction d'une maquette probatoire installée au Centre d'Essais de la Méditerranée sur l'île du Levant.

Dans un premier temps, l'équipe de l'ONERA y démontra la validité du concept par des

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

traitements en temps différé, puis réalisa un calculateur temps réel en collaboration avec les numériciens de Thomson-CSF dirigés par **R. Vanhove**.

En 1980, la maquette du CEM démontra pleinement sa capacité à assurer en temps réel la tenue en veille et poursuite de situations aériennes complexes. Cette démonstration fut complétée par des expérimentations d'anti-brouillage utilisant les capacités d'adaptativité du traitement d'antenne.



Vue d'ensemble de la station expérimentale RIAS à l'Ile du Levant (1980)
Photo ONERA

Un prototype à capacités opérationnelles fut alors développé dans le cadre d'un accord ONERA - Thomson-CSF initié par la DRET, et fut installé par Thomson-CSF dans la région Rouennaise. Les résultats obtenus sont plus que probants, ce système est le seul capable aujourd'hui, d'opérer simultanément une veille panoramique et des poursuites multicibles sans limitation de capacité.

La même équipe de l'**ONERA** fut ensuite à l'origine du Radar Transhorizon "**NOSTRADAMUS**", qui utilise la bande HF pour obtenir des portées de l'ordre de 1500 km par réflexion sur l'ionosphère, avec une structure originale de réseau en étoile. Ce radar expérimental installé à Dreux à partir de 1989, est le premier au monde à avoir une capacité d'observation sur 360° et de contrôle en site des ambiguïtés de trajets multiples. Lors de l'intervention au Kosovo, il a pu démontrer son intérêt opérationnel par le suivi à distance de la situation aérienne sur un théâtre d'opérations à plus de 1000 km de distance.



Champ d'antennes du radar transhorizon NOSTRADAMUS

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

Photo ONERA

Plus récemment encore, le radar bistatique « **GRAVES** », fonctionnant en VHF, a doté notre pays d'une capacité spatiale, en restituant la trajectoire de tous les satellites survolant le territoire. Il doit être prochainement intégré dans le dispositif opérationnel de l'Armée de l'Air, géré à partir du centre de Taverny. Trente ans après, le vieux rêve de STRADIVARIUS se réalise !

L'intérêt pour les basses fréquences s'est également concrétisé au **LCT** dans l'équipe de **Jean-Luc Zolésio** par la réalisation de différents dispositifs en ondes métriques ou décimétriques pour la détection des cibles furtives, masquées ou à trajectoire plongeante.

Les **Barrières HF RABIT** reprennent les idées anciennes de Pierre David, mais avec des technologies modernes, pour le traitement du signal en particulier. Elles furent évaluées à Mont-de-Marsan en 1988 et démontrent l'utilité des ondes décimétriques pour la détection d'Ultra Légers Motorisés (ULM) dont la SER est forte à ces fréquences (zone de résonance) et où la propagation par onde de sol élimine les trous de détection à très basse altitude dus aux trajets multiples.

Le radar expérimental **SACHEM** (Surveillance Aérienne Contre Hélicoptères EMBusqués), utilise la faculté bien connue des transmetteurs, de la propagation des ondes VHF/UHF sur le dioptré air végétation, ce qui lui permet d'éclairer les cibles masquées par cette végétation. Il en fera la preuve à Valence puis à Canjuers à plusieurs reprises à partir de 1982. Une difficulté, résidait dans l'absence de fréquences affectées au radar dans ces bandes, elle conduira à définir des formes d'onde très particulières à ce type de radar dites à « Compatibilité Electro Magnétique Optimum » et à utiliser l'extraordinaire agilité en fréquence des matériels dans ces bandes (30 %). Plusieurs prototypes à des fréquences différentes seront réalisés pour mettre au point ces techniques, aujourd'hui matures. Le dernier en date, expérimenté à partir de 1990, utilise une antenne active, et un traitement de formation de faisceau par le calcul pour l'élimination des brouilleurs.

Le système **PARASOL** utilise les mêmes fréquences contre les missiles plongeants qui échappent aux radars de veille traditionnels dont la couverture en site ne dépasse pas 30 à 45° et dont les fréquences de travail correspondent à de très faibles SER. Utilisant des antennes actives à formation de faisceau par le calcul et la diversité de fréquence, ces radars ont moins de problèmes d'interférence en raison de leur couverture zénithale. Les essais au CEL à partir de 1992 sont très démonstratifs et la Marine décide d'ajouter un tel radar au système de défense aérienne SAMM des frégates. Le programme devient multinational, avec l'Italie en particulier, et la loi du « juste retour » fait tomber ce radar dans l'escarcelle de SELENIA !

Après avoir rejoint en 1998 **Thales Air Defence / Radar Development**, l'équipe de LCT poursuit aujourd'hui l'étude des radars en bande basse, notamment par les deux programmes **CUIRACE** : radar d'alerte courte portée, et **ROMA** : pour la surveillance moyenne et longue portée vis à vis des missiles de croisière des ATBM et des cibles furtives, qui utilisent les techniques mises au point avec le radar expérimental **SACHEM** et le système **PARASOL**.

Un mot de conclusion

L'industrie du radar français désormais rassemblée dans THALES affiche aujourd'hui une vocation mondiale et dispose d'un fort potentiel et de produits de tout premier plan¹.

¹ Certaines de ses réalisations, notamment les radars de poursuite, les radars de recalage de navigation et les autodirecteurs de missiles ne sont pas évoqués dans cet article, les auteurs ont du faire un choix, ils prient les

LE RADAR MODERNE EN FRANCE

Que sera le “ radar ” des prochaines années et comment en évoluera le concept ? La réponse n’est pas facile, elle sera guidée par l’évolution des besoins, celle corrélative des technologies mais aussi par les choix politiques et les capacités financières des décideurs.

Les *besoins opérationnels* ont largement évolué dans la dernière décennie. A une menace précise de grande envergure, succède une menace diffuse et fortement imprévisible. Les opérations de maintien de la paix demandent des actions plus ponctuelles, plus précises et ménageant les effets collatéraux.

Dans ce contexte, associé à l’optronique, le radar conserve une place de choix pour le renseignement du champ de bataille, la détection de la menace et la conduite des armes. En effet il reste le seul système pouvant assurer ces fonctions dans des conditions météorologiques défavorables. Par contre il se trouvera dans l’avenir confronté à la détection de cibles furtives dans les bandes classiques.

Devant cette évolution du besoin, les *réponses technologiques* porteront sur les possibilités toujours croissantes du traitement du signal et des technologies associées, l’évolution des antennes vers les antennes actives, la formation de faisceau par le calcul et l’auto adaptativité spatio-temporelle, les nouveaux procédés d’imagerie radar, de reconnaissance des formes, de modélisation et de classification des cibles. Avec bien sur des limitations liées à la physique.

Des *concepts nouveaux* : « d’émissions colorées » dérivées du RIAS, d’emploi des « bandes basses » ou de radars « très large bande », d’antennes réparties, d’optimisation de la gestion de « l’espace temps », de systèmes globaux multisenseurs...devraient apporter des solutions originales aux besoins exprimés.

Que seront - elles finalement ? Ce sera l’histoire à venir, qui dépendra plus que jamais de l’investissement des décideurs dans la recherche et la technologie.

Les auteurs

Jacques DARRICAU - Ingénieur général de l’armement, ingénieur ENICA et ENSTAé, est entré au Service Technique des Télécommunications de l’Air en 1961 où il devait passer vingt ans aux études radar puis aux installations. Il a eu la chance d’intervenir auprès des industriels français du radar, à l’époque de la « naissance » des techniques modernes et d’y éprouver une véritable passion, ce qui l’a conduit à rédiger dès 1973, l’ouvrage : « Physique et Théorie du Radar ». Sa carrière s’est ensuite poursuivie à la DGA qu’il a quittée en février 1999 comme directeur du Service Technique des Technologies Communes. Il a gardé pendant toute sa carrière une activité de professeur de radar et maintenu à jour son ouvrage, réédité à plusieurs reprises. Le « DARRICAU » est toujours une référence de cette technique en France.

Yves BLANCHARD - Diplômé de l’Institut Supérieur d’Electronique du Nord (1966), a développé une carrière d’ingénieur de recherche dans le double domaine du Radar et du Sonar. Entré en 1971 à l’Office National d’Etudes et de Recherches Aérospatiales, il y sera responsable de la conduite d’importants projets de radars expérimentaux. En 1988 il rejoint l’industrie, d’abord à Thomson Marconi Sonar, puis à nouveau sur des applications radar, comme directeur de la recherche à Thomson-CSF Missiles Electronics, et enfin directeur technique de l’Unité « Electronique de Missiles » de Thales Systèmes Aéroportés. Ce parcours d’ingénieur radariste l’a amené à s’intéresser aux origines du radar et à l’histoire de cette discipline, sur lesquelles il a prononcé de nombreuses conférences

Les auteurs remercient : Pierre BARATAULT, François le CHEVALIER, Jean Marie COLIN, Jean Claude GUILLEROT, Marc LECONTE, Francis PAYEN, Pascal RATARD et Jean Luc ZOLELIO, pour l’aide précieuse qu’ils ont apporté à la rédaction de cet article.

Ils dédient cet article à leur ami Jacques DOREY, qui aurait certainement aimé y participer.

acteurs de ces domaines de bien vouloir les en excuser.