

AVANT-PROPOS

Le présent document se veut une contribution à un travail de mémoire sur l'action des ingénieurs de l'Air (devenus ingénieurs de l'armement à partir de 1968) dans le domaine de l'électronique au cours de la période 1945-1985.

Dans cette discipline, qui a « explosé » au cours de cette période, envahissant progressivement toutes les activités de l'armement, la plupart de ces ingénieurs ont travaillé dans un service, le Service technique des télécommunications de l'Air (STTA), à la création duquel ils ont participé et dont ils ont assuré le développement.

Dans leurs contributions, les rédacteurs relatent leur expérience personnelle en décrivant leurs relations avec leurs camarades du service, de la direction technique, voire des autres directions, avec les officiers des armées et avec les industriels qui ont été directement impliqués dans les actions relatées.

Dans le domaine et la période considérés, l'action de l'ingénieur général Francis Pénin doit être particulièrement soulignée. Venant du Centre d'essais en vol, il fut à l'origine de l'essor du STTA, comme sous-directeur, puis directeur. Son très long séjour dans ces dernières fonctions, de 1955 jusqu'à sa retraite à la fin de 1970, a contribué très fortement au développement des activités du service et à celui de l'industrie électronique française. Il sut s'entourer d'ingénieurs de l'armement dont les compétences furent reconnues tant par les officiers des armées que par les industriels, et développer leur dynamisme, comme leur enthousiasme, par une délégation de responsabilités importante.

Il faut également signaler l'intérêt qu'il a toujours porté à développer l'enseignement de l'électronique à l'École nationale supérieure de l'aéronautique. Lui-même et de nombreux ingénieurs du service ont professé à l'ENSA puis à l'ENSTA (École nationale supérieure des techniques avancées) et rédigé des cours.

Pour relater les expériences vécues dans le domaine de l'électronique de communication (domaine défini au chapitre 1), il a fallu choisir.

Par chance, il s'est trouvé, au moins pendant la période qui nous intéresse, que la plus grande partie des moyens humains était rassemblée au STTA. Aussi pouvons-nous caractériser notre histoire comme classique, car elle conjugue à peu près la règle des trois unités :

- unité de lieu : le 129, rue de la Convention, à Paris, dans le quinzième arrondissement ;
- unité d'action, par le souvenir d'une pensée cohérente des ingénieurs et techniciens, et leur concours à des projets finalement convergents ;
- unité de temps, qu'on voudra bien admettre, car la partie s'est jouée sur une période relativement courte (10 à 15 ans) au regard du temps écoulé depuis.

Dans ce cadre, quels sujets retenir et quel plan arrêter ? Il a paru d'abord utile de dire quelques mots de l'électronique, science et technique singulière, si

proche de la physique fondamentale, à qui elle emprunte la rigueur, et dont elle revêt les difficultés mathématiques... et en même temps si commune dans notre vie quotidienne : radio, télévision, vidéodisques, radars, puces, satellites... liste interminable et sans cesse renouvelée depuis quarante ans.

Le STTA, son organisation, son évolution, sa vie sont décrits dans le chapitre suivant : c'est le théâtre principal de l'action, de la nôtre comme de celle de nos interlocuteurs, militaires ou industriels.

On ne peut parler d'électronique de communication sans évoquer les composants et matériaux de base (objets du troisième chapitre) : leurs histoires se confondent. Il sont bien plus que les briques élémentaires de l'électronique : ils en sont l'essence, quand ils ne sont pas à eux seuls un système, comme les puces quand elles se font calculateur, modulateur démodulateur (modem), mémoire, récepteur radio...

Les cinq chapitres suivants survolent l'électronique de communication par grandes fonctions, désormais familières d'un grand public, et traduites dans l'organisation interne du STTA comme dans celle de l'industrie. Il s'agit d'abord de la fonction détection, celle qui est assurée par les radars (sol ou bord).

Les radars sol s'intègrent dans les systèmes de défense aérienne, dont ils constituent un composant majeur. Ainsi contons-nous l'histoire du NADGE, grand programme OTAN de défense aérienne : elle illustre celle des équipements français et de leurs brillants succès.

Les radars bord s'intègrent – s'intégraient –, eux, avec peine dans le système d'arme « avion ». Le cinquième chapitre relate une difficile cohabitation, avant que les avionneurs n'admettent qu'il est plus judicieux de construire un appareil autour de ses armes et de son moteur que d'implanter à toute force ces derniers dans une cellule.

Le chapitre suivant (radiocommunications et radionavigation) comporte deux parties distinctes, liées par le fait que toutes deux font appel aux techniques radio (plus ou moins classiques). Les radiocommunications assurent les liaisons entre avions, entre bases (surtout lointaines), entre bases et avions, et réciproquement. Sont utilisées les grandes ondes, les ondes moyennes, les ondes courtes ou très courtes... et la réflexion sur les couches ionisées de l'atmosphère, que permettent les longues distances. Les grandes modulations classiques (amplitude, fréquence, bande latérale unique) permettent d'économiser les spectres. La radionavigation permet au pilote de se situer dans l'espace, soit qu'il émette des signaux et qu'une ou plusieurs stations au sol le relèvent, soit qu'il se repère en azimut, et parfois en distance, par rapport à des balises fixes, ou dans des systèmes plus complexes installés à terre.

Lorsque les besoins en capacité excèdent une à quelques voies, du type téléphonique par exemple, les moyens radio évoqués ci-dessus deviennent insuffisants. Il faut alors augmenter les puissances, utiliser des antennes directives, des matériels plus lourds : bref, il faut passer aux faisceaux hertziens. Le réseau de France Télécom est ainsi composé de liaisons hertziennes, au sol ou par satellite, et de câbles coaxiaux ou composés de fibres optiques. Le huitième chapitre décrit le choix opéré par l'armée de l'Air. Le Réseau Air 70 fédère les actions qui ont permis la construction d'un système nouveau, moderne et adapté.

Les contre-mesures, évoquées au septième chapitre, sont un domaine réservé, typiquement militaire : on parle d'ailleurs de guerre électronique. Il s'agit de brouiller les communications, de saturer les radars, d'interdire les missiles – ou de se protéger contre ces brouillages, saturations ou interdictions. Les techniques sont sophistiquées, les contraintes sévères et la compétition incessante, comme celle, millénaire, de la lance et du bouclier.

TABLE DES MATIERES

Avant-propos	1
Chapitre 1 : Rappel sur l'électronique	9
Une question de terminologie	9
Électron et électronique de communication	11
Chapitre 2 : Le Service technique des télécommunications de l'Air	15
Aéronautique et électronique	15
Organisation et évolution	17
Chapitre 3 : Les composants et matériaux de base	25
La période 1957-1960	25
L'après-1960	27
Chapitre 4 : Le NADGE, programme OTAN de défense aérienne	41
La situation technico-opérationnelle dans les années 1950 ..	41
Les études en cours en France à la fin des années 1950 ..	46
Le contexte international à la fin des années 1950	51
Avant l'appel d'offres de 1964	53
L'appel d'offres (1964)	55
Aujourd'hui	57
Chapitre 5 : Les radars aéroportés	65
Particularités des programmes de radars aéroportés	65
Bref historique des radars aéroportés	66
Principales catégories de radars aéroportés	67
Principaux acteurs industriels dans le monde occidental ..	68
Les années 1945-1960 au STTA	69
L'évolution des besoins opérationnels dans les années 1960	73
Les programmes air-sol dans les années 1960	74
Les programmes air-air dans les années 1960	76
Conclusion	79
Annexe : Les méthodes de travail	80
Addendum sur les radars aéroportés	82
Chapitre 6 : Radiocommunications et radionavigation au STTA de 1950 à 1980	87
Après la Seconde Guerre mondiale	87
Liaisons de commandement	88
Matériels HF de bord	90
Radiocommunications sol-air	90
Matériels sol VHF	91
Matériels sol UHF	91
Matériels de bord VHF, UHF, V/UHF	92
Radionavigation	93

Chapitre 7 : Les contre-mesures au STTA	
au début des années 1960	99
Situation générale des contre-mesures	99
Le champ couvert.....	100
L'organisation	101
Les origines de la compétence technique du STTA	102
L'industrie française des contre-mesures	103
Les programmes	104
En guise de conclusion	106
Chapitre 8 : Les réseaux d'infrastructure	
Le Réseau Air 70	109
Pourquoi un réseau ?	109
L'environnement.....	111
La conception du réseau	113
La réalisation du réseau	115
Autres réseaux ou matériels d'infrastructure	118
Conclusion.....	125
Sigles utilisés	127
Index des noms de personnes	133
Index des sociétés	135

CHAPITRE 1

RAPPEL SUR L'ELECTRONIQUE

par Jacques Clavier¹

UNE QUESTION DE TERMINOLOGIE

La logique s'accommode mal des noms en « ique ».

Ainsi de l'électronique. Elle eût pu être la science et la technique de l'électron, la connaissance et la mise en œuvre de ses propriétés. Quoi de plus électronique que le flux qui compose le courant que nous vend EDF ? Pourtant, aucun de ses agents ne se considère comme électronicien, et le public ne les tient pas non plus pour tels.

L'informatique, de la même façon, eût pu désigner la science et la technique appliquées à un objet un peu particulier et pas toujours défini : l'information. En fait, elle est « limitée » au traitement de cette même information, pour l'essentiel par des moyens électroniques, et aux opérations connexes de recueil (saisie) et de présentation.

Les télécommunications, enfin, concernent la transmission des informations. Relèvent d'elles, à ce titre, tous les réseaux modernes composés de faisceaux hertziens, satellites, câbles ou fibres optiques, émetteurs-récepteurs radio, systèmes de détection radar ou de navigation... Eussent pu leur appartenir le courrier, la signalisation optique, le télégraphe Chappe et autres feux romains. Là encore, l'histoire et l'usage ne l'ont pas voulu, et toute querelle de définition doit laisser place au constat de la réalité.

Ces difficultés – toutes relatives – trouvent probablement leur origine dans le fait qu'électronique, informatique, et télécommunications sont de nature différente. Dans leur acception d'aujourd'hui, elles ont en commun de concerner un même objet – presque une même marchandise – : l'information, qui constitue, avec l'énergie, l'une des deux grandeurs fondamentales de notre monde.

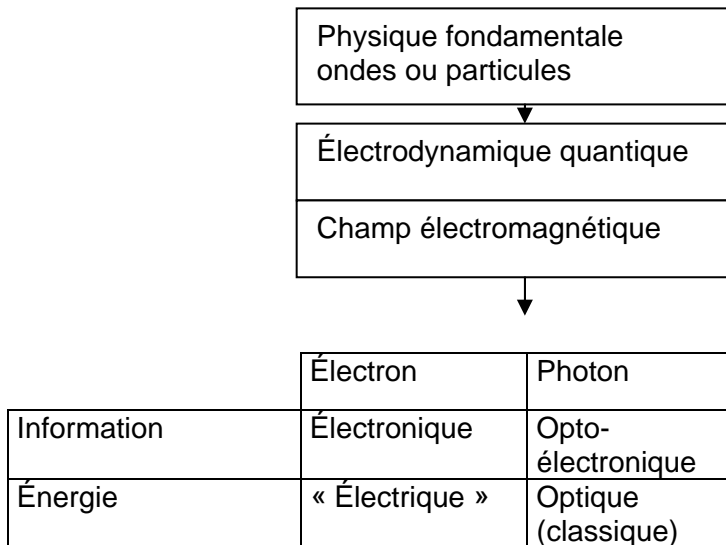
Ainsi le domaine de l'électronique – qui est un outil – est-il celui où l'électron est utilisé comme support de l'information, par opposition au cas où il sert au transport de l'énergie², que l'on pourrait nommer en utilisant le néologisme « électrique ». Celui de l'informatique est restreint au traitement – en pratique toujours électronique – de l'information numérique, qui est ainsi manipulée dans son aspect statique. Les télécommunications, qui sont un service, au contraire, prennent en charge la dynamique de l'information, puisqu'il s'agit de la transmettre, avec toutes les opérations que cela nécessite. Les télécommunications mettent en cause une propriété essentielle et extraordinaire du champ électro-

¹ Jacques Clavier a été, au STTA, chef du bureau « Études télécommunications sol » de 1959 à 1967.

² On parlait autrefois de courants faibles et de courants forts, distinction discutable depuis l'utilisation de fortes puissances en radio.

magnétique³ : celle de se propager de lui-même, à la plus grande vitesse possible.

Ces considérations conduisent à dresser deux tableaux, un peu simplificateurs, il est vrai. Le premier présente les deux agents, l'électron et le photon, mariés dans le champ électromagnétique, sous l'égide de l'électronique quantique, branche moderne de la physique fondamentale. Selon que ces deux entités se chargent de l'information ou de l'énergie, on aboutit aux quatre disciplines du bas du tableau.



Le second tableau (en page suivante) est appelé « tableau rectangulaire des télécommunications ». Il explicite les quatre opérations qui s'appliquent à l'information, dans un ordre parfois complexe et « tronçonné ». Le traitement est limité à ce qui est nécessaire à la transmission : sinon, il relèverait de l'informatique. Les frontières ne sont toutefois pas nettes : on parle ainsi de « téléinformatique » (par exemple pour le codage des signaux vidéo).

Ainsi, l'électronique, dans son sens actuel, apparaît comme sous-jacente à l'informatique et aux télécommunications, mais étend son empire à bien d'autres domaines.

Nous limiterons ici notre discours à ce qui concerne ses relations avec les télécommunications : d'où l'expression d'électronique de communication, souvent usitée et heureusement reprise par le syndicat professionnel du secteur, la Fédération des industries électroniques de communication (FIEC).

³ Lequel champ fait intervenir l'électron et le photon.

	Opération	Sous-opération	Exemples de matériels concernés
1	Saisie	Acquisition Recueil ...	Micros, caméras, claviers, radars
2	Traitement	Groupage Routage Calcul	Multiplexeurs, autocommutateurs, calculateurs, codeurs
3	Transmission	Modulation Transport Démodulation	Émetteurs récepteurs radio, radar, TV, satellites
4	Présentation	Restitution <i>Display</i> ...	Écrans, scopes, haut-parleurs, fax, afficheurs, écouteurs

ÉLECTRON ET ELECTRONIQUE DE COMMUNICATION

L'électron

L'électron d'abord. On ne l'a (presque) jamais vu, que par ses manifestations. Son existence même, en tant qu'objet, est problématique : selon les conditions où on l'observe, il apparaît comme un corpuscule (de quoi alors est-il fait ?) ou comme une onde, répandue dans tout l'espace. Ces difficultés, parfois volontairement exagérées, tiennent au comportement du monde microscopique, inaccessible à nos sens, très différent du monde dit macroscopique qui en est l'apparence statistique. Notre cerveau, formé par ce dernier, est incapable d'imaginer le premier et ne dispose que du langage mathématique pour en exprimer la réalité.

L'électron est caractérisé par une masse de $0,9 \times 10^{-30}$ kg, un « rayon » de $0,8 \times 10^{-15}$ m, et une vitesse pouvant frôler celle de la lumière. Quand il intervient dans les relations entre atomes, il est responsable de la chimie ; quand il transporte l'énergie, il fait naître la totalité du domaine de l'électricité ; enfin, quand il prend en charge l'information, il crée le domaine de l'électronique. Impressionnante énumération. Il faut y ajouter que l'électron a résisté aux tempêtes qui ont brisé les structures réputées jusqu'alors indestructibles (proton, neutron), ou éternelles (proton). Il est, littéralement, a-tomique.

L'électronique

Pour revenir à des domaines plus concrets, l'essor de l'électronique, et particulièrement celui de l'électronique de communication, tient à quatre faits entre lesquels il est difficile d'établir une hiérarchie.

D'abord, quand il se déplace (ou oscille), l'électron engendre le champ électromagnétique (CEM), tenu d'ailleurs par les physiciens, depuis les travaux de Maxwell, pour la seule réalité du domaine. Le CEM parcourt l'espace-temps tout seul, à toute vitesse. Il est la condition nécessaire et suffisante des télécommunications.

Ensuite, quand il va « moins vite » ou est au repos (électrostatique), par exemple dans les structures à semi-conducteurs, l'électron réagit presque sans inertie à toute action électromagnétique. Il est donc parfaitement modulable, condition nécessaire et suffisante de l'informatique.

Troisième condition : l'industrie électronique est parvenue à disposer, sur un substrat inerte de 1 cm^2 appelé « puce », des millions (en l'an 2000), et bientôt des milliards, de cellules élémentaires (transistors) capables de stocker l'information binaire ou d'effectuer sur elle toutes les opérations (donc finalement tous les calculs), à des vitesses d'exécution qui compensent la relative pauvreté de la logique de Boole. Ces possibilités de conception et de production industrielle des puces sont issues des progrès énormes accomplis en micromécanique, en particulier en optique de très haute précision. La visite d'une usine moderne d'électronique est édifiante : d'électrons, point. Mais des salles « blanches », des binoculaires, des microscopes, des évaporateurs sous vide, des laboratoires photographiques, des machines sophistiquées pour insérer les composants...

Enfin, ces propriétés de l'électron, comme ces prouesses technologiques, auraient peut-être été peu utiles sans l'existence d'un théorème bien tranquille de la physique mathématique, qui a rendu possible la numérisation de l'information. Il s'agit du « théorème de l'échantillonnage ». Il énonce que la quantité d'information contenue dans un signal analogique (c'est-à-dire un signal continu) de largeur de bande B^4 est la même que celle portée par la suite de ses échantillons réguliers, prélevés au nombre de $2B$ par seconde. Il ne « reste plus », ensuite, qu'à remplacer ces échantillons, qui sont des « tops » sans épaisseur, par leur mesure binaire, donc par une suite de 0 et de 1, pour établir le pont entre tous les signaux analogiques, qui sont ceux du monde où nous vivons, et les suites binaires de l'informatique, seules digestibles par nos machines... et par nos puces.

Cette équivalence, du point de vue de l'information, entre analogique et numérique, ou, si l'on veut, entre continu et discret, est capitale. En effet, on sait très bien faire qu'une porte soit ouverte ou fermée, qu'un transistor soit passant ou bloqué. Bref, le tout ou rien est simple – d'aucuns diront simpliste –, mais devient redoutable et terriblement efficace quand il est mis en œuvre à des cadences infernales.

Dernière remarque : en raison de sa subtilité, l'électron obéit fidèlement au lois de la physique, exprimées en langage mathématique. À tel point qu'en sautant d'une orbite de l'atome de césium à l'autre, il définit l'étalon de longueur ou de temps, ce qui revient au même. Il traduit physiquement nos équations. Comme le serpent du Petit Prince pour les énigmes, il les résout toutes, au moins numériquement.

⁴ Un mot sur la largeur de bande B : elle est toujours limitée pour les signaux réels, ce qui rend toujours possible leur numérisation. En effet, les énergies en jeu dans les hautes fréquences deviennent vite énormes, pour les particules massiques comme pour la lumière.

CHAPITRE 2

LE SERVICE TECHNIQUE DES TELECOMMUNICATIONS DE L'AIR

par Michel BERGOUNIOUX¹

AERONAUTIQUE ET ELECTRONIQUE

L'électronique est apparue au début du xx^e siècle et a connu depuis une croissance au rythme exceptionnel. De façon presque concomitante, l'essor de l'aéronautique a été tout aussi considérable. Les premières machines volantes ont été confrontées au problème de la masse, dont la réduction était nécessaire pour leur permettre d'emporter une charge utile ; aussi était banni tout équipement non indispensable au vol.

Les premiers besoins qui ne pouvaient être satisfaits que par des matériels électroniques concernèrent les communications avec le sol, puis la navigation ; parallèlement, les progrès de l'électronique entraînèrent la réduction de la masse et du volume des équipements. De nouvelles applications ne cessaient d'apparaître : le combat entre l'arme et la cuirasse se retrouve ainsi dans le développement des matériels radar et de la guerre électronique.

L'électronique a donc vu ses applications à l'aéronautique s'étendre rapidement, pour répondre à des besoins nouveaux ou par suite de l'évolution technologique des équipements aéronautiques – l'électronique se substituant progressivement à l'électromécanique.

Ce développement conjoint de l'aéronautique et de l'électronique a été particulièrement accéléré par la Seconde Guerre mondiale. Aussi un Service des télécommunications est-il créé en 1947 ; il est « chargé, sur les directives des utilisateurs, des recherches, études, essais, réalisations, approvisionnements, modifications et réparations sur tous les matériels de télécommunications utilisés au sol et à bord pour les besoins de l'aéronautique »². Son encadrement est essentiellement constitué d'officiers de l'armée de l'Air, spécialistes des transmissions, dont une bonne partie ont reçu une formation en électronique, soit à l'École nationale supérieure des télécoms (ENST), soit à l'École supérieure d'électricité (Sup'élec), pendant la guerre pour les plus anciens, ou avant leur affectation au Service. Le premier directeur du service est le colonel Cazenave.

¹ Ingénieur militaire de l'Air, puis ingénieur de l'armement, Michel Bergounioux a effectué toute sa carrière, de 1954 à 1983, à la DTIA (Direction technique et industrielle de l'aéronautique), devenue la DTCA (Direction technique des constructions aéronautiques) en 1965, dont la plus grande partie au STTA, dont il fut le directeur de 1976 à 1979. Il devint ensuite directeur du STTE (Service technique des télécommunications et des équipements de l'aéronautique) à sa création, en 1980.

² Décret 47/818 du 10 mai 1947.

En 1948, le Service des télécommunications est intégré à la Direction technique et industrielle de l'aéronautique (DTIA) et devient le Service technique des télécommunications de l'Air, ses attributions n'étant pas modifiées³.

Ses activités se rapportent principalement à deux grands types de matériels. D'une part, ceux qui sont destinés à être montés à bord des aéronefs (radars, communications, navigation, contre-mesures). Ils sont destinés à s'intégrer dans un programme avion (ou hélicoptère) : aussi tout leur processus de développement et de réalisation – établissement des spécifications, choix du matériel, délais, budgets – est-il conduit en liaison étroite avec le Service technique aéronautique (STAé), l'avionneur, ainsi que l'état-major de l'armée de l'Air (EMAA) et le Service central de l'aéronautique (SC/Aéro) pour l'Aéronavale, ou bien l'état-major de l'armée de Terre (EMAT) pour l'aviation légère de l'armée de Terre (ALAT).

D'autre part, le STTA a en charge des matériels sol : soit ceux qui sont nécessaires à la mise en œuvre des aéronefs, et qui équipent les terrains de stationnement (communications, navigation, moyens de recueil et d'atterrissage), soit ceux qui constituent les réseaux d'infrastructure de défense aérienne ou de transmissions. Pour ces matériels, l'interlocuteur du STTA est, à l'état-major, le Bureau des programmes de matériels (BPM), dans la phase d'études et de développement, et/ou le bureau Trans, dans la phase de réalisation et de mise en service.

En outre, pour l'armée de l'Air, le STTA est chargé du développement et de la fourniture de tous les matériels de télécommunication. Cette situation est tout à fait particulière : en effet, pour l'armée de Terre et la Marine, les chefs d'état-major ont sous leur autorité les services chargés de faire étudier et réaliser leurs équipements d'infrastructure de transmission : le CDTAT (Commandement des transmissions de l'armée de Terre) et le STTM (Service technique des transmissions de la Marine).

La création de la DMA (Délégation ministérielle pour l'armement), en 1961, ne change pas ces pratiques. Aussi le STTA se voit-il confier la responsabilité de faire développer certains systèmes de transmissions à caractère interarmées ou gouvernementaux, responsabilité qu'il conserve jusqu'à la création de la DEI (Direction de l'électronique et de l'informatique) et du STEI (Service technique de l'électronique et de l'informatique) en 1984.

Le développement de l'électronique entraîne rapidement une évolution du travail des ingénieurs. En 1950, on raisonne essentiellement en termes d'« équipements ». Service technique et industrie étudient et développent émetteurs, récepteurs, antennes, calculateurs (analogiques), dispositifs de visualisation et d'exploitation, tous équipements qui remplacent progressivement les matériels étrangers en service dans l'armée de l'Air. Pour réaliser des ensembles plus complexes, ces matériels sont associés, lors d'essais en laboratoire, ou sur le terrain au Centre d'essais en vol de Brétigny-sur-Orge (CEV) ou au Centre d'expérimentations aériennes militaires de Mont-de-Marsan (CEAM).

Le Radar mobile lourd (RAMOLO pour les anciens) fut l'exemple d'une telle association : rassemblant radars, moyens radio, matériels de visualisation et

³ Décret 48/583 du 14 avril 1948.

d'exploitation, il constituait un ensemble « déplaçable » (plutôt que mobile) comportant toutes les fonctions des futures stations de défense aérienne ; mais il resta un exemplaire unique.

Très vite, les études de matériels d'infrastructure durent prendre en compte des notions non spécifiques d'un équipement particulier, comme la couverture du territoire, l'information du commandement sur la menace et les moyens, les liaisons et l'échange d'informations entre centres éloignés. Aussi les ingénieurs furent-ils amenés à raisonner en termes de « systèmes » ou de « réseaux » : le meilleur équipement n'a pas d'utilité s'il ne peut échanger ses données avec les autres constituants du système. Cette évolution fut confortée par les relations qui se nouèrent soit directement avec les Américains, soit avec les pays de l'OTAN, la France souhaitant être présente dans les grands projets alors en gestation (cf. les textes de Michel-Henri Carpentier sur la défense aérienne et le programme NADGE et de Jacques Clavier sur les réseaux d'infrastructure).

Pour les matériels destinés à être montés à bord d'aéronefs, l'évolution fut tout aussi naturelle. Dès l'origine, la conception des matériels devait tenir compte de l'environnement avion et de leur exploitation par le pilote : masse, encombrement, vibrations, alimentation électrique, liaisons avec la planche de bord ou les commandes pilote étaient définis avec l'ingénieur de marque du STAé, en liaison étroite avec l'avionneur. Mais, rapidement, les progrès de l'électronique aidant, les matériels étaient de plus en plus complexes, et certains échangeaient leurs informations avec beaucoup d'autres équipements. Ils devenaient ainsi des éléments indispensables à l'exécution des missions dévolues à l'avion : c'est le cas des radars aéroportés de conduite de tir, qui doivent intégrer dès leur conception les fonctions nécessaires – détection, poursuite, calcul, présentation au pilote, liaison avec l'armement (canons, missiles). Le DRAC 25 du Vautour N, étudié par CSF au début des années 1950, fut ainsi le premier radar de bord opérationnel français.

La notion de « système d'armes » apparaît avec le Mirage III, puis se généralise. Pour les avions militaires, la complexité croissante des systèmes, impliquant, à côté de l'avionneur, un grand nombre d'industriels équipementiers (électronique et armement), fait apparaître le besoin d'une structure qui veille à la cohérence des développements de la cellule et de ses équipements : c'est le rôle de l'équipe de coordination technique système d'armes.

ORGANISATION ET EVOLUTION

Organisation et effectifs sont étroitement liés aux attributions du service. Ils sont aussi marqués par certaines évolutions du ministère des Armées ou de la Défense touchant l'aéronautique, qui modifient ses domaines de responsabilité : la création de la Délégation ministérielle pour l'armement (DMA) en 1961 (elle devient Délégation générale pour l'armement en 1977), le changement d'organisation de la Direction technique des constructions aéronautiques (DTCA) en 1980, et la création de la Direction de l'électronique et de l'informatique (DEI) en 1984.

Le STTA avant la création de la DMA

Le Service des télécommunications créé en 1947 est organisé autour de deux sous-directions et des services communs.

La sous-direction technique comporte deux sections :

- une Section recherches essais (SRE), responsable des recherches amont : la DRME (Direction des recherches et moyens d'essais) n'existe pas encore ;
- une Section études prototypes (SEP), chargée des développements de matériels.

Quant à la sous-direction industrielle, elle regroupe les sections :

- production (SP), chargée des commandes de fabrication, de rechanges, de réparations et de documentation ;
- recette en usine (SRU), ancêtre du SIAR/électronique (Surveillance industrielle de l'armement) ;
- installations à terre (SIT) et installations à bord (SIB).

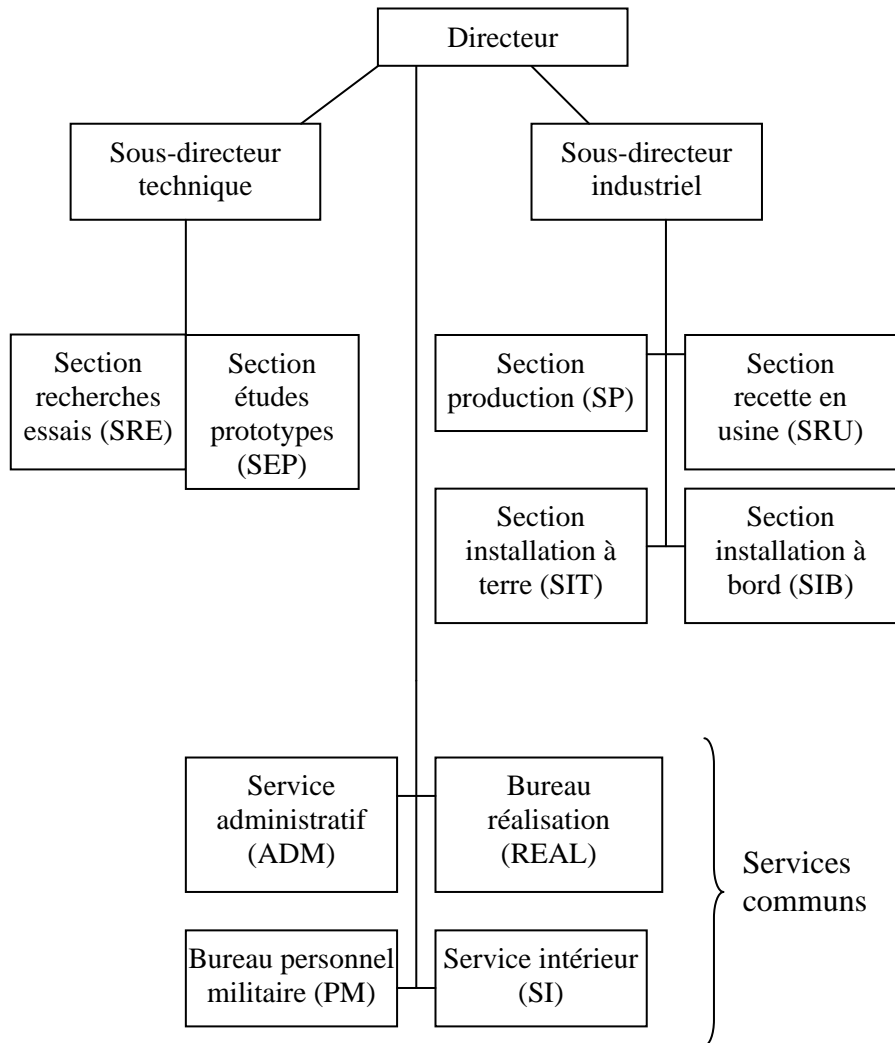
Enfin, les services communs regroupent service administratif, bureau réalisation (gestion et budget), personnel militaire et service intérieur (moyens généraux, sécurité). Ils sont rattachés directement au directeur et travaillent au profit des deux sous-directions.

À sa création, le Service utilise plusieurs implantations :

- le 129, rue de la Convention, qui est partagé avec les Circonscriptions aéronautiques régionales de Paris, et où sont installés la direction, la Section études prototypes, la Section production et les services communs. Tout le Service y fut ensuite progressivement regroupé ;
- des locaux des PTT, rue Jobbé-Duval, dans le XV^e arrondissement, et rue Jasmin, dans le XVI^e arrondissement, où cohabitent le CNET-Air, la SRE et les laboratoires d'études ou d'essais de prototypes (le colonel, puis ingénieur en chef Babin fut à la fois chef de la SRE et adjoint Air du directeur du CNET).
- une baraque en bois, dans la Cité de l'Air (Balard, XV^e arrondissement), où sont hébergées les Sections installations à terre et à bord jusqu'en 1953, date à laquelle ces sections rejoignent la rue de la Convention.

En 1948, le Service est rattaché à la DTIA, comme service extérieur. Il prend le nom de Service technique des télécommunications de l'Air (STTA) et se structure progressivement. À partir de cette date, les directeurs sont des ingénieurs militaires de l'Air (l'IC Pénin vient du Centre d'essais en vol, où il était chef des essais de matériels de télécoms). De jeunes ingénieurs de l'Air sont affectés au STTA à leur sortie de Sup'aéro ; ils complètent leur formation en électronique, comme les officiers de l'armée de l'Air, soit à l'ENST, soit à Sup'élec. Enfin, pour conforter les structures du service, un certain nombre d'officiers de l'Air, ingénieurs des télécoms ou de Sup'élec, sont intégrés dans le corps des ingénieurs de l'Air (Babin, Derbesse, Barraqué, Léonetti, Pilatre-Jacquin, Hognon, Bertrais, Carlier...) à partir de 1951.

Organigramme du STTA avant 1960



Le STTA de 1960 à 1980

En 1960, une réorganisation de la sous-direction technique du service voit la suppression des sections SRE et SEP et leur remplacement par deux nouvelles sections d'études dont les domaines de responsabilité sont pour l'une les applications radar, pour l'autre les communications.

La Section études radar (SER), dirigée par l'ingénieur en chef Louchart, comporte quatre bureaux : radars de bord (B1) ; radars sol (B2) ; contre-mesures (B3) ; traitement de l'information et visualisation (B4).

La Section études télécommunications (SET), dirigée par l'ingénieur en chef Long, regroupe également quatre bureaux : composants, ainsi que les études technologiques au bénéfice de l'ensemble du service (E1) ; radiocommunications (E2) ; radionavigation (E3) ; matériels « fil » et câbles hertziens (E4).

Simultanément, le départ des Circonscriptions aéronautiques régionales de la rue de la Convention permet d'abandonner les implantations de la rue Jobbé-Duval et de la rue Jasmin et de regrouper l'ensemble du service, y compris les deux laboratoires d'essais de matériels prototypes (baptisés, du nom de leurs chefs, labo Raison pour le radar et labo Regnaut pour la radio). Seuls restent en dehors de la rue de la Convention les laboratoires d'essais (LE) installés dans la batterie de l'Yvette, à Palaiseau, qui emploient une centaine de personnes.

La création de la Délégation ministérielle pour l'armement (DMA), décidée en avril 1961, entraîne des modifications dans les attributions du STTA en réduisant ses domaines d'intervention et de responsabilité, au rythme de la mise en route de nouvelles structures :

- la Direction des recherches et moyens d'essais (DRME)
- le Service de la surveillance industrielle de l'armement (SIAR)
- le Département électronique (DEL), qui devient en 1965 le Service central des télécommunications et de l'informatique (SCTI).

La création de la DRME n'a pas immédiatement de répercussion importante sur le travail du service, en dehors de l'augmentation progressive du nombre des réunions et des « fiches » pour les ingénieurs : nouvelles procédures, préparations des plans pluriannuels des recherches et études (PPRE), groupes de coordination dans les domaines de l'électronique. L'essentiel, c'est-à-dire les relations et les méthodes de travail entre le STTA et l'utilisateur (EMAA/BPM et EMAA/TRANS principalement) est conservé, du moins pour un certain temps.

En revanche, le transfert des activités de la Section recette en usine (SRU) au SIAR a pour conséquence la disparition en 1965 de cette section et la mutation de ses personnels.

De même, le Centre d'électronique de l'armement (CELAR), établissement dépendant du SCTI, est créé en 1968 à Bruz, à 15 km de Rennes, dans le contexte de décentralisation des activités électroniques vers la Bretagne. Il est destiné à regrouper tous les moyens d'essais, d'analyses et d'évaluation de la DMA dans les domaines des composants et des matériels électroniques. En conséquence, le 1^{er} mai 1970, tous les laboratoires du STTA (labos Raison, Regnaut et Palaiseau) sont rattachés au CELAR. À partir de cette date, per-

sonnels et activités sont progressivement transférés à Bruz, où ils constituent l'essentiel de la division EMAC du CELAR, chargée des essais et évaluations des matériels et composants électroniques.

Ces transferts d'activités au SIAR et au CELAR eurent quelques conséquences sur les rapports du service avec l'industrie ; les ingénieurs d'études ou de marque ressentirent une certaine limitation de leur action – ce sentiment dépendant beaucoup de leur personnalité.

Globalement, en 10 ans, le STTA perdit plus du tiers de ses effectifs : ceux-ci, qui évoluaient entre 500 et 550 au début des années 1960, se situent autour de 325 après 1970, dont un tiers d'ingénieurs (ingénieurs de l'armement, ingénieurs des travaux, officiers, ingénieurs civils).

Le Service technique des télécommunications et des équipements aéronautiques (STTE)

Des réflexions ou des études, plus ou moins approfondies, ont régulièrement été menées sur les problèmes d'organisation de la DTCA (Direction technique des constructions aéronautiques, qui a remplacé la DTIA en août 1965).

À la fin des années 1970, la décision fut prise :

- de regrouper les fonctions études, développement et production pour un même produit, la séparation entre elles devenant de plus en plus discutable dans le cadre d'un raisonnement en termes de programme ;
- de rassembler autour du STTA l'essentiel des activités équipements et armements des anciens services STAé et SPAé (Service de la production aéronautique), cette évolution devant faciliter les approches « systèmes » et « intégration » dans les programmes aéronautiques.

En 1971, les missiles aéroportés air-air ou air-sol en développement, jusqu'alors sous la responsabilité de la DTCA, avaient été transférés au STET (Service technique des engins tactiques) pour être regroupés avec les missiles tactiques des autres directions. La section armement-missiles du STAé conservait la responsabilité de l'intégration des missiles aux avions et le suivi en service des missiles qui avaient été développés par le STAé.

Au 1^{er} janvier 1980 étaient donc créés :

- le STPA (Service technique des programmes aéronautiques), résultant de la fusion du STAé et du SPAé, chargé des programmes avions, hélicoptères et moteurs, civils et militaires (études, développement, production...) et le SCPM (Service central de la production, des prix et de la maintenance).
- le STTE, qui accueillait les sections équipements (pour l'essentiel) et armement du STAé et du SPAé et regroupait par produit les activités d'étude-développement, de production et d'installations. Le STTE était organisé en cinq départements : avionique (AVI), armement-reconnaissance (AR), détection aéroportée-contre-mesures (DAC), détection-commandement-contrôle (DCC), communications (COM).

En 1982, la question d'une restructuration du domaine de l'électronique et de l'informatique au sein du ministère de la Défense est de nouveau posée. Des rapports du Contrôle général des armées et du délégué général pour l'arme-

ment sont remis en 1983 au ministre, qui décide de créer une Direction de l'électronique et de l'informatique (DEI), s'appuyant pour la conduite des études et des réalisations sur un service technique, le STEI.

Le décret 84/375 du 26 avril 1984 fixe leurs attributions :

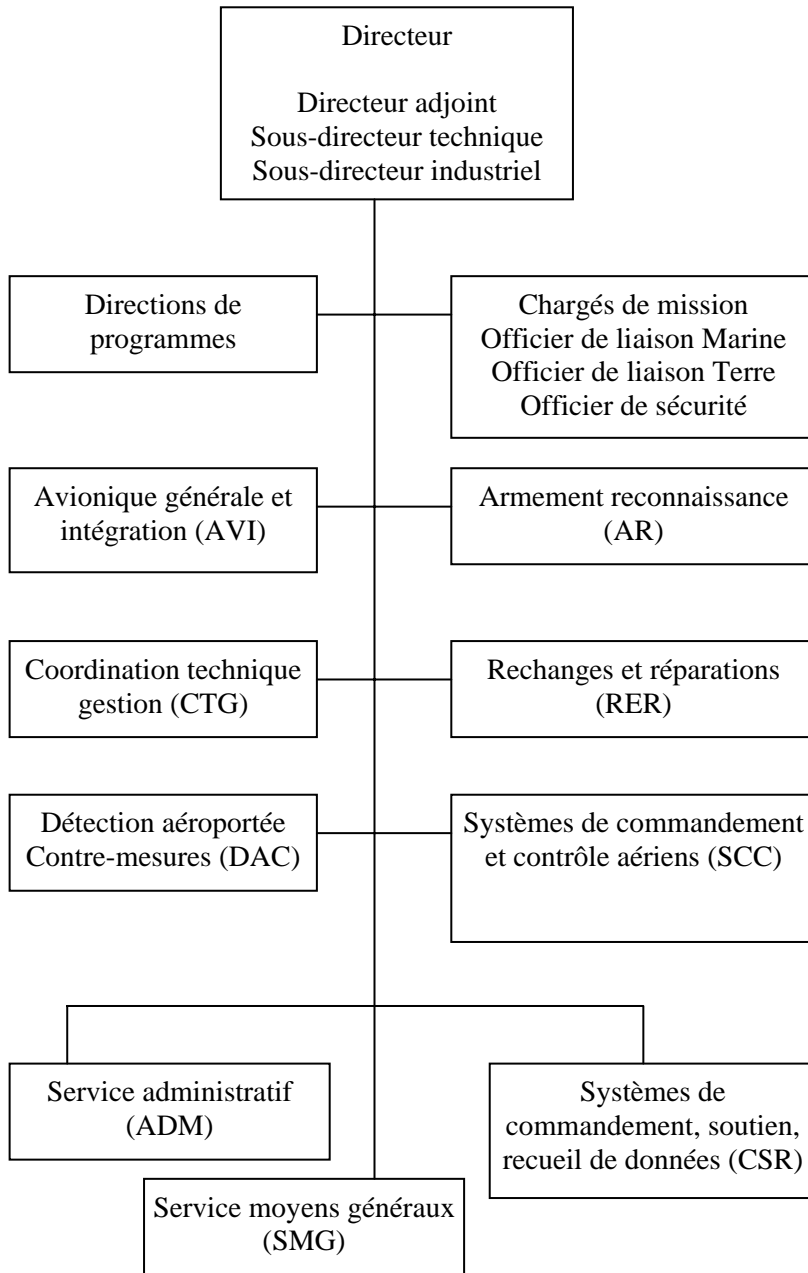
- renforcement de la coordination exercée jusqu'alors par le SCTI ;
- étude et développement des produits susceptibles d'applications multiples : composants électroniques, calculateurs d'usage général, langages de programmation, protection de l'information ;
- réalisation des systèmes de transmission et des systèmes de commandement destinés à la mise en œuvre des armements nucléaires, pour la satisfaction des besoins gouvernementaux ou de l'état-major des armées, et celle de certains besoins, comme les réseaux d'infrastructure, exprimés par des états-majors d'armée.

En conséquence, le STTE transfère au STEI ses activités dans le domaine des transmissions nucléaires, gouvernementales ou d'infrastructures (transmissions extérieures SSBS, Réseau Air 70 durci...) et supprime son département COM. Les activités restantes de ce département (essentiellement les communications radio sol-air-sol et l'identification) sont reprises par le département AVI, ce qui facilite l'évolution vers l'avionique intégrée.

Le STTE subit ensuite d'autres évolutions, comme la création de directions de programmes : Système de détection aéroporté, ou SDA (ce système concerne les avions de détection lointaine AWACS E3 commandés à Boeing en 1987, les ingénieurs du STTE assurant la négociation, la réception, etc.), ou encore Système de commandement et de contrôle des opérations aériennes (SCCOA, lancé au début des années 1980). Un nouveau département fut également créé : celui des systèmes de Commandement, soutien et recueil de données (CSR).

Mais ces évolutions ne remettaient pas en cause les domaines de responsabilité du service, ni les principes d'organisation de la DCAé indiqués ci-dessus... jusqu'au 1^{er} janvier 1997, date à laquelle la réorganisation de la DGA entraîne la disparition de la DCAé et, par voie de conséquence, celle du STTE.

Organigramme du STTE en 1990



CHAPITRE 3

LES COMPOSANTS ET MATERIAUX DE BASE

LA PERIODE 1957-1960

par Michel-Henri Carpentier¹

Parallèlement à son activité « systèmes et équipements », le STTA s'était fixé la mission de veiller à ce que l'industrie française bénéficie d'une indépendance suffisante dans le domaine des composants électroniques.

Cela se traduisait, à la Section études et prototypes (SEP), par une action menée avec opiniâtreté en particulier par le « commandant » Naves (en réalité ingénieur principal des travaux)², qui s'informait, auprès de ses collègues du STTA, des types de composants étrangers entrant dans les prototypes et passait alors des contrats avec l'industrie française des composants pour les faire « franciser ».

La Section recherches et essais (SRE) agissait plus en amont. Elle veillait à ce que les technologies³ de base qui devaient se révéler ensuite indispensables en matière de composants électroniques fussent développées au sein de notre industrie. Il s'agissait même parfois d'en lancer de tout à fait inédites, pour donner à nos équipements un avantage par rapport à ceux de nos amis américains ou britanniques.

Les partenaires industriels (qui recevaient les contrats d'études) étaient assez nombreux et variés ; on peut citer parmi eux :

- le Centre de recherches physico-chimiques (RPC) de CSF, à Puteaux, dirigé par André Danzin, assisté du « baron » Xavier Ameil (qui eut plus tard un rôle important, avec J.-P. Vasseur, dans le développement de la cryptographie moderne en France, et un rôle déterminant dans l'affaire *Farewell...* d'espionnage en URSS au profit de la France) ;
- le Centre de recherches en tubes électroniques de CSF, à Corbeville, dirigé par M. Warnecke assisté de P. Guenard ;
- les centres de tubes électroniques de Radiotechnique à Suresnes et de CSF/SFR à Levallois ;
- le petit département de semi-conducteurs de Thomson, rue de Cronstadt à Paris, avec MM. Maillard et Dreyfus ;
- les laboratoires d'hyperfréquences de LTT, dirigés par Bernard Chiron ;
- le petit département de magnétrons de M. Swobada, d'abord à Radio-Industrie, puis à LTT ;
- le département Tubes hyperfréquences de Thomson, avec R. Métivier et J.-E. Picquendar.

¹ Michel-Henri Carpentier a été, en tant qu'ingénieur militaire de l'Air, chargé d'études et recherches en composants électroniques au STTA de 1957 à 1960.

² En raison du passé dans l'armée de l'Air d'une partie des membres du Service, les grades militaires y étaient souvent utilisés parallèlement aux grades d'ingénieurs militaires.

³ Ce terme recouvrait les matériaux élaborés, les techniques d'usinage, les structures.

Du côté du STTA/SRE, il faut retenir les noms de l'ingénieur militaire M.-G. de Coligny, qualifié parfois de « visionnaire » (avec les risques que cela comportait), ou encore d'hommes imaginatifs comme l'ingénieur militaire Jean Bertrais et le capitaine Hervé, ainsi que de Maurice Fouilliart, promu de maître-ouvrier à ingénieur après des soirées de travail, et qui a consacré plus de quarante années de sa vie aux composants électroniques.

Parmi les recherches initiées dans le domaine des matériaux, on peut citer les études de tellurure de bismuth fritté (dopé n ou dopé p) menées par le « mandarin » Tien Chi, du RPC, en vue de réaliser des structures à effet Peltier⁴, et les études de plastocéramiques de titanate de baryum (et d'autres titanates) par M. Peyssoux, également du RPC. Si les premières ont conduit à peu d'applications dans le monde occidental, alors que les Russes ont largement utilisé des techniques très voisines pour des alimentations rustiques de radars militaires, les études sur le titanate de baryum ont permis de développer toute une industrie de condensateurs céramique à LCC.

Dans le domaine des dispositifs électroniques amplificateurs, le STTA a financé successivement la technologie des « tubes miniatures », puis celle des tubes « subminiatures », en même temps que celle des tubes « crayons » conçus pour les utilisations à fréquences très élevées.

Il a enfin financé le début du développement des semi-conducteurs, d'abord au germanium au RPC, qui développa le premier récepteur à transistors (J.-P. Vasseur), dénommé SOLISTOR, très esthétique, mais dont la fréquence intermédiaire n'était que de 155 kHz, à cause de la médiocre fréquence de coupure des transistors germanium du RPC.

En 1957, le STTA passait en parallèle deux contrats d'étude pour des composants au silicium : diodes redresseuses de petite, moyenne et « grande » intensité et transistors, auxquels on ne demandait que d'amplifier. Ces contrats étaient passés d'une part au RPC, d'autre part à Thomson-Cronstadt. Le vendredi saint de 1958, le signataire de ces lignes réceptionnait avec Maurice Fouilliart, dans les laboratoires de Thomson, les cinq premiers transistors au silicium français. Ces transistors, comme les diodes redresseuses, étaient réalisés par alliage, et de performances réduites. Un contrat fut ensuite passé en 1959 (avec succès) à l'équipe Dumas créée à SILEC, pour réaliser des diodes silicium redresseuses de course, avec une technique de « double diffusion » acquise aux États-Unis lors des études doctorales de Dumas.

De Coligny avait lancé au milieu des années 1950 l'étude d'un tube fonctionnant à très basse température, l'indicateur C. Vingt ans trop tôt, sans doute : il fallut en effet attendre ce délai pour utiliser des techniques cryogéniques de ce type, dans les amplificateurs refroidis des stations terriennes par exemple.

Mais le domaine privilégié des investigations pilotées par la section SRE du STTA est celui des dispositifs et tubes hyperfréquences. Outre les études de circulateurs à ferrites financées à LTT, des études de magnétrons de puissance ont été financées par le STTA dans l'industrie, en bande S ($\lambda = 10$ cm) et en bande X ($\lambda = 3$ cm) à LTT, cependant que la SEFT (Section d'études et fabrica-

⁴ L'effet Peltier marche dans les deux sens : d'une part, en faisant passer un courant dans le dispositif, on refroidit une jonction par rapport à l'autre ; d'autre part, en chauffant une jonction par rapport à l'autre, on fournit du courant électrique.

tions des télécommunications de l'armée de Terre) finançait des développements en bande Q ($\lambda = 0,8$ cm) à la même équipe LTT, celle de Swobada et Jullierat.

Même si la DMA n'existait pas encore, le STTA, la SEFT et le STCAN (Service technique des constructions et armes navales) s'étaient en outre parfaitement entendus pour se répartir le financement du développement (réalisé par l'équipe Guenard de CSF-Corbeville) des premiers tubes (au monde) amplificateurs « à champs croisés ». Il s'agit des TPOM, que la Marine utilisa dans ses radars DRVI 23 (en bande L : $\lambda = 23$ cm), que la SEFT envisageait d'utiliser dans le radar AC 12 du système de missiles PARCA (qui ne vit pas le jour), et que l'armée de l'Air... hollandaise utilisa dans ses radars CSF de défense aérienne en bande S.

L'APRES-1960

par Alain Crémieux⁵

L'option « R » (radioélectricité) à l'École nationale supérieure de l'aéronautique en 1959-1960

Mon premier contact avec les composants électroniques doit dater de 1958, alors que je subissais, en deuxième année de Sup'aéro, le cours d'électronique de M. Vasseur, ingénieur à la CSF Puteaux. Il distinguait entre composants « actifs » et composants « passifs » sans nous en avoir jamais donné la définition et sans trop se soucier d'être ou de ne pas être compris. Je lisais *Le Monde* au dernier rang, me rassurant de ce que je n'étais pas le seul à ne rien comprendre à l'électronique. J'y ai repensé souvent depuis, essayant d'être plus clair que la plupart des électroniciens lorsque je parle à des non-électroniciens. Le caractère abscons de l'électronique puis de l'informatique n'est pas un élément négligeable pour comprendre le pourquoi de certaines décisions. En électronique plus qu'ailleurs, elles ont été prises par des décideurs auxquels manquait la compétence technique, ce qui n'a rien d'exceptionnel ni de honteux, mais à qui leur bon sens n'était d'aucune aide, ce qui est plus grave et ne se produit pas dans les autres techniques, où, plus qu'en électronique ou en informatique, on peut tout expliquer « avec les mains ».

Toujours est-il que mes mauvaises notes en électronique (et dans les autres matières) me conduisirent à terminer cette année de Sup'aéro dans les derniers parmi les seize ingénieurs de l'Air de la promotion et à ne pouvoir choisir que l'option... électronique. On pourra d'ailleurs réfléchir aux motivations qui pouvaient conduire tous les ingénieurs de l'Air de notre promotion à choisir d'abord les structures d'avions, ensuite les moteurs et les équipements de bord, et à laisser aux malheureux derniers la technique la plus moderne !

La troisième année, en option « R », pour radioélectricité, car le mot « électronique » n'était pas encore sorti des laboratoires, ne me convainquit pas que

⁵ Alain Crémieux a été, en tant qu'ingénieur militaire de l'Air, chargé d'études et recherches en composants électroniques au STTA de 1960 à 1965, puis sous-directeur Électronique et chargé de mission interministériel pour les composants électroniques au ministère de l'Industrie de 1976 à 1982, et directeur adjoint de la DRET de 1987 à 1990.

ce domaine était mon fort, mais je réalisai qu'il n'était pas totalement incompréhensible. Le projet de radar, en fin d'année, réalisé sous la direction de Bertrand Daugny, récent créateur de l'Électronique Marcel Dassault, fut l'un des moments forts de mon passage à Sup'aéro. Parmi mes professeurs, je me souviens de Michel Carpentier, qui surestimait un peu notre vitesse de compréhension, de Marc Colonna, particulièrement clair, de Félix Gadelle, récemment disparu, et d'un ingénieur de la CSF qui s'appelait Thourel et qui était à l'époque le « pape » des antennes.

Mon désir, après Sup'aéro, était de partir un an au moins aux États-Unis, et mon dossier pour Stanford était accepté lorsque Jean-René Maillard (qui fit ensuite carrière dans la banque), Régis Dabas (qui disparut dans l'accident du Boeing d'Air France à Pointe-à-Pitre) et moi-même, les trois ingénieurs de l'option « R », apprîmes que M. Pénin, le respecté directeur du Service technique des télécommunications de l'Air (le STTA), qui était à l'origine de la création de l'option « R » dont nous étions les premiers cobayes, considérait que l'année aux États-Unis dont avaient profité certains de nos anciens, comme Beignot-Devalmont, n'était pas réellement « coût-efficace » et qu'il valait mieux exploiter le jeune ingénieur le plus tôt possible.

Jeune ingénieur au STTA : 1960

De prime abord, le STTA n'apparaissait pas comme particulièrement attractif. Les locaux de la rue de la Convention n'étaient pas lugubres mais presque, et je partageais un bureau avec trois autres ingénieurs et quatre téléphones. Maurice Fouilliart avait débuté comme ouvrier, avait passé le concours d'entrée dans les universités, terminait une licence de physique et venait d'être nommé ou allait être nommé ingénieur. Colette Kreder fut plus tard l'énergique directrice de son École, l'École polytechnique féminine (EPF). Je parlerai plus longuement de Jean Bertrais.

Au deuxième abord, le STTA devenait vite beaucoup plus sympathique. L'ambiance de travail y était bonne, les relations avec les industriels étaient directes, chaque ingénieur suivait ses contrats de bout en bout, ce qui l'obligeait à traiter non seulement les questions techniques, mais aussi les questions administratives. Comme elles étaient imbriquées, l'effort que cela représentait était tout à fait récompensé par le sentiment de tenir toutes les extrémités de l'écheveau.

Le début des années soixante était une période de foisonnement technologique. Le radar sortait des limbes, l'informatique faisait son apparition avec le STRIDA (Système de transmission et de représentation des informations de défense aérienne) et les télécommunications continuaient une aventure technologique qui avait débuté avec la radio du général Ferrié et qui n'est pas achevée aujourd'hui. On en était aux balbutiements des faisceaux hertziens. Mais venons-en aux composants.

Les composants électroniques au bureau E1 : 1960-1965

Il ne s'agissait pas, dans le vocabulaire de l'époque, de composants, mais de « pièces détachées ». Ou plutôt, il commençait juste à s'agir de « composants électroniques », et le terme de « pièces détachées », par trop réducteur et marginalisateur, commençait à disparaître.

Au STTA, l'ingénieur principal de l'Air Jean Bertrais était, à la tête du bureau E1 (recherches et composants) de la Section études télécommunications (SET), le champion des composants. Il aimait à dire que sans composants, il n'y aurait pas de matériels, et pensait que c'était le progrès des composants qui entraînait le progrès des matériels. Il croyait certainement plus au *technology push* qu'au *military pull* et, à l'époque, il n'avait certainement pas tort.

Jean Bertrais n'était pas polytechnicien, ce qui, dans le corps des ingénieurs de l'Air, était rare mais n'était pas une exception. Né en 1918, mobilisé en 1939, en « taupe » ensuite au Maroc, il avait été de nouveau mobilisé en 1942 et avait fait campagne, dans l'artillerie je crois, en Tunisie d'abord puis, à la fin de la guerre, en Allemagne. Il était resté dans l'armée après la guerre, avait suivi les cours de l'École supérieure des télécommunications et avait été intégré dans le corps des ingénieurs de l'Air en 1951 ou 1952, ainsi que d'autres officiers, quand le corps s'était aperçu brusquement qu'il n'avait pas d'électroniciens. Au sein du corps, il avait une réputation d'original que son goût pour l'occultisme et les médecines douces renforçait. Il était aussi un Rosicrucien de haut rang, mais je ne l'appris que bien plus tard, lors de ses obsèques, à la fin des années soixante-dix. Il croyait fermement à la technique et considérait, avec raison à l'époque, que la hiérarchie sous-estimait toujours les progrès possibles.

En m'accueillant, en septembre 1960, il me tint le langage suivant : « Pour les matériels électroniques, on est passé il y a quelques années par l'étape de la miniaturisation ; ensuite, on a encore diminué la taille des matériels et notamment des matériels de bord, et c'est ce qu'on a appelé la subminiaturisation ; nous en sommes aujourd'hui à préparer la microminiaturisation ». Ni lui, ni moi, ni personne à l'époque je crois, n'imaginait que cette microminiaturisation allait non seulement transformer les équipements aéronautiques de bord, mais bouleverser l'ensemble de l'électronique, de l'industrie et même de la société !

Plus prosaïquement, il s'agissait de soutenir les industriels qui, ayant travaillé dans le domaine des transistors, cherchaient les voies des étapes suivantes. Plusieurs d'entre eux travaillaient dans des directions diverses.

La CSF, qui n'avait pas encore fusionné avec Thomson (il s'en fallait de près de dix ans), travaillait dans de vieux laboratoires, à Puteaux, sur des terrains qui étaient en voie d'expropriation dans le cadre de l'opération de La Défense. L'ingénieur Grosvallet (qui disparut prématurément quelques années plus tard) et son adjoint Leclerc exploraient la voie des circuits solides, qui devait triompher grâce à la technologie *plana*⁶ et donner naissance aux circuits intégrés et aux microprocesseurs. C'était la voie suivie aux États-Unis par l'*US Air Force*, chez Texas Instruments (TI), et on savait – on n'en était pas absolument sûr mais on le devinait progressivement – que ce n'était pas une impasse. On en-

⁶ Technologie dans laquelle tous les composants sont réalisés par différentes opérations chimiques sur la face supérieure plane du silicium.

trevoyait même, sans doute pas en 1960 mais certainement en 1964, que l'effet de champ permettrait des progrès encore plus spectaculaires. Cet effet de champ permit de réaliser des *Field Effect Transistors* (FET), et surtout donna ensuite naissance à la technologie MOS (*Metal Oxyd Semiconductor*), d'usage général dans les circuits intégrés d'aujourd'hui.

Le STTA a donc passé, en 1960, puis en 1962 et ensuite, plusieurs marchés avec la CSF ; ces contrats peuvent être considérés comme l'origine lointaine de la société franco-italienne STM, le n° 9 mondial des semi-conducteurs. Nous n'étions pourtant pas sûrs de nous. Après tout, depuis les débuts de l'électronique et même depuis ceux de l'électricité, les composants, qu'ils soient actifs ou passifs, avaient toujours été soigneusement isolés électriquement les uns des autres, et pour cela, ils avaient toujours été isolés physiquement. L'intégration sur un même bloc de silicium supposait des dopages sélectifs que l'on était loin de maîtriser. Par ailleurs, c'était l'époque où le rendement de fabrication des transistors élémentaires, et de tous les composants élémentaires d'ailleurs, était loin d'être égal à 1. Comme on n'imaginait pas qu'il puisse approcher de 1 au point de se représenter par un zéro suivi d'un nombre impressionnant de neuf après la virgule, il était facile de démontrer que tout composant comportant plus d'une dizaine de transistors sur la même plaquette serait affligé d'un rendement de fabrication voisin de zéro ! Et il en allait de même pour la fiabilité potentielle des circuits intégrés. Il ne s'agit pas là de souvenirs de vagues conversations, mais bien de ce qui était évoqué dans les colloques internationaux du moment sur le sujet.

C'est ce qui explique que le STTA ait aussi suivi une autre piste avec Thomson, associée à la GeCo américaine au sein de la SESCO, dont l'ingénieur responsable était un ancien légionnaire, M. Lagorse (qui alla ensuite chez LTT, changeant d'employeur à la mode américaine). De même que la CSF occupait encore les locaux vétustes de son établissement de Puteaux, Thomson avait ses laboratoires à Paris, dans le treizième arrondissement, rue de l'Amiral-Mouchez. On était loin des immeubles flambant neufs de la Route 128, autour de Boston, ou de la *Silicon Valley*, au sud de San Francisco !

La méthode SESCO était beaucoup plus modeste. Elle se fondait sur l'idée que la très haute intégration était impossible ou très lointaine, et qu'il valait mieux concentrer ses efforts sur une étape intermédiaire de miniaturisation par un facteur de l'ordre de 10, en recourant simplement à des méthodes astucieuses d'assemblage (de *packaging*).

Les Américains remplaçaient un certain nombre de leurs circuits imprimés – méthode développée au cours des années cinquante et toujours employée aujourd'hui – par des circuits « fagots » (*cordwood* en anglais), dans lesquels les composants élémentaires étaient rangés parallèlement entre eux et perpendiculairement à deux couches de circuits imprimés, qui les encadraient comme les bats-flancs d'une charrette dans laquelle on a jeté un fagot en travers. Par ailleurs, la société RCA, soutenue par l'*US Army*, avait développé la technologie des « micromodules », dans laquelle chaque composant était mis sur une plaquette de céramique d'environ 1 cm², une technique dont la densité était congénitalement limitée à une dizaine par cm³. La CSF, au sein d'une équipe différente de celle de Puteaux, travaillait sur cette technique pour la SEFT. Elle

abandonna vers le milieu des années 1960, quand le succès des circuits intégrés fut devenu indiscutable.

Cette « deuxième voie » suivie par Thomson, ou plus exactement par la SESCO, consistait à loger plusieurs composants dans le capot traditionnel, dit TO 5, en forme de chapeau haut-de-forme de 5 mm environ de diamètre et de 5 mm de hauteur, qui avait été utilisé depuis une dizaine d'années pour encapsuler les transistors individuels. Au lieu des trois « pattes » de connexion qui dépassaient de la base d'un capot de transistor, une douzaine de pointes individuelles donnaient à ces capots TO 5 l'air de circuits intégrés. Malheureusement, les petits transistors, les diodes et les résistances devaient être soudés individuellement aux pignoches ; la méthode était chère, d'un mauvais rendement et d'une mauvaise fiabilité. Elle fut abandonnée, mais elle avait séduit entre temps la société LCT, qui envisageait de l'utiliser pour certains de ses matériels : cela nous conduisit à la poursuivre trop longtemps. De multiples réunions tripartites STTA-LCT-SESCO ne se résolvèrent pas à faire disparaître l'objet qui justifiait leur existence. Je ne puis le reprocher à leur président, puisqu'il s'agit de l'auteur de ces lignes, et il faudrait demander à mon successeur Michel Scheller, qui vient de quitter la présidence de l'ONERA, comment il a géré cet héritage.

Ces difficultés nécessitent une seconde de réflexion. On peut se demander comment on a pu se tromper à ce point. Cela me paraît résulter de deux éléments.

L'un est la difficulté, pour l'ingénieur de l'État, de connaître dans tous les détails nécessaires les caractéristiques techniques qui détermineront l'offre. Comment, à partir de son bureau du STTA, prévoir les densités et la fiabilité de circuits intégrés futurs ? Comment comprendre vraiment si les dopages permettront d'atteindre telle ou telle résistivité ? La connaissance du présent est déjà très floue. Est-ce différent dans le domaine des matériels ? Les ingénieurs qui travaillaient sur le décollage vertical à la même époque ne semblent pas non plus avoir été capables de prévoir que le Mirage III V (à décollage vertical) à moteurs de sustentation n'aurait jamais une autonomie satisfaisante, tandis que la déviation de jet ferait du P 1127 un avion acceptable pour la Marine.

L'autre élément est non pas simplement la difficulté, mais bien la réelle impossibilité de prévoir la demande future. Il était de bon ton, au début des années soixante, de dire que la microminiaturisation verrait ses limites du côté de la demande. La taille des doigts ne diminuerait pas, et encore les gants rendaient-ils les doigts un peu plus volumineux et un peu plus gourds, ce qui faisait qu'il y avait une limite à la miniaturisation désirable des matériels. Ce qu'on ne voyait pas, c'est qu'un matériel donné, un poste de radio de bord par exemple, garderait une taille approximativement constante, mais que sa complication augmenterait pour profiter de la miniaturisation des composants.

Que dire de plus sur les circuits intégrés ? Sans doute que les missions que je fis à cette époque aux États-Unis eurent beaucoup d'importance. Elles avaient lieu dans le cadre des contrats dits MWDDEA. On a relativement beaucoup écrit sur les contrats MWDP (*Mutual Weapon Development Program*), ou contrats Larkin (du nom d'un général américain en poste à l'Ambassade des

États-Unis à Paris). Ces contrats MWDP permettait en effet aux industriels français de recevoir de l'argent américain en contrepartie d'études, et ils étaient très appréciés. La CSF en reçut pour les tubes pour radars, et en particulier pour ses études de carnotrons. Les contrats MWDDEA, pour *Mutual Weapon Development Data Exchange Agreement*, étaient moins célèbres, car aucun financement ne leur était associé. Il s'agissait simplement d'un échange d'informations entre les deux administrations – dans le cas qui nous intéresse, entre l'armée de l'Air française et l'*US Air Force*.

Il y avait un MWDDEA sur les composants électroniques, et les responsables étaient, du côté américain un certain Marwin Miller, un civil, et du côté français Jean Bertrais, puis moi-même à partir de 1962. Cela me permit de faire deux voyages d'étude aux États-Unis, l'un en novembre 1962 (ma première traversée de l'Atlantique, dans un Boeing 707 tout neuf), puis un autre en 1964. Ces deux voyages me permirent de prendre le pouls de l'industrie des composants américaine, et de revenir chaque fois avec plus fermement ancrée l'idée que les circuits intégrés sur un bloc de silicium étaient en train de gagner la course à la microminiaturisation. Toutes les informations rapportées des États-Unis n'étaient pourtant pas de première qualité ; en particulier, je revins d'un troisième voyage, effectué en mai 1965 dans le cadre d'une première mission Plan calcul, avec la conviction que l'industrie était en train de se « verticaliser » et que chaque fabricant de calculateurs allait fabriquer ses propres composants, ce qui devait se révéler complètement ou presque complètement faux.

Il n'y avait pas que la France et les États-Unis. Il ne faudrait pas oublier le Royaume-Uni et les Pays-Bas. À l'époque, je ne fréquentais pas l'Allemagne et ignorais Siemens ou Telefunken, qui n'étaient pourtant pas négligeables.

Mes missions au Royaume-Uni avaient lieu dans le cadre d'une coopération décomposée en AFCP, les *Anglo-French Cooperation Projects*, et je suis devenu le *Project Officer* de l'AFCP sur les composants actifs, y compris les circuits intégrés. Les Britanniques n'étaient pas en avance sur nous au plan industriel, et ne devaient finalement pas mieux réussir, sinon par des filiales de sociétés américaines ou japonaises implantées en Écosse et se limitant à la fabrication. En revanche, ils étaient très en avance sur le plan de la recherche. Les *Research Establishments* du *Ministry of Defence* étaient à leur apogée. Dans le domaine des composants, il s'agissait pour les tubes électroniques du SERL (le *Signal and Electronic Research Laboratory*) de Baldock, à une cinquantaine de kilomètres au nord de Londres, et, pour les semi-conducteurs, du RARDE (le *Royal Aeronautics Research and Development Establishment*), devenu ensuite le RRE (le *Royal Radar Establishment*) de Great Malvern, à la limite de l'Angleterre et du Pays de Galles. Ces missions eurent une grande importance pour moi, puisqu'elles me permirent de découvrir qu'il existait un poste pour un ingénieur de l'Air à l'ambassade de France à Londres, où je fus affecté de 1965 à 1968, et qui détermina l'orientation internationale de ma carrière ; elles me permirent aussi, à l'époque, de rencontrer le docteur G.W. Dummer, responsable de la microminiaturisation à Great Malvern et qui est reconnu aujourd'hui comme l'un des précurseurs des circuits intégrés.

Aux Pays-Bas, c'était Philips. Le laboratoire central de Philips à Eindhoven était impressionnant par la qualité de ses ingénieurs et par la taille de

l'établissement. Nous avons une politique ambiguë vis à vis de Philips et de sa filiale française, la Radiotechnique. D'une part, Bertrais ne voulait pas « travailler pour la Reine de Hollande », mais d'autre part, la Radiotechnique se caractérisait par une réelle qualité de travail, alors que Thomson et la CSF étaient déjà sujettes aux reproches d'engourdissement, de « fonctionnarisation » dans le mauvais sens du terme. Tous ses personnels en France étaient français. Les financements que nous accordions à la Radiotechnique étaient abondés par des financements Philips, ce qui correspondait à un effet de levier non négligeable. Nous financions donc aussi la Radiotechnique, pour des montants plus faibles que ceux reçus par les sociétés purement françaises, notamment pour des études d'arséniure de gallium (AsGa), dont nous étions conscients de la capacité à faire monter les transistors, et éventuellement les circuits intégrés, à des fréquences supérieures à celles autorisées par le silicium. Tel est bien le cas aujourd'hui : il y a de l'arséniure de gallium dans les amplificateurs d'antennes paraboliques et dans les antennes de radars les plus modernes.

Enfin, on ne peut quitter les circuits intégrés sans évoquer les Américains implantés en France : Texas Instruments et Motorola.

En 1960, Texas Instruments n'était pas encore installée dans les locaux modernes de Villeneuve-Loubet. Elle se trouvait modestement dans des locaux provisoires à Nice. Ses personnels étaient déjà tous français, ou presque, sauf le directeur, qui était encore un Texan, du nom de Mitchell si mes souvenirs sont exacts. Il s'agissait à coup sûr d'un transfert de technologie vers la France qui avait ses bons côtés mais, dans l'ambiance de l'époque, l'investissement étranger était plutôt considéré comme une colonisation et une atteinte à l'indépendance (et à l'orgueil) nationale. Mon compte rendu de mission se terminait par la remarque qu'à TI-Nice, « on parle le dallassien ».

Motorola, quant à elle, ne s'est installée à Toulouse qu'en 1968. Son directeur du personnel était adjoint au maire (le socialiste Boudigues) et me semblait avoir pour tâche d'expliquer à ses patrons américains comment on pouvait travailler avec des « rouges » et aux socialistes du sud-ouest comment on pouvait s'accommoder de la présence des « impérialistes ». Cela marchait assez bien et les Américains, que ce soient les Texans de Dallas pour TI ou les Arizoniens de Phoenix pour Motorola, découvraient avec étonnement que les Français, même méridionaux, pouvaient être efficaces, et même parfois plus efficaces que les Américains. Le surnom donné par les Américains à leurs employés locaux dans les pays développés étaient *intelligent monkeys*... En tous cas, ces relations avec les Américains de France permettaient un accueil plus ouvert lors des voyages aux États-Unis. Ouvert, mais pas désintéressé, car il s'agissait d'obtenir que nous ne fassions pas trop obstacle à l'utilisation de composants américains dans les matériels français, notamment pour ceux fabriqués, totalement ou partiellement, en France.

Les circuits intégrés ont eu depuis une telle importance qu'on pourrait écrire beaucoup plus longuement sur le sujet.

Il faudrait ainsi évoquer les études menées au Centre d'études nucléaires de Grenoble, le CENG et son laboratoire de composants, le LETI, auquel le STTA passa plusieurs marchés d'études qui lui donnèrent certainement une crédibilité

dont il sut profiter à l'intérieur et à l'extérieur du CEA. Ce laboratoire fut créé par M. Cordelle (un ancien officier de Marine) et M. Grumberg, sous l'impulsion du professeur Néel. Initialement, les études passées par le STTA au CENG ne portaient pas sur les circuits intégrés, mais sur les lames minces magnétiques, une technique qui ne déboucha que beaucoup plus tard. Ce n'est pas sous l'impulsion du STTA, mais au contraire à son insu, que le CENG fit les premiers investissements lui permettant de se lancer dans les techniques des circuits intégrés. On savait que les armées, et plus généralement les administrations qui disposaient de crédits, n'étaient pas « natalistes » en matière d'équipes de recherche. Mais il s'avéra bientôt que la nouvelle équipe était plus dynamique que celles installées depuis plus longtemps. Et elle crut à la technique MOS avant les autres.

Il faudrait aussi citer les universitaires qui travaillaient notamment sur les matériaux : germanium (Ge), silicium (Si), arséniure de gallium (AsGa), antimoine d'indium (InSb)..., le professeur Griset, le professeur Balkansky, les laboratoires de l'École normale supérieure, du CNRS de Bellevue...

Il faudrait encore retracer les difficultés à maîtriser certaines techniques aujourd'hui banales – comme l'épitaxie, sur laquelle travaillait M^{me} de Saint-Esprit chez LTT, ou le tirage de monocristaux d'AsGa, que réalisait la Radiotechnique à Caen ; et mentionner la longue hésitation entre l'utilisation de matériaux en blocs spécifiés par diffusion, en couches minces déposées sous vide ou en couches épaisses déposées par sérigraphie.

Mentionner aussi, sur le plan industriel, le mouvement de décentralisation qui se développait dans l'électronique et auquel participaient les composants : la Radiotechnique se décentralisait en Normandie avec ses usines de Caen, d'Évreux, de Dreux... alors que la CSF préférait un long axe nord-sud, avec la Bourgogne électronique chère à M. Danzin (Dijon, Gray, Beaune...), Grenoble et Aix-en-Provence (après la fusion avec Thomson).

Il faudrait enfin parler des composants à usage spatial, pour lesquels le CNRS fit, à une époque, un important effort de fiabilisation ; parler aussi de l'effort fait par la direction des Engins dès le début des années soixante ; et surtout continuer au-delà de 1965, date à laquelle j'ai été, sur ma demande et à ma grande satisfaction, muté à Londres. C'est l'objet des lignes qui suivent.

La poursuite de l'effort, après 1965

L'histoire des composants des armées ne s'arrête évidemment pas en 1965. La DRME, créée en 1961, finançait surtout la recherche dans le domaine des matériaux. Bertrais, devenu adjoint au chef de la Section études télécommunications, continuait à prêcher pour les circuits intégrés et pour les composants en général. Surtout, la technique continuait à aller de l'avant, vers les mémoires de grande capacité et les microprocesseurs. Pendant ce temps, l'industrie continuait à vivre une vie mouvementée.

Au plan technique, la victoire définitive des circuits intégrés par rapport aux autres technologies devint évidente avant la fin des années soixante, et les microprocesseurs apparurent au cours des années soixante-dix.

Au plan industriel, l'événement important fut la fusion entre Thomson et CSF, sous la pression du gouvernement – pression assortie de crédits.

Pour ce qui est des relations entre l'État et l'industrie, et plus précisément entre le ministère de la Défense et l'industrie, on peut distinguer trois périodes.

Des origines à 1976-1977, on applique les méthodes traditionnelles. Le STTA, la DRME et d'autres services passent des contrats dans le cadre d'une coordination ministérielle ou interministérielle. C'est la grande époque du Plan et de la Commission permanente de l'électronique du Plan, la COPEP, qu'il faudrait retracer en soi. En 1971 est créé au ministère de l'industrie un chargé de mission interministériel pour les composants électroniques (Marc Chappey, puis moi-même en 1976) ; pendant cette période, la Délégation à l'informatique de Robert Galley, puis de Maurice Allègre, joue un rôle important, mais finalement sans grande efficacité.

En 1976-1977, la DIELI fait décider un plan gouvernemental dit Plan circuits intégrés, auquel participent financièrement la DGRST, les PTT et la Défense, représentée au comité directeur (le Groupe interministériel sur les circuits intégrés, le GICI) par l'IGA Alberge, chef du SCTI (le Service central des télécommunications et de l'informatique). C'est le début de la généralisation des microprocesseurs, et la Défense a choisi le 6800, puis le 68000 de Motorola, délaissant, sans doute à tort, le 8086 d'Intel, qui donna naissance à la descendance la plus prestigieuse de microprocesseurs, avec notamment le Pentium, mondialement connu. Ce plan est suivi en 1982 du PPM, le Plan pour la microélectronique ; la Défense mène pour sa part des plans VLSI (*Very Large Scale Integration*), CITGV (*Circuits intégrés à très grande vitesse*, traduction du VHSIC américain, pour *Very High Speed Integrated Circuits*), PACIM (Plan d'action pour les circuits intégrés modulaires) et PACEO (Plan d'action pour les circuits intégrés et l'optoélectronique). Ces actions mériteraient elles aussi une étude historique en soi. Elles ont été conduites par les ingénieurs de la DGA Alberge, Margier, Givaudon, Javelot, Teszner, Rieux, Mattern

Enfin, vers 1990, a débuté une troisième phase, celle où on a commencé à se demander s'il était raisonnable de continuer à soutenir les circuits intégrés à partir du ministère de la Défense, alors que les commandes militaires, qui avaient représenté au cours des années soixante près de 10 % du marché, étaient tombées au voisinage de 1 %, ou même moins. La réponse est aujourd'hui clairement négative, sauf pour quelques composants (tubes pour les radars, composants durcis aux rayonnements...). La fin officielle de la participation de la Défense au développement des circuits intégrés peut être datée d'une décision de Henri Conze de mettre fin au programme PACIM, qui date de 1995. 1960-1995 : trente-cinq ans !

Les autres composants

Mais il n'y a pas que les circuits intégrés. L'électronique des armées repose aussi sur d'autres composants : les semi-conducteurs discrets, les tubes électroniques et les composants passifs ; enfin les composants divers – car il y a toujours une catégorie « divers ».

Les semi-conducteurs discrets (c'est-à-dire tous les semi-conducteurs sauf les circuits intégrés) étaient soutenus, au cours des années cinquante, avant l'arrivée des circuits intégrés. Les armées ont ensuite préféré le silicium, qui devait finalement remplacer totalement le germanium, grâce à ses qualités de tenue en température. Les normes militaires exigeaient en effet un fonctionnement jusqu'à 125° C, ce que le germanium ne pouvait faire. Il est ironique de constater que ce n'est pas pour cette raison que le silicium a supplanté le germanium, mais parce que les propriétés physiques de l'oxyde SiO₂ ont permis le développement de la technologie *planar*, riche en promesses (tenues) de densité, de fiabilité et de faible coût.

Ensuite, au cours des années soixante, les armées ont lancé les études permettant d'atteindre des puissances plus fortes et des fréquences plus élevées, et donc de remplacer progressivement les tubes électroniques, chers, volumineux et fragiles, dans un nombre de plus en plus grand d'applications. Par exemple, le STTA soutint en 1963 une étude de transistor au silicium capable de fournir 1 watt à la fréquence de 250 MHz. Des études de thyristors (commutateurs de puissance) et de diodes tunnel, dont on espérait qu'elles permettent de réaliser des mémoires, furent également soutenues. L'ambiance était celle d'une « chasse au tube » dont le prix, le volume et la mauvaise fiabilité limitaient les performances des matériels, qui devaient travailler à haute fréquence pour des raisons de flux d'information transmise et de transparence de l'atmosphère. C'était l'époque où les fabricants de matériels, de matériels de mesure par exemple, axaient leur publicité sur le « tout état solide », identique au « sans tube ».

Les tubes électroniques toutefois restaient incontestés pour les grandes puissances, c'est-à-dire pour les radars : le magnétron (le premier des tubes hyperfréquences), le klystron⁷ et le carcinotron⁸ étaient au catalogue de CSF et de Thomson, puis de Thomson-CSF, en partie grâce au soutien des armées et, pour la partie que je connais mieux, du STTA. En partie aussi grâce aux Américains, qui avaient passé, à CSF en particulier, des contrats pour le carcinotron. La CSF créa d'ailleurs une filiale aux États-Unis, la Warnecke Inc., du nom de l'ingénieur qui était responsable du tube. Le succès de la CSF dans ce domaine est un modèle de réussite, et de réussite durable, de l'industrie électronique française d'après-guerre. C'est aussi un exemple significatif de ce que les Américains étaient prêts à accepter pour que l'Europe se relève techniquement et devienne un allié fort, plutôt qu'un boulet à traîner. À côté de cette réussite, il convient aussi de signaler que les tubes eurent leurs défenseurs au-delà du

⁷ Tube électronique qui produit des ondes aux fréquences de la gamme dite des hyperfréquences, caractéristiques des radars. Dans certains radars, on lui préférait le magnétron ou le carcinotron.

⁸ Du grec *karkinos* (crabe), car l'onde se déplace en sens inverse du sens habituel dans le tube.

raisonnable, comme toute technique qui plafonne. On voulut faire des tubes de plus en plus petits, et il est significatif que l'un des derniers marchés de tubes basse puissance passés par le STTA ait porté sur un modèle que ses concepteurs avaient nommé le « nuvistor », trahissant peut-être involontairement leurs craintes ou leurs fantasmes. Les spécialistes des tubes, dont la technique était condamnée, pour les faibles puissances, par les transistors, donnaient ainsi au dernier et au plus petit des tubes un nom qui le faisait se déguiser en transistor : comme si la dernière locomotive à vapeur s'était appelée la vapotrique, ou le dernier avion à hélice l'hélijet...

Les composants passifs, eux, ne donnaient plus lieu, dès 1960, à des études financées par les armées. On cherchait encore à développer des résistances ou des thermistances aux propriétés particulières, on recherchait aussi des matériaux ayant des propriétés thermiques, électriques et magnétiques exotiques pour diminuer la taille des transformateurs, et l'on travaillait sur des céramiques diélectriques résistant à très haute température. On trouverait certainement dans les archives des marchés portant sur ce type de composants, mais pour des montants faibles, alors que les marchés de tubes radar pouvaient représenter plusieurs millions de francs pour un seul tube, à une époque où le franc (à peine « nouveau ») valait plus de huit fois sa valeur de l'an 2001.

Enfin, il y avait aussi des composants « divers ». Des composants hyperfréquences d'abord : la CSF menait à Corbeville des études sur des circulateurs et autres joints tournants devant avoir des caractéristiques ne variant que très peu sur une plage de température allant de -55°C à 125°C . La tenue en température était une exigence des armées qui touchait peut-être à la manie !

Des amplificateurs paramétriques également, destinés à diminuer le bruit des amplificateurs des étages d'entrée des radars : ce bruit déterminait en effet, dans certaines conditions, la portée du radar.

Des dispositifs réfrigérants ensuite : dans la même optique de tenue en température, une solution pouvait consister, quand on ne réussissait pas à obtenir des composants intrinsèquement stables, à les stabiliser artificiellement par une régulation thermique. L'effet Peltier apparaissait prometteur : une promesse qui ne fut jamais tenue.

Enfin, les matériaux magnétiques qui sont aujourd'hui si largement utilisés dans les ordinateurs personnels, et qui l'étaient d'ailleurs déjà dans les années soixante dans les gros ordinateurs (tambours, puis disques) furent aussi soutenus par les armées. Un contrat passé avec le Centre d'études nucléaires de Grenoble visait à la réalisation d'une mémoire magnétique de plusieurs cm^2 et de seize bits : on était loin des gigaoctets d'aujourd'hui ! On visait aussi la réalisation de mémoires à bulles magnétiques, bien oubliées, et celle de mémoires magnétiques à cryotrons. Les cryotrons étaient des éléments magnétiques utilisant la supraconductivité. Il s'agissait bien sûr de supraconductivité à basse température (quelques degrés K), la supraconductivité à la température de l'azote liquide n'ayant été découverte qu'à la fin des années quatre-vingts, sans avoir d'ailleurs toujours de réelle application pratique plus de dix ans plus tard. C'était Alcatel qui travaillait sur les cryotrons.

Conclusion

Les relations entre les armées et les différentes techniques mises en jeu dans l'élaboration des composants électroniques se placent dans le cadre de l'aventure de ces composants, qui court au long des cinquante dernières années. En 1950, en effet, les composants électroniques n'étaient pas fondamentalement différents de la lampe du début du siècle. Des électrons dégagés par échauffement à partir d'un solide étaient manipulés par des champs électromagnétiques. Cette technique était déjà riche de la radio, des télécommunications et du radar, ce qui n'est pas si mal. Mais elle était fondamentalement limitée en densité, en fiabilité et en coût. L'invention du transistor par Shockley, en 1948, a repoussé d'un nombre encore inconnu d'ordres de grandeur les limites de l'électronique. Les électrons supports de l'information sont désormais traités à l'intérieur du solide qu'est le semi-conducteur. Et, dès ce moment, les futurologues les plus visionnaires ont inventé le mot « nanoélectronique » et prévu qu'on allait pouvoir faire porter l'information à un nombre de plus en plus réduit d'électrons, et donc augmenter fabuleusement la densité, ce qui ne fut réalisé que lorsque eurent été laborieusement mises au point les techniques de microgravure.

Il faut reconnaître à l'*US Air Force* et à la société Texas Instruments le mérite d'avoir vu, ou du moins entrevu cette opportunité dès 1957 ou 1958. Il faut reconnaître, en France, à Jean Bertrais dans l'administration et sans doute à M. Grosvallet dans l'industrie (à la CSF Puteaux) le mérite équivalent.

Ils n'ont pas vu tout de suite quelle méthode il fallait suivre, et ils ont certainement sous-estimé les résultats qu'il serait possible d'obtenir, les efforts financiers qu'il faudrait faire et surtout l'impact économique et social de la réussite. Ils ont cependant su voir que les limites de l'électronique étaient loin d'être atteintes.

Pour ce qui est des applications militaires, ils ont aussi su voir que la tendance vers une complication croissante dans des matériels de plus en plus denses était une tendance lourde.

Par la possibilité offerte aux équipementiers de faire réaliser par l'industrie française (Thomson-CSF à partir de 1968) les composants les plus sensibles de leurs matériels, et notamment les composants durcis contre les radiations, les composants des matériels de chiffrement et ceux des matériels spatiaux, ils ont contribué à permettre à cette industrie française d'afficher une indépendance réelle (même si elle était loin d'être totale) vis-à-vis des États-Unis. C'était un élément parmi d'autres de la politique de la Cinquième République. Grâce à la persistance, aujourd'hui, d'une industrie des circuits intégrés en Europe, ce qui n'allait pas forcément de soi il y a trente, vingt ou dix ans et qui n'est toujours pas définitivement assuré, cela peut être un élément de la politique européenne d'aujourd'hui et de demain.

CHAPITRE 4

LE NADGE, PROGRAMME OTAN DE DEFENSE AERIENNE

par Michel-Henri Carpentier¹

LA SITUATION TECHNICO-OPERATIONNELLE DANS LES ANNEES 1950

Les premiers radars et la première défense aérienne

La défense aérienne telle qu'elle existait en France dans les années 1950 était la suite logique du système utilisé par les Britanniques lors de la Seconde Guerre mondiale, à partir des équipements de détection électromagnétique (radars) développés dès 1935 par Watson Watts (il ne devint *sir* qu'un peu plus tard !).

On notera que le premier radar fut construit en 1904 (par l'Allemand Christian Hülfsmeyer), sous l'appellation de « télémobiloscope », même si le mot « radar » (pour *Radio Detection And Ranging*) n'est en fait apparu qu'en novembre 1940, dans une note de service de l'amiral américain H. Stark. Le Français Pierre David avait, en juin 1934, fait la démonstration officielle de l'efficacité d'un autre type d'équipement de détection aérienne électromagnétique (DEM), dont 30 exemplaires avaient ensuite été construits et installés, d'une part autour de la Bretagne, et d'autre part le long des frontières Nord et Est de la France, jusqu'aux Alpes : pratiquement tout avion isolé ou tout groupe d'avions franchissant ce « barrage DEM » fut détecté.

Mais le système britannique avait plusieurs avantages par rapport au barrage David : on pouvait détecter à une assez grande distance, et donc donner un préavis ; on continuait à détecter et à localiser les assaillants avec une assez bonne précision pendant leur approche vers leurs objectifs ; enfin, en centralisant les informations fournies par ces radars, on pouvait faire la synthèse de la situation aérienne, ce qui permettait d'utiliser les chasseurs avec le maximum d'efficacité.

Les Français disposaient aussi en 1940, sur la côte méditerranéenne (et à Bizerte), de radars très analogues à ceux des Britanniques (construits par Sadir-Carpentier, avec Gérard Lehmann, par Radio-Industrie, et, pour le plus sophistiqué, par LMT, avec Émile Labin). Ils avaient d'ailleurs également obtenu de très beaux succès à l'encontre des avions assaillants italiens, avec des préavis suffisants permettant notamment la destruction de 38 d'entre eux du 12 au 15 juin 1940.

¹ Michel-Henri Carpentier a été sous-lieutenant à la station maître-radar XI/901 en 1953, ingénieur militaire de l'Air au STTA de 1956 à 1962, en service détaché à l'OTAN (GETIS) en 1962 et 1963 pour y rédiger les spécifications du NADGE, puis directeur technique de la division Radars de surface de Thomson-CSF, de 1967 à 1973.

On notera également, en 1937-1940, l'action efficace de Henri Gutton et Sylvain Berline, de la CSF, dans le développement des magnétrons (« tubes » d'émission) pour radar utilisant des longueurs décimétriques, dont l'emploi allait se généraliser dans les radars de défense aérienne pendant la Seconde Guerre mondiale. Les tubes spécifiques pour radar sont « à propagation d'ondes » ou « à ondes progressives » : les électrons y cheminent pendant plusieurs périodes de l'onde électromagnétique, à laquelle ils cèdent petit à petit leur énergie, leur énergie potentielle (tubes M), ou cinétique (tubes O). Le magnétron est le premier tube M ayant existé.

Les principes de la défense aérienne (britannique) utilisée de 1940 à 1945, qui restaient d'actualité, se résument à ceci : surveiller tout l'espace aérien pour détecter et identifier tous les aéronefs, évaluer la menace qu'ils représentent, mettre en œuvre le plus efficacement possible les moyens (en particulier les chasseurs) permettant la destruction des assaillants, et aider au recueil des chasseurs.

Les débuts de la défense aérienne française

La nécessité de disposer en France d'une organisation de défense aérienne était apparue évidente dès 1945, et le commandement de la défense aérienne du territoire (DAT) avait été créé. Il ne pouvait au début qu'utiliser des équipements anglo-américains, notre industrie d'armement ayant été pour l'essentiel détruite – ou mise en veilleuse dans le meilleur des cas, quelques-uns, trop rares, de nos ingénieurs ayant pu émigrer et travailler dans les laboratoires américains. C'est notamment le cas d'une petite équipe de LMT dirigée par E.-M. Deloraine, avec Henri Busignies, l'inventeur du filtrage doppler radar (dit MTI pour *Moving Target Indicator*), et Émile Labin. Cette équipe avait également développé le radiogoniomètre instantané (*Huff Duff*), essentiel dans la lutte anti-sous-marine.

Au sein d'un ministère de l'Air (ou d'un secrétariat d'État, suivant les périodes), la Direction technique et industrielle (DTI) avait la mission de faire étudier et réaliser les matériels et équipements destinés à l'armée de l'Air. En ce qui concerne l'infrastructure de la défense aérienne, chargée de la détection, de l'exploitation des informations et des communications sol-sol et sol-air, cette tâche fut confiée au Service technique des télécommunications de l'Air (STTA), qui devint en 1948 un service de la DTI.

Dans une station de défense aérienne de la fin des années 1940 ou du début des années 1950, on disposait d'un ou plusieurs (couverture « basse » altitude et couverture « haute ») radars panoramiques de veille (faisceau fin en gisement et plus large en site, tournant autour d'un axe vertical) permettant la détection des aéronefs. Un opérateur de détection électromagnétique (ODEM) détectait sur un tube cathodique (PPI, pour *Plan Position Indicator*) la petite banane correspondant à un avion (aidé en cela par la rémanence du PPI), et en transmettait par phonie (téléphone) les coordonnées à la salle d'opérations, où elle était reportée sous la forme d'une figurine métallique, sur une très grande

table dite de situation générale, que pouvait observer et analyser le commandement. Ce dernier disposait en outre d'un grand tableau, le TOTE, où l'on trouvait des informations notamment sur la situation de la chasse.

L'ODEM fournissait, au fur et à mesure, des informations sur le cap et la vitesse de la « cible », toujours grâce à la rémanence du « scope ». Ces informations permettaient d'« habiller » la figurine avec des renseignements complémentaires, à quoi s'ajoutait une identification (« un tel, ami, douteux, hostile »). Quelques autres radars dits de sitométrie, dont l'antenne balançait un faisceau électromagnétique fin en site (mais large en gisement) permettaient de mesurer l'altitude des cibles, pour renseigner le commandement, mais étaient surtout utilisés dans la conduite des « interceptions » des hostiles ou des douteux par la chasse, dirigées par des contrôleurs d'interception placés dans une « cabine ».

L'industrie française après la guerre

La première tâche du STTA fut de faire réaliser par l'industrie française des matériels aux performances équivalentes à celles des matériels en service : notamment des radars de veille et des radars de sitométrie en bande S (environ 10 cm de longueur d'onde), des PPI et des indicateurs (tubes cathodiques) pour la sitométrie.

Or, après la guerre, s'étaient constituées ou reconstituées d'assez nombreuses équipes, de façon évidemment dispersée, certains laboratoires ne comportant même que deux ingénieurs (le père et le fils par exemple) spécialisés dans une technique pointue. Ces équipes se réunirent petit à petit, pour constituer la Thomson-CSF d'aujourd'hui.

Il faut évoquer d'abord les pionniers d'avant-guerre : la Radio-Industrie, qui recommence dans le domaine, avec Émile Labin lorsqu'il rentre des États-Unis ; Sadir-Carpentier, qui se concentre sur les matériels aéroportés ; la CSF/SFR, qui réanime son action dans le domaine autour de G. Naday, formé par les militaires britanniques. À son retour des États-Unis, E.-M. Deloraine prend, lui, la direction du laboratoire LMT (LLMT), qui avait survécu, et qui est rebaptisé LCT.

De nouveaux venus entrent aussi dans le domaine du radar : R. Derveaux, qui se consacre au matériel aéroporté ; Alex Clément, qui crée la SECRE ; M. Fyssen, dit Fyssen, qui crée la SINTRA (avec M. Kniazeff) ; la Compagnie des compteurs (CDC), qui fabrique en série des PPI IP 03, avant de quitter assez vite le domaine ; enfin la CFTH (Compagnie française Thomson Houston), qui se lance dans le domaine du radar en 1945, autour de trois ingénieurs provenant du LLMT (V.A. Altovsky, André Moisson-Franckauer et E. Rostas, qui avait travaillé sur les tubes spécifiques pour radar, dits « à modulation de vitesse » ou plus simplement « O »), en réalisant un radar d'atterrissage (GCA, pour *Ground Control Approach*) à balayage électromécanique du faisceau.

Parmi les ingénieurs radar de l'époque, sont particulièrement favorisés ceux (quatre ou cinq) qui ont la chance de posséder la série complète des vingt-huit ouvrages de la collection *Radiation Laboratory Series* du MIT, publiée de 1947

à 1953 sous la direction de Louis N. Ridenour, et dont seuls quelques tomes avaient été traduits en français (en 1950) sous la direction de Maurice Bouix, du CNET (celui-ci avait encore en son sein, en 1950, des équipes dites CNET-Air, qui allaient rallier le STTA au milieu des années 1950) .

Les premières réalisations françaises

À ces équipes, pour répondre aux besoins de l'armée de l'Air, le STTA fait développer les composants essentiels indispensables à la réalisation des radars, notamment le magnétron et le petit klystron oscillateur (« tube O » utilisé dans le récepteur). Cela permet la réalisation par la CSF/SFR de l'émetteur ER 6 (dont l'appellation constructeur est ESV 2), de puissance crête 500 kW^2 et de $1 \mu\text{s}$ de durée d'impulsion, qui équipa la plupart des radars de veille et de sitométrie des années 1950. Il fut ensuite remplacé par l'excellent ER 37 de CSF, construit sur ses fonds propres (1 MW crête, 1 kW moyen), souvent utilisé dans des configurations « diversité de fréquences » à trois émetteurs³.

Plusieurs prototypes d'antennes sont réalisés par la Radio-Industrie, la CSF/SFR et Thomson, tant pour la veille panoramique que pour la sitométrie à balancement. Ils sont essayés sur le terrain par le Centre d'expérimentations aériennes de Mont-de-Marsan (CEAM). À la fin des années 1950 sont opérationnelles (essentiellement), pour les radars panoramiques, les antennes AN 110 de CSF/SFR et les « veilles combinées » AN 104 de Thomson (deux antennes synchronisées en rotation, générant chacune deux faisceaux dans le plan vertical), fournissant ainsi, avec les ER 37, des systèmes de bonne qualité pour l'époque.

De façon générale, dans le domaine de la défense aérienne, ne subsistaient plus comme fournisseurs importants à la fin des années 1950 que CSF (le sigle SFR ayant disparu), Thomson, qui était en train d'absorber la Radio-Industrie sous le nom de SNERI, LMT, spécialisée dans l'IFF (*Identification Friend and Foe*) en association avec SECRE pour l'exploitation, et enfin SINTRA, devenu le responsable de l'exploitation et du traitement de l'information en salle d'opérations.

En effet⁴, l'amélioration des performances des moyens de détection eût été inutile si l'exploitation des informations obtenues n'avait pas fait des progrès analogues. L'objectif visé était de rassembler, de traiter et de présenter aux exploitants de façon plus commode l'ensemble des informations dont ils auraient besoin pour décider. Les fonctions principales à assurer étaient : la localisation des avions en position géographique et en altitude ; leur identification par l'IFF

² La puissance crête P_c est la puissance du radar lorsqu'il émet : s'il émet des impulsions de durée T , l'énergie émise à chaque émission est $P_c \times T$, et s'il émet f impulsions par seconde, il a une puissance moyenne égale à $P_c \times T \times f$.

³ Utilisation alternative, de microseconde en microseconde, de trois émetteurs émettant sur des fréquences différentes, pour obliger l'ennemi à brouiller les trois fréquences.

⁴ Michel BERGOUNIOUX, « Evolution des systèmes de défense aérienne », *L'Armement*, n° 56, mars 1997.

et/ou par corrélation avec les plans de vol, l'établissement de la situation aérienne générale et l'évaluation de la menace ; le choix des armes; l'état des bases et de leurs disponibilités en moyens d'interception, ainsi que le calcul des éléments de guidage des intercepteurs, depuis l'ordre de décollage jusqu'au retour à la base.

Ce besoin opérationnel d'un outil dont la capacité de calcul pût assister le travail sur écran (cathodique) des contrôleurs, aider à évaluer immédiatement une situation aérienne globale et à optimiser l'emploi des armes disponibles, servit de cadre aux premières études d'un système baptisé STRIDA, pour Système de transmission et de représentation des informations de défense aérienne. Ce système complet se révéla trop ambitieux pour les calculateurs analogiques disponibles à l'époque, et seul le sous-système de conduite des interceptions fut réalisé par SINTRA. Ce matériel, le STRIDA 1 bis, fut rapidement mis en service vers 1960 dans les stations radar, modernisées avec l'introduction de nouveaux indicateurs panoramiques (PPI) et l'emploi de la télévision en circuit fermé pour la diffusion des informations à l'intérieur des salles d'opérations.

Premiers succès à l'exportation

La très convenable qualité de nos radars de défense aérienne avait permis à notre industrie, à la fin des années 1950, de ne pas être tout à fait absente lors de la construction du réseau d'*Early Warning* de l'OTAN. Par ailleurs, la Radio-Industrie avait développé, pour les besoins de la Marine, des radars de sitométrie⁵ DRBI 10, dans lesquels le réflecteur ne se balançait pas, mais la source (primaire) se déplaçait dans un mouvement en dents de scie, grâce à l'utilisation d'un dispositif électromécanique astucieux dû à l'américain C.V. Robinson⁶. La Radio-Industrie en avait dérivé très directement une version pour l'armée de l'Air (évidemment baptisée Crusoë) et une version agrandie vendue à la Suède sous le nom de CRADAL, qui est à l'origine de la bonne réputation française en matière défense aérienne auprès des Suédois.

Il convient aussi de signaler que la CSF avait reconstitué (autour de Pierre Guenard et de Bernard Epsztein) son équipe de recherche et de développement de tubes pour radars (ou brouilleurs de radars), notamment pour les tubes M (l'activité de CSF en matière de tubes O / klystrons de grande puissance fut essentiellement consacrée aux applications dans les accélérateurs de particules). On doit à cette équipe l'invention et le développement des carcinotrons (oscillateurs) qui, fabriqués par CSF ou son licencié Raytheon, équipèrent pendant vingt ans les brouilleurs de radar du monde occidental⁷. On lui doit aussi, en ce qui concerne la défense aérienne, les premiers tubes M amplificateurs (TPOM), dont le développement avait été financé par la Marine nationale (STCAN, Service technique des constructions et armes navales), qui les utilisa

⁵ Radar fournissant (en plus de la distance) l'angle de site, et que l'on peut coupler avec un radar fournissant l'azimut.

⁶ Très largement décrit, avec tous les détails, des dessins cotés et des photographies, dans le volume 26 de la collection du MIT signalée plus haut, pages 45 à 55.

⁷ Bernard LEVI, *Les tubes électroniques de Thomson-CSF*, édité par Thomson Tubes Electroniques, 1999.

dans des radars de veille (DRBI 23), par l'armée de Terre (SEFT, Section d'études et fabrications des télécommunications) qui envisageait leur emploi, et par le STTA. Un radar de veille panoramique extrêmement moderne (à grande agilité de fréquence), équipé de TPOM, avait été, à la fin des années 1950, vendu par la CSF à la défense aérienne hollandaise.

LES ETUDES EN COURS EN FRANCE A LA FIN DES ANNEES 1950

L'ambiance au STTA

La période 1955-1965 a été particulièrement féconde en matière d'avancées dans le domaine de la défense aérienne en France, notamment grâce à l'action du STTA, de ses ingénieurs d'études, de son directeur, l'ingénieur général Francis Pénin, qui savait créer la chaude ambiance propice à la création et soutenir efficacement « ses troupes », de son directeur technique, l'ingénieur en chef (puis général) Gilbert Pérot, formé aux moteurs d'avions mais dont l'insatiable curiosité obligeait ses subordonnés à trouver des réponses techniques à ses questions, pour conserver leur propre estime ; et grâce à la très amicale complicité des officiers de l'EMAA/BPM, notamment du capitaine Jacques Paufichet (un ancien du STTA)⁸.

Avant l'invention du carnotron, les moyens de brouillage des radars étaient plus ou moins rudimentaires : de ce fait, jusqu'en 1955 environ, l'idéal était de disposer de radars de grande puissance (crête), même s'ils étaient quasi monochromes. L'évolution des techniques de brouillage et une analyse plus complète du problème, due en particulier à l'IPA Louis Chambeau, associée à l'arrivée de techniques comme la compression d'impulsions et/ou la corrélation, conduisirent, à la fin des années 1950, à la nécessité pour les radars de défense aérienne d'émettre la puissance moyenne la plus grande possible et de pouvoir fonctionner dans la bande de fréquences la plus large possible. Cela condamnait *a posteriori* le radar de sitométrie sophistiqué RADIA, développé par la Radio-Industrie dans la lignée des Crusoë et autres CRADAL, sous l'impulsion et avec des idées originales de l'ingénieur en chef Marie-Guerric de Coligny ; par ailleurs, la structure métallique de ce radar se déformait trop par temps ensoleillé.

Le concept de radar 3 D à faisceaux étagés

Le même de Coligny avait lancé, à la Radio-Industrie, l'étude et le développement d'un radar dit « 3 D », le Palmier C, devant permettre la mesure simultanée des trois coordonnées de toutes les cibles à chaque tour d'antenne (toutes les 10 secondes environ). Cette mesure était possible grâce à l'utilisation, sur une même antenne, de faisceaux superposés en site à la réception, plus nombreux (une dizaine) que les deux utilisés sur les antennes de veille combinée (ou les quatre utilisés sur deux antennes synchronisées), faisceaux « empi-

⁸ Jacques PAUFICHET est l'auteur de « Le lancement du STRIDA, 1955-1965 », in Comité pour l'histoire de l'armement, *Les systèmes d'information et de commandement, 1955-1975*, Lavauzelle, 2002.

lés » (*stacked*), c'est-à-dire, si possible, d'un espacement angulaire égal à leur largeur. Les numéros des deux faisceaux ayant reçu les signaux les plus forts, associés à une interpolation angulaire (technique de *monopulse*), devait permettre la mesure du site (et donc de l'altitude des cibles) avec précision⁹.

La liquidation de la Radio-Industrie en 1957 (reprise par Thomson sous le nom de SNE, puis de SNERI, et absorbée par cette entreprise en 1965) retarda cette étude, qui se concrétisa d'abord par l'installation, en 1958-1959, au CEAM, d'une maquette dite Palmier D, qui servit jusqu'en 1965 à expérimenter diverses améliorations dans le domaine.

L'émetteur de grande puissance à klystrons

Dans l'esprit de de Coligny, cette antenne multifaisceaux devait être équipée d'un émetteur de puissance (crête) très élevée (à une longueur d'onde λ d'environ 10 cm). Or une publication du centre californien de Palo Alto de l'université de Stanford (dans la plus que sérieuse revue PIRE) annonçait « *a thirty megawatt klystron amplifier* »¹⁰. De Coligny demanda donc à Thomson (Robert Métivier) d'obtenir ce type de performance (avec un tube à « vide entretenu », alors que le tube de Stanford était pompé extérieurement, ce qui convenait à des emplois pour accélérateurs). Le défi d'étudier un amplificateur de 30 mégawatts crête et de 20 kilowatts moyens, à vide entretenu, fut relevé en 1955 par R. Métivier. On apprit plus tard que les 30 mégawatts de l'article américain étaient en fait la puissance de l'alimentation, mais que la puissance fournie à la sortie du tube n'était que de 10 mégawatts (et la puissance moyenne de 4 kilowatts).

Le klystron est un amplificateur 0 de bande (de fréquences) naturellement assez étroite (ce qui convenait parfaitement aux accélérateurs, mais moins aux radars de défense aérienne tels qu'on les souhaitait à la fin des années 1950), mais de gain (rapport entre la puissance de sortie et la puissance d'entrée) élevé, ce qui permettait d'obtenir cette puissance élevée avec deux tubes en série, au lieu des cinq ou six nécessaires avec les tubes M (TPOM) des radars CSF.

Les 30 mégawatts furent obtenus en 1958, en présence des ingénieurs militaires du STTA André Flourens et Michel-Henri Carpentier, le temps de déboucher le champagne... et de s'apercevoir que le tube se mettait en court-circuit à la sortie, à cause d'un phénomène de *multipactor*¹¹, qui nécessiterait un changement complet de « fenêtres de sortie ». Ce n'était qu'une des nombreuses difficultés techniques de ce défi, d'autant que les exigences du STTA en matière d'élargissement de la bande se firent de plus en plus pressantes. Il fallait en effet, par rapport aux réalisations américaines, considérablement améliorer les cathodes (leur pervéance¹²), pour éviter d'utiliser des hautes tensions dépassant les 250 kilovolts (avec les problèmes de rayonnement X associé).

⁹ C'est en 1957 que furent analysés assez complètement les différents procédés de mesure angulaire fine par radar, ce qui permettait de calculer et de comparer leur précision théorique et, de ce fait, de régler définitivement les querelles des tenants des différents types de *monopulse* (étude 7/57/SER/B2 de l'IMA Michel H. Carpentier).

¹⁰ cf. Bernard LEVI, *op. cit.*

¹¹ Multiplication des électrons par réflexions successives sur les parois, aboutissant à la formation d'un court-circuit.

¹² Facteur de proportionnalité entre la tension et la puissance $3/2$ de l'intensité.

Jean-Edgar Picquendar imagina un nouveau canon à électrons (aucun calculateur n'étant assez puissant en 1957, il utilisait un calcul mixte : cuve rhéographique¹³ et calcul numérique). R. Métivier, lui, fut le premier à utiliser une pompe ionique pour maintenir le vide. Et, pour améliorer très significativement la durée de vie des klystrons, qui mouraient par empoisonnement des cathodes, le STTA réduisit dès 1959 la puissance crête demandée à 20 mégawatts (pour 20 kilowatts de puissance moyenne).

Le résultat fut que la France disposait en 1964 d'un émetteur amplificateur strictement unique au monde par ses puissances crête et moyenne, sa bande passante, son rendement et sa (relative) commodité d'emploi. Ni les Britanniques ni les Américains n'avaient élevé l'ensemble de ces qualités à un niveau comparable.

Les difficultés de réalisation d'une antenne à faisceaux étagés

En janvier-février 1959, une mission avait été organisée aux États-Unis, dans le cadre des programmes de coopération (*Mutual Weapon Development Programs*) qui apportaient des crédits de recherche à l'industrie française, en échange des informations que l'on voulait bien donner à nos partenaires américains sur nos travaux. Cette mission emmenait, du côté français, G. Naday, de CSF, Maurice Chabrol, de Thomson, Michel Sirel, de SNERI, l'IP Assens, de la SEFT, l'IC Pérot et l'IP M.-H. Carpentier, du STTA. Le premier objet de cette mission était de présenter aux Français les réalisations américaines en matière de radars 3 D (ou « volumétriques »), alors que la SEFT avait un programme en développement dans ce domaine avec CSF (l'AC 12) pour un système de missiles (qui ne vit pas le jour), et que, dans les couloirs de l'OTAN et de SHAPE, on commençait à parler de ce qui devint le programme NADGE. General Electric avait réalisé pour la défense aérienne le radar FPS 7, et Westinghouse le FPS 27 (et sa version mobile MPS 22) : l'un et l'autre espéraient placer leur équipement à l'occasion du futur NADGE.

La conception d'une telle antenne volumétrique (ou 3 D) était très difficile, car elle nécessite de superposer, dans le plan focal d'un réflecteur, des sources « rayonnantes » (dites « primaires ») distantes entre elles d'environ une longueur d'onde. C'est physiquement difficile, car les sources primaires les plus répandues à l'époque (des « cornets ») ont une dimension physique supérieure à la longueur d'onde. Par ailleurs, quel que soit le type de source utilisé, la petite distance entre sources successives fait qu'elles réagissent l'une sur l'autre (elles sont très « couplées »). Enfin, l'utilisation de sources trop distantes du foyer conduit à des « aberrations » (défauts). Un calcul précis s'avère nécessaire pour obtenir de bons résultats ; complexe, car à base de transformations de Fourier, il était impossible en 1957-1958, faute de machines assez puissantes.

¹³ Calculateur analogique constitué par une cuve d'eau à laquelle on donne la forme de la cavité que l'on veut étudier et à laquelle on applique les tensions électriques correspondantes (intervention des professeurs Malavard et Peres).

L'antenne du FPS 7, utilisant des cornets comme sources primaires (comme d'ailleurs l'AC 12) était assez mauvaise ; celle du FPS 27, qui utilisait des sources primaires plus étudiées, était plus acceptable.

Or, dans les années suivantes, Thomson-SNERI sortit un prototype d'antenne (celle du Palmier G, cf. photo 1 *infra*) d'une excellente qualité. D'une part étaient utilisées pour chaque source primaire plusieurs « bougies » diélectriques, une bougie pouvant servir à deux sources primaires voisines, ce qui permettait d'encastrier les sources primaires l'une dans l'autre et de les placer effectivement très près l'une de l'autre. D'autre part, l'inévitable couplage était utilisé d'une façon positive. Enfin, un calcul complet était permis par une machine puissante (pour l'époque, car sa puissance ferait sourire nos amis de la météo d'aujourd'hui !), une CDC 6600 de Seymour Cray (déjà lui), utilisée de façon mathématiquement très astucieuse par MM. Daveau et Saudreau.

La compression d'impulsions

Lors de ce même voyage de janvier-février 1959, l'US Navy avait présenté à la mission française la maquette du radar aéroporté de surveillance aérienne (AEW, pour *Airborne Early Warning*) qui devait équiper les avions *Hawkeye*¹⁴ du porte-avions *Enterprise*, en indiquant qu'ils utiliseraient la technique de « compression des impulsions » pour obtenir avec des impulsions assez longues de très fines mesures de distance (permettant, par comparaison de la distance directe radar-cible avec la distance radar-cible après réflexion sur la mer, de mesurer l'altitude de la cible).

De retour à Paris, l'IC Pérot exprima à l'IP M.-H. Carpentier le désir de comprendre ce que pouvait recouvrir ce vocable. Une étude bibliographique effectuée avec l'aide de M. Debart, de la SACM, permit de découvrir un article écrit en 1942 par un Allemand, Krönert, qui donnait les grandes lignes du procédé : dans un radar à compression, le signal est, pour une largeur de spectre de fréquences donnée, beaucoup plus long que dans un radar classique, parce qu'il est modulé en fréquence (ou en phase), ce qui permet, pour une énergie donnée, d'utiliser une puissance crête plus faible. À la réception, un filtre adapté enlève la modulation de fréquence, raccourcissant le signal au maximum : tout se passe comme si on avait émis un signal court beaucoup plus puissant (ce procédé est aujourd'hui très utilisé en télécommunications, sous le nom de « spectre étalé »).

Le capitaine André Adamsbaum et l'IP M.-H. Carpentier, utilisant un procédé original, dit « du retournement de spectre »¹⁵, réalisèrent alors dans le mois suivant, au laboratoire du STTA, une maquette de démonstration de compression d'impulsions qui fut présentée à leurs collègues de la SEFT et du STCAN, ainsi qu'à Thomson et CSF.

La construction d'un radar (panoramique de veille) de vérification de principes fut alors confiée par le STTA à Thomson (équipe de Yvon Fouché), sous l'appellation de CONRAD. Installé en 1962 au Centre d'essais en vol de Bréti-

¹⁴ Avion de détection lointaine beaucoup plus petit que l'AWACS, mais embarquable sur porte-avions, et notamment sur le *Charles de Gaulle*.

¹⁵ Brevet français 1.313.975.

gny-sur-Orge, ce radar (le premier européen à compression d'impulsions, et le deuxième ou troisième au monde) devait donner toute satisfaction et permettre à Thomson, sur crédits du STTA, d'analyser entre 1962 et 1964 tous les différents aspects liés à l'utilisation de la compression d'impulsions.

L'idée d'émettre des signaux modulés en fréquence ou en phase pouvait être poussée plus loin, avec l'émission d'un signal aléatoire comme un « bruit blanc », donc modulé aléatoirement en phase, ce qui présentait l'avantage de fournir une excellente mesure à la fois de la distance et de la vitesse radiale, mais nécessitait de remplacer le filtre adapté par des corrélateurs¹⁶. L'IP M.-H. Carpentier expérimenta ainsi le 13 juin 1961, à Melun-Villaroche, un « radar à bruit » de sa conception, de façon tout à fait probante (on appelle aujourd'hui ce genre d'équipement « radar codé » ou *Random Signal Radar*). Thomson réalisa ensuite, sur demande du STTA, un radar à bruit émettant un bruit artificiel (signal pseudo-aléatoire), le Macbeth, expérimenté avec succès au CEV. Le programme NADGE ayant abandonné la notion de radar *Long Dwell Time Radar* (LDTR, cf. *infra*), les principes du radar à bruit n'y ont pas trouvé place. Ils ont en revanche été utilisés dans des milliers d'équipements d'une autre fonction (de plusieurs modèles).

Le STRIDA 2

En 1957, Jean-Pierre Brûlé, un jeune ingénieur passionné d'électronique numérique dès sa sortie de l'École Polytechnique, embauché à la CSF, avait tenté en vain de convaincre sa hiérarchie de l'intérêt que pouvait présenter une exploitation numérique des informations dès la sortie du récepteur radar. Il était entré à IBM France. Il se trouve que ses idées recoupaient celles de l'IP Pierre Villard, du STTA, à une époque où ce service avait entrepris, avec SINTRA, de rénover les stations radar de défense aérienne française avec une solution analogique.

Ayant eu l'occasion (lors d'une soirée chez un ami commun, l'IM René Audran, du STTA – celui qui fut assassiné en 1985) d'écouter Jean-Pierre Brûlé sur son « dada », M.-H. Carpentier le mit en contact avec Villard. Des premiers contrats de pré-étude furent passés à Brûlé dès 1957, pour vérifier la possibilité d'utiliser les techniques numériques pour l'« extraction » des informations radar (distances et gisements, pour un radar panoramique)¹⁷. Après une simulation sur IBM 707, une maquette fut réalisée : il s'agissait d'un calculateur spécifique (à transistors) à programme fixe, visant à séparer du bruit les signaux utiles apparaissant à la même distance (dans des gisements différents successifs) et pouvant donc provenir de la même « cible » (et constituer un « plot »). Cette séparation avait lieu suivant des « critères de détection » dépendant de trois paramètres réglables.

Le défi était important, car la technologie à transistors avait été jusque là peu utilisée hors des laboratoires, et la conversion analogique-numérique des données était inédite. Complétée par une poursuite rudimentaire, cette première maquette de calculateur arithmétique de poursuite, d'acquisition et de contrôle

¹⁶ Dispositifs permettant l'analyse d'une impulsion à fréquence dispersée, plus facile à réaliser que des filtres.

¹⁷ cf. Michel BERGOUNIOUX, *art. cit.*

(CAPAC) fut couplée à un radar panoramique du CEV. L'essai de cet « extracteur » s'avérant très satisfaisant, une solution numérique au problème de la modernisation du traitement se définit petit à petit entre l'équipe de Jean-Pierre Brûlé (avec M. Delahaye), le capitaine Paufichet, de l'EMAA, et l'IM Jacques Stern, nouvel arrivé au STTA. Le STTA obtint qu'IBM (département militaire) et SINTRA s'associent dans ce projet.

Et le basculement se fit, en 1959-1960, après une mission aux États-Unis où le système américain GPA 73, dont la philosophie était très voisine de la solution STTA-IBM, fut présenté à Paufichet. Le lancement de la solution numérique STRIDA 2 était décidé. Malgré le volume – bien sûr sous-estimé au départ – des programmes de poursuite des pistes et de guidage des intercepteurs, et les problèmes posés par les échanges d'informations entre centres de défense aérienne, des contrats forfaitaires furent négociés (comme le plus souvent) entre le STTA et IBM France. Les délais furent presque respectés et les essais technologiques purent commencer en 1961, validant le choix des technologies retenues : transistors – les circuits intégrés n'ont été inventés qu'en 1961 par les anciens collègues de Bill Shockley embauchés par Fairchild – et tores à ferrites – les mémoires DRAM (*Digital Random Access Memory*) n'étaient pas encore inventées. Les essais en environnement militaire commencèrent en 1962 au CEAM, et la version complète fut recettée en 1965.

LE CONTEXTE INTERNATIONAL A LA FIN DES ANNEES 1950

Les Suédois

L'armée de l'Air suédoise exprime dès le début des années 1960 des besoins assez exigeants en matière de radars de défense aérienne, puisqu'elle veut des radars à agilité de fréquence, puissants, volumétriques 3 D, et mobiles, ce qui paraît bien incompatible. Mais son estime pour la Radio-Industrie (devenue SNERI), qui lui a livré dans un passé récent des équipements qui ont convenu, et pour ses représentants (le commercial Marcel Assimon et le technicien-systémier Pierre Mondon) l'amène à engager un dialogue approfondi avec ceux-ci, puis à suivre les progrès des Français dans ce domaine, en contact avec les officiers de l'état-major et du CEAM et, à partir de 1962, avec l'IC Louis Chambeau, du STTA. Les Suédois acceptent petit à petit de remplacer le mot « mobile » par le mot « déplaçable ».

La première antenne Palmier G est expérimentée au centre d'essais de SNERI-Thomson en 1964 et donne presque complètement satisfaction, avec des performances très supérieures à celles des équivalents américains, et l'émetteur à klystron de 20 MW/20 kW s'avère à ce niveau tout à fait convaincant et capable d'une assez grande agilité de fréquence. De ce fait, les armées de l'Air française et suédoise passent en 1964 commande de radars volumétriques (Palmier pour les Français, Félix pour les Suédois) techniquement assez voisins, même si les Félix sont effectivement transportables – l'antenne seule pèse trente tonnes ! – et présentent de petites différences par rapport aux Palmier. Au total, une petite dizaine de radars furent livrés à ces deux clients, la maîtrise d'œuvre du radar étant assurée à Thomson-SNERI par Jean Moreau,

et la partie hyperfréquence non-antenne (joint-tournant de puissance de grande qualité, cf. photo 2, et joint-tournant multicanal moyenne fréquence très astucieux, cf. photo 3) étant réalisée sous la houlette et avec les idées de Roger Alfandari ; enfin, la partie réception (une bonne dizaine de doubles récepteurs : cinq meubles de 1 m³ remplis de transistors) était conçue par le seul M. Rousset.

Les Américains

On a dit plus haut que les Américains disposaient dès le début de 1959 de deux types de radars volumétriques 3 D déjà en production, avec des antennes de qualité moindre quant à la « pureté » du diagramme (surtout celle du FPS 7, celle du FPS 27 étant meilleure) et un émetteur moins puissant. Ils disposaient par ailleurs du GPA 73 (ou équivalent) de Hughes Aircraft, de même nature que notre naissant STRIDA.

Le Benelux

Le Benelux, tout à fait intéressé à ce que la défense aérienne de l'OTAN soit améliorée (rappelons que la Hollande s'était équipée d'un radar agile en fréquence, à TPOM), agissait en faisant bloc pour pousser cet organisme à l'action (avec notamment le colonel de Klippel, et le major Simon pour la Belgique).

Les Britanniques

Les militaires britanniques, tirant les leçons des performances possibles en matière de brouillage de radars, résultant en particulier de l'utilisation de carcinoïdes, puis d'autres tubes analogues, avaient défini une « menace » extrêmement puissante en la matière. Pour y faire face, ils avaient conçu deux types d'équipements de détection.

Une maquette de chacun existait au début des années 1960 :

- d'une part, un radar volumétrique à agilité de fréquence, extrêmement puissant, T 85, aussi appelé HPR (*High Power Radar*) et utilisant des klystrons, sur une définition commune, semble-t-il, entre l'industriel AEI (héritier de la société British Thomson-Houston, créée initialement, comme la Compagnie française Thomson-Houston, pour réaliser des tramways électriques selon les brevets de MM. Thomson et Houston) et le *Royal Radar Establishment* de Great Malvern (RRE, aujourd'hui DERA : *Defence Evaluation and Research Agency*) ;
- d'autre part, un système sophistiqué de localisation de brouilleurs, dit « détection passive », à base de triangulations améliorées par corrélations, étudié par Marconi (AEI et Marconi se réunirent plus tard pour donner naissance à GEC-Marconi).

AVANT L'APPEL D'OFFRES DE 1964

Le SHAPE

Le premier protagoniste, dans la rénovation de la défense aérienne de l'OTAN, était bien sûr le SHAPE, qu'on appelait simplement SHAPE, et qui était essentiellement incarné par un officier britannique, intelligent et fin, le *group captain* Ford, pénétré de la philosophie de son pays (dont il était peut-être l'un des créateurs). SHAPE disposait, pour le nourrir techniquement, d'un établissement technique, le *SHAPE Air Defence Technical Center* (SADTC, devenu plus tard le STC), où travaillaient, réfléchissaient et rédigeaient des ingénieurs provenant des pays de l'OTAN : à la fin des années 1950, M. Coignet de CSF et M. Vincelet de Thomson, puis Jacques Amann (plus tard chez Matra). Un Britannique très compétent venait de Marconi : Halliday.

L'IGESUCO

Au tout début des années 1960, le problème de la rénovation de la défense aérienne de l'OTAN s'est précisé au cours de premières réunions, et le Comité d'infrastructure de l'OTAN a confié le soin de définir ce qu'il y avait lieu de faire à un inévitable « sous-comité », l'IGESUCO (*Infrastructure Ground Environment Sub-Committee*), où la France était représentée par M. Degas (brillant inspecteur des Finances à la délégation française) et par l'ingénieur général G. Pérot, sous-directeur du STTA.

Commencèrent alors au STTA une série de réflexions sur la partie radar, entre Chambeau et Carpentier (du STTA) et Paufichet (de l'état-major), « asticotés » par Pérot. Ces réflexions étaient entrecoupées de visites au SADTC et au RRE, avec l'évidente intention que notre industrie participe au programme autrement que comme sous-traitante. La participation de la France au financement étant de 12 % (contre 20 % pour celle de la RFA), et, la règle du *return of payment* s'appliquant, nous étions sûrs de récupérer environ 12 % des dépenses, mais le STTA souhaitait obtenir des « dépenses nobles »¹⁸. Pérot, qui ne croyait pas trop aux talents de radaristes de notre industrie, comptait plutôt sur le STRIDA 2 pour nous mettre en bonne position, alors que les deux plus jeunes ingénieurs du STTA espéraient bien que nos efforts en matière de recherche radar seraient récompensés.

L'AFCAD

Dans cet esprit, Pérot négocia avec nos amis britanniques un accord permettant de faire quelque chemin ensemble. Ne possédant pas l'équivalent du STRIDA, ils acceptèrent de créer avec nous l'*Anglo-French Coopération for Air Defence* (AFCAD), qui réunissait, du côté industriel britannique, AEI et Marconi, et du côté industriel français, Thomson et IBM France, où entraît Paufichet.

¹⁸ Dépenses se rapportant à de la haute technologie, alors que dans une station radar, il y a aussi du béton...

Les Français visitèrent les réalisations britanniques, qui les déçurent quelque peu (il faut se rappeler qu'à l'époque, les Britanniques étaient considérés chez nous comme les maîtres du radar). Les Britanniques furent en échange très surpris des performances de nos émetteurs à klystrons et de la qualité des réalisations de Thomson (sur contrats STTA) en matière de compression d'impulsions, technique où ils n'étaient pas même novices.

Le GETIS et les spécifications techniques du NADGE

Au bout de deux ans, on était arrivé, à l'OTAN, à deux décisions : le montant maximal du budget alloué à ce qui s'appellerait le *Nato Air Defence Ground Environment* (NADGE), et la création, en mars 1962, au secrétariat international de l'OTAN (à l'époque à Paris, porte Dauphine), sous la direction d'un Français, Jean Danton, d'un petit groupe (GETIS, pour *Ground Environment Team of International Staff*) d'« experts internationaux » chargés de rédiger les spécifications techniques qui seraient annexées aux appels d'offre. L'IP Michel Carpentier y était détaché, en compagnie d'un officier belge, d'un expert hollandais et d'un Américain. En même temps, sous l'impulsion de l'IG Pérot, Jacques Paufichet était mis à la disposition du SADTC pour y occuper un poste important de responsabilité technique, et se retrouvait ainsi à nouveau l'interlocuteur-partenaire de Carpentier.

Six mois de discussions supplémentaires n'ayant pas permis de rendre compatibles les performances opérationnelles demandées par les Britanniques avec le budget alloué, l'IGESUCO décida de la réunion d'un panel, constitué (bien sûr) pratiquement des mêmes membres et d'une équipe du SADTC dirigée par Paufichet. Ce panel tint ses assises pendant deux longs jours et une courte nuit, et proposa d'utiliser comme outil de base non plus un HPR (*High Power Radar*, hors de prix), mais un plus raisonnable *Medium Power Radar* (MPR), complété plus tard soit par de la détection passive, avec laquelle il devait être compatible, soit par un autre outil de détection complémentaire, le *Long Dwell Time Radar* (dont un exemplaire fut réalisé en France et expérimenté au CEV). À la suite de ce panel, les Britanniques furent convaincus (par les Américains ?) de se rallier à ce schéma, qui prévoyait donc de procéder par étapes.

Le GETIS pouvait donc enfin rédiger les spécifications techniques des diverses composantes du NADGE ; Carpentier se chargeait de celle du MPR, sous la surveillance active et vigilante de Halliday, du SADTC (qui fut malheureusement victime d'un accident mortel avant le lancement du NADGE). La spécification se fondait sur ce que l'on savait faire de mieux en matière d'antenne (celle du Palmier G servant de modèle), en matière d'émetteur puissant et agile dans une large bande, et introduisait la nécessité de la compression d'impulsion (que n'avaient ni le T 85, ni les MPR américains, ni les Palmier français), pour améliorer très significativement le radar contre certains types de menace. Les propositions qui seraient faites par les industriels devaient, en utilisant des formules mises au point par Halliday, prouver sur le papier un certain nombre de performances. Le tout petit nombre d'experts de GETIS ne suffisant plus à la tâche

à la fin de 1963, la France (et d'autres pays avec elle) désigna des « experts nationaux » empruntés à l'industrie, hébergés dans une petite *start-up* que venait de créer J. Stern, et rétribués par le STTA. Certains d'entre eux restèrent dans cette position plusieurs années, en particulier pour aider au dépouillement des offres.

L'APPEL D'OFFRES (1964)

Les « forces » en présence

La fourniture demandée dans l'appel d'offre consistait essentiellement en :

- une douzaine de MPR, pour un tiers du budget total environ ;
- un système de traitement des informations du type STRIDA 2 ou GPA 73, pour un autre tiers ;
- et, pour le troisième tiers, des fournitures variées, comme la rénovation de radars existants ou des liaisons de télécommunications.

Les Américains étaient très bien placés *a priori* pour placer leur traitement des informations, qui était déjà opérationnel, et plus mal placés pour leurs radars, qui avaient finalement été conçus et réalisés trop tôt, et de ce fait avaient des antennes médiocres. Leurs émetteurs n'étaient pas assez puissants (les Américains étaient plus loin de la menace que les Européens).

Les Français pouvaient finalement faire des propositions valables techniquement sur tous les tableaux : le MPR (car le Palmier, légèrement modifié quant à l'antenne, et à condition de l'équiper de compression d'impulsion, ce qui était tout de même une modification significative, faisait très bien l'affaire), le traitement d'informations avec le STRIDA 2, et tout le reste. Au demeurant, ils disposaient de très loin du meilleur émetteur pour MPR.

Les Britanniques, qui avaient un peu considéré le NADGE, à sa genèse, comme une machine de guerre pour faire payer par les autres une partie du développement du T 85 et de la détection passive, et pour installer dans les pays européens des équipements britanniques (les équipements du NADGE devaient être installés en Europe continentale, hors du Royaume-Uni), se trouvaient gênés, car ils ne disposaient pas d'un traitement adéquat des informations, et parce que le HPR maquette existant nécessitait d'être modifié – il le fut d'ailleurs, plus tard.

Les Allemands ne souhaitaient pas avoir sur leur territoire un traitement des informations américain dans les bases américaines et un autre ailleurs, pour des raisons de compatibilité.

Un consortium qui présenterait à la fois le traitement des informations américain et le MPR Thomson avait sans doute *in fine* une assez grande chance de l'emporter, le montant du traitement des informations n'étant pas très différent de la mise financière des Américains (toujours le problème de *balance of payments*). Un consortium franco-français, de Thomson avec IBM France, n'avait bien sûr aucune chance.

Les consortiums

Tout cela, Gérard Cauvin, le négociateur de Thomson, le comprit fort bien, et il fit une proposition avec Hughes Aircraft, le producteur du traitement des informations américain.

Deux autres consortiums internationaux furent créés, qui remirent chacun une soumission, tous deux proposant d'ailleurs l'émetteur à klystron de Thomson comme émetteur du MPR.

Évidemment, si le consortium Hughes-Thomson était retenu, la seule fourniture des MPR correspondrait à un montant très supérieur à la part française de 12 %. Si l'on y ajoutait le traitement de données des stations françaises du NADGE, qui serait bien sûr IBM France, et quelques autres fournitures de l'industrie française, on dépasserait les 32 %, alors que les États-Unis n'auraient pas tout à fait leur « retour ». Il en résultait qu'il faudrait sous-traiter à des industriels d'autres nations participant au plan NADGE, comme l'Allemagne de l'Ouest, et un peu aux États-Unis.

Sans entrer dans le détail de toutes ces nécessaires sous-traitances, il fut essentiellement décidé que l'on sous-traiterait à l'industrie allemande (Telefunken) plus de la moitié de la fabrication des MPR, sous licence de Thomson, et que l'on achèterait aux États-Unis les « milieux dispersifs »¹⁹ nécessaires à la compression d'impulsion des MPR²⁰. À raison de plus de vingt par MPR, cela représentait au total plus de 200 milieux. Dans le cadre de la technologie classique de l'époque (circuiterie électronique dite « à constantes localisées »), chaque milieu occupait une dizaine de litres pour le rapport de compression demandé, et l'on avait démontré à l'époque²¹ que, dans ce cadre, même avec des astuces, le volume du milieu était proportionnel à la puissance 5/3 du rapport de compression (multiplication par 15 si le rapport de compression était multiplié par 5), ce qui n'incitait pas à l'augmenter trop.

Le succès de Thomson-Hughes... et l'invention des filtres acoustiques à ondes de surface

Une mission Thomson (avec M. Rousselot et M.-H. Carpentier) fut dépêchée aux États-Unis en 1965 pour contacter les fournisseurs possibles de tels milieux : un laboratoire de General Electric, qui fermait le lendemain (c'est-à-dire qui serait physiquement rasé), et que l'on pouvait racheter ou aider à s'installer à son compte, avec l'aide de la municipalité de Syracuse ; la société Andersen, qui proposait une solution originale électroacoustique, à base d'« ondes de volume » ; et la société Hazeltine, qui proposait une solution classique. Le général Thomas, patron d'Hazeltine, reçut les deux Français avec courtoisie (il était d'un naturel jovial), mais lorsqu'il apprit, par un coup de téléphone durant le déjeuner, que le consortium Thomson-Hughes était le « vainqueur » (et qu'il l'apprit

¹⁹ Composants ayant la propriété de transformer une impulsion monochromatique en impulsion à fréquence variable, au sein de l'impulsion.

²⁰ Ils servent, dans chaque récepteur radar, à raccourcir le signal de retour des cibles, et, de ce fait, à améliorer considérablement la qualité de mesure en distance.

²¹ Michel-Henri CARPENTIER, *Radars – Concepts nouveaux*, Dunod, 1966.

aux missionnaires Thomson), il ne put cacher son étonnement admiratif... et la fin du repas en fut très améliorée.

À la suite de cette mission, Hazeltine fut choisi comme fournisseur des milieux dispersifs des MPR que devait fournir Thomson, sous le nom d'ARES (cf. l'antenne de l'ARES en photo 4), bien que l'offre d'Andersen eût été très attractive, en raison du faible volume auquel elle conduisait²² et de la réduction corrélative des *impedimenta* (stabilisation de température...). Mais les performances des milieux Andersen n'étaient pas excellentes.

Au retour des États-Unis, lors du *debriefing* de la mission, Eugène Dieulesaint, du Laboratoire de recherches générales de Thomson, proposa de réaliser des dispositifs de même nature, mais en remplaçant l'utilisation d'ondes de volume par celle d'« ondes de surface », ce qui s'avéra une idée tout à fait géniale, non seulement pour les futurs milieux dispersifs de compression d'impulsions de radars, mais pour quantité d'autres filtres, notamment de téléviseurs couleurs. Ceux-ci furent fabriqués en grande série suivant l'invention d'Eugène Dieulesaint, et sont connus à l'étranger sous le nom de *SAW devices* (*Surface Acoustic Waves*).

Les ARES (MPR du NADGE) furent équipés par Thomson de milieux Hazeltine, mais les MPR Eliane commandés plus tard par la RFA à Thomson furent équipés de milieux Dieulesaint, ainsi que les radars volumétriques Irma, de nature voisine, achetés par l'Inde au début des années 1970, et les autres Irma construits plus tard en Inde sous licence Thomson.

Au total, une quarantaine de radars de la famille Palmier/ARES furent fabriqués : nombre très élevé pour ce type d'équipement.

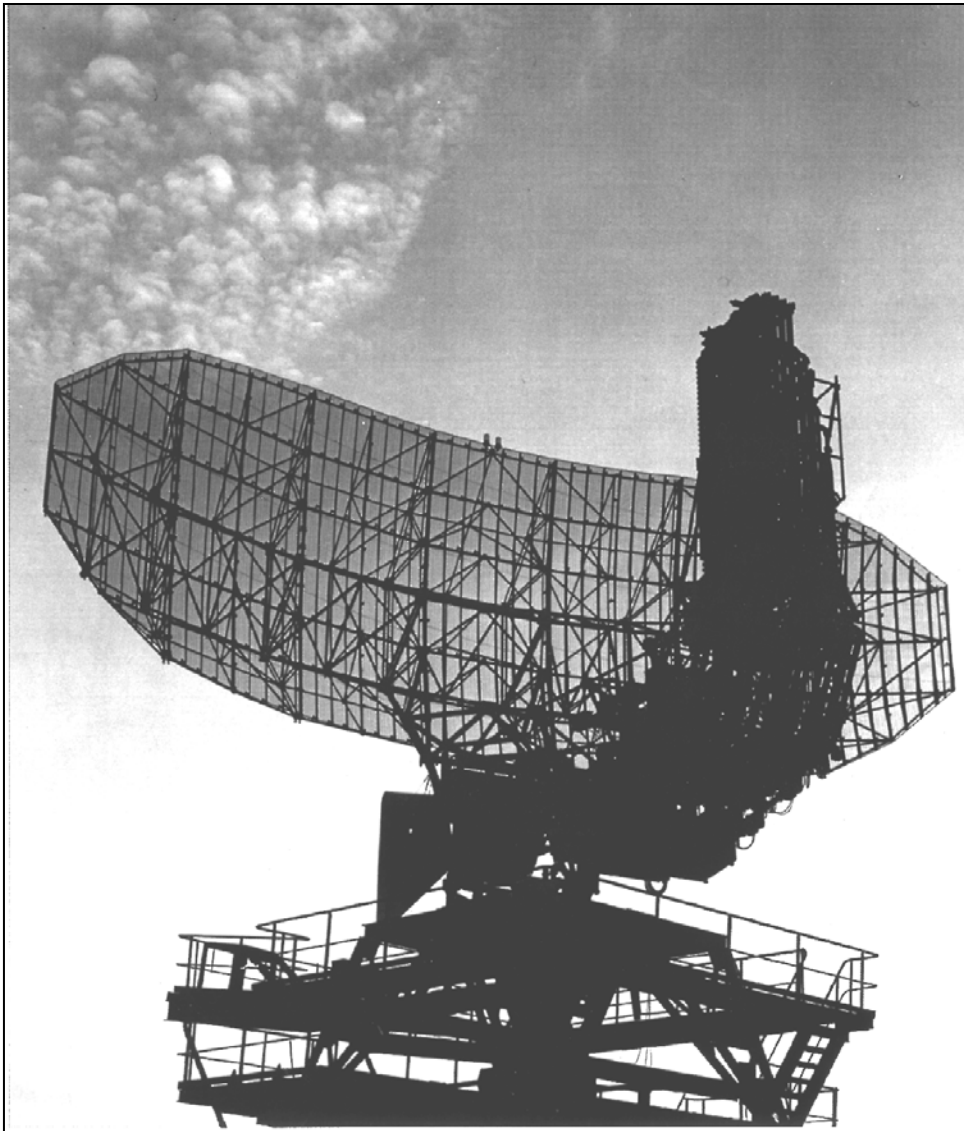
Thomson devenait à cette occasion un grand du domaine, reconnu comme tel par la communauté internationale.

AUJOURD'HUI

Aujourd'hui, Thomson-CSF est l'un des trois grands acteurs mondiaux des systèmes de défense aérienne, avec Raytheon et Northrop-Grumman, capable de fournir les radars de surveillance (radars 3 D de la famille MASTER, cf. photo 5) et l'ensemble des dispositifs de traitement des informations associés (en y incluant les moyens de communication). Cette activité est exportatrice à 80 %.

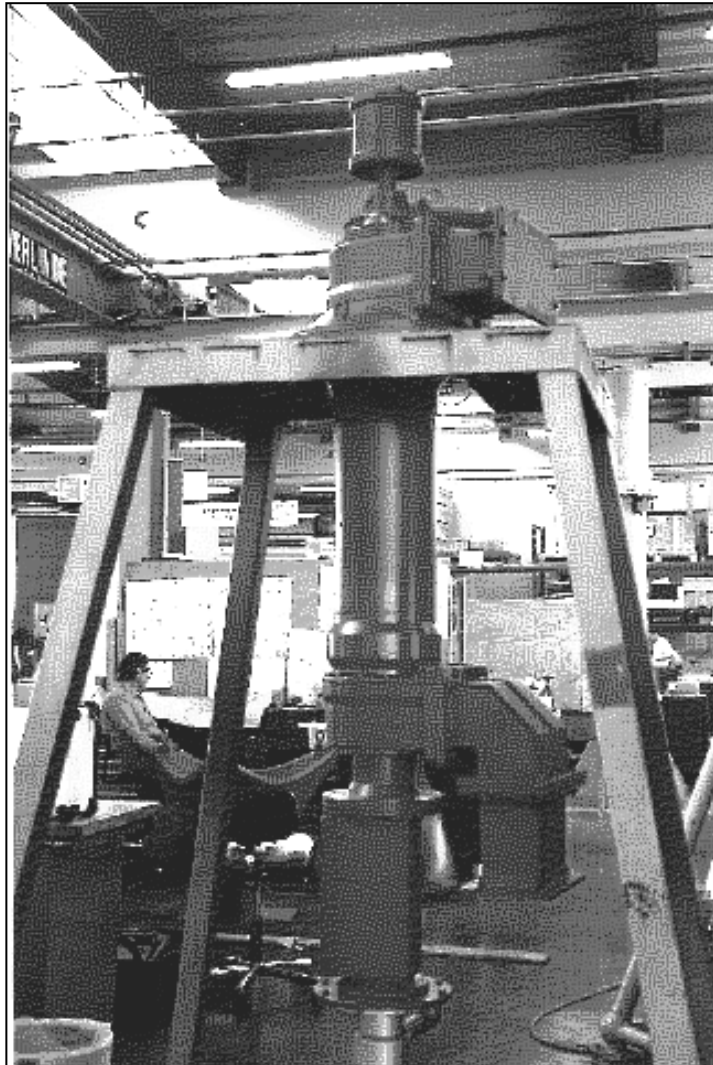
En 1999 a été signé le contrat de fourniture à l'OTAN de la première phase du système ACCS (*Air Command and Control System*), qui doit remplacer le NADGE en Europe. Ce contrat important (plusieurs milliards d'euros) sera exécuté par la société ACSI (*Air Command Systems International*), établie en France et formée à parité entre Thomson-CSF et Raytheon. Les deux partenaires avaient déjà remporté ensemble, en 1998, le contrat FLORAKO de surveillance de l'espace aérien suisse.

²² La vitesse du son dans les solides n'est que de quelques km/s, alors que celle des ondes électromagnétiques est de quelques centaines de milliers de km/s ; pour un retard donné, un dispositif à ultrasons est beaucoup plus petit.



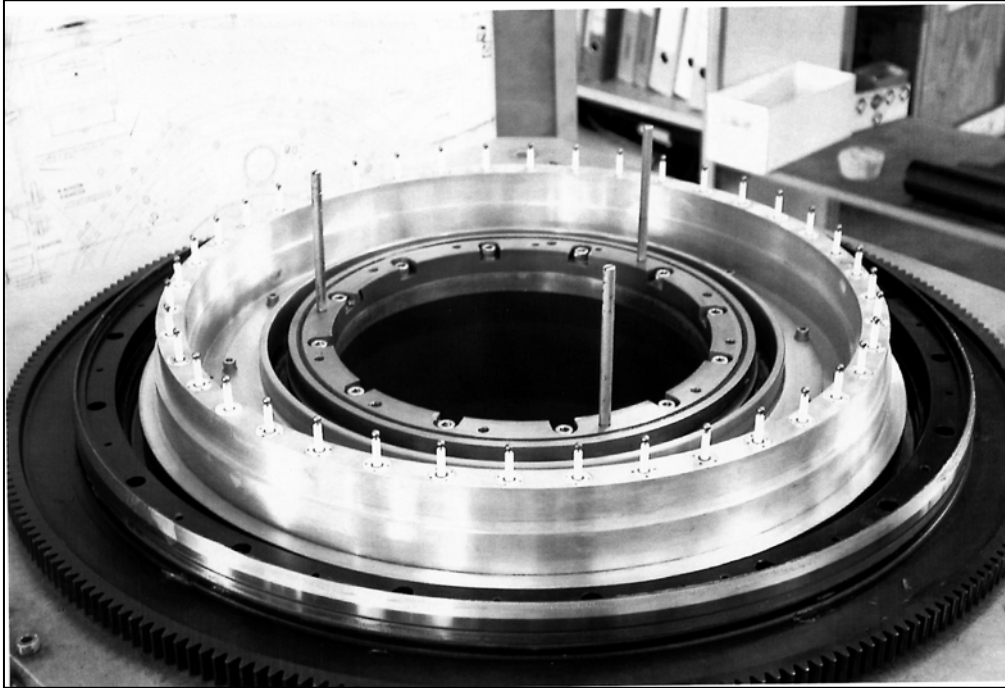
© Thales Air Defence

Photo 1 : Antenne du Palmier G



© Thales Air Defence

Photo 2 : Joint tournant de puissance des Palmier, Félix, ARES



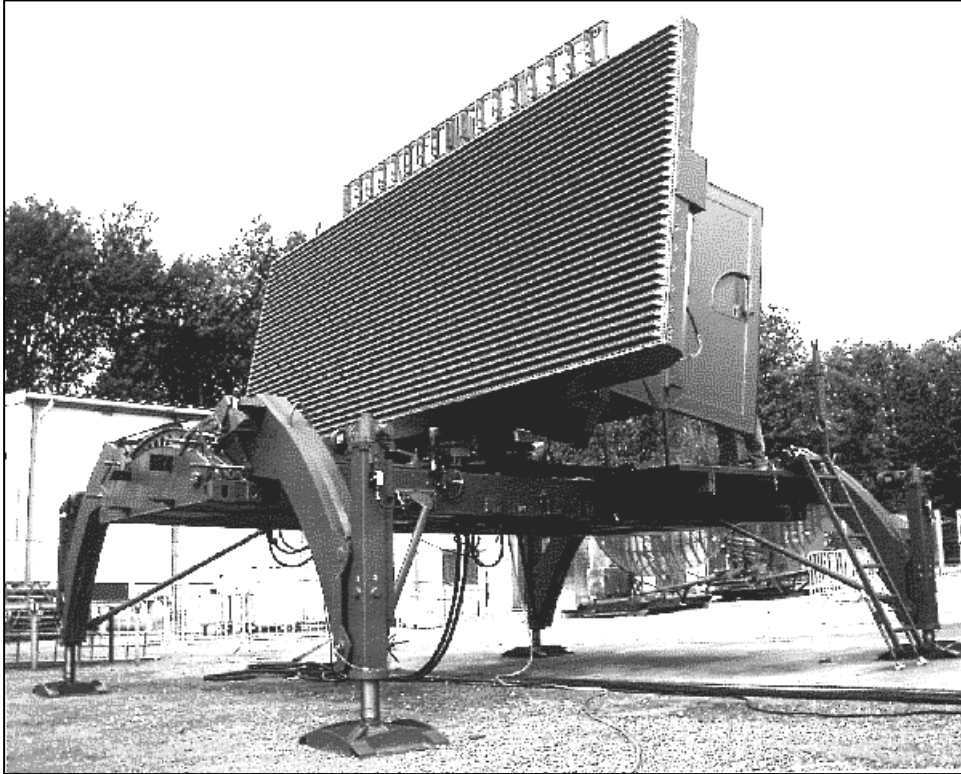
© Thales Air Defence

Photo 3 : Joint tournant multicanal moyenne fréquence des Palmier/ARES



© Thales Air Defence

Photo 4 : Antenne de l'ARES



© Thales Air Defence

Photo 5 : Radar MASTER T

CHAPITRE 5

LES RADARS AEROPORTES

par Pierre Barré¹

PARTICULARITES DES PROGRAMMES DE RADARS AEROPORTES

Ce qui marque par-dessus tout un radar aéroporté, c'est sa dépendance par rapport à l'avion porteur dans lequel il est installé : ce point peut paraître d'une banalité affligeante, mais est tellement important qu'il doit être rappelé et souligné.

En premier lieu, cette dépendance est opérationnelle : les fonctions qui sont demandées au radar découlent des missions du porteur (ou du système d'armes dans lequel il est intégré), lesquelles reflètent les préoccupations opérationnelles du moment. Dans les années cinquante, il s'agissait principalement de la défense aérienne contre les raids assaillants à haute altitude (menace n° 1 du bloc soviétique), de l'aide à l'appui tactique rapproché, de l'aide à la pénétration à haute altitude, pour la composante aéroportée de la FNS (Force nucléaire stratégique), et de la protection contre la menace sous-marine classique. Dans les années soixante, après le développement des systèmes de défense aérienne contre les avions volant à haute altitude et la généralisation de la menace à basse altitude, la demande opérationnelle évolua vers l'aide à la pénétration à basse altitude ou très basse altitude par tous les temps (jour, nuit, pluie, brouillard) et corrélativement vers la protection contre les raids assaillants à basse altitude, avec deux volets, l'alerte à grande distance et l'interception.

En second lieu, il y a la dépendance budgétaire : sans programme de développement de porteur ou de système d'armes, pas de budget de développement de radar associé et peu de moyens financiers pour préparer l'avenir. Ce point est à rapprocher du fait que, s'il était possible de développer un programme d'avion mettant en œuvre des techniques et technologies éprouvées et satisfaisant aux exigences opérationnelles, il fallait, pour aborder avec succès les radars aéroportés correspondants de nouvelle génération, mettre en œuvre des techniques et technologies entièrement nouvelles ayant des cycles de conception bien plus importants. Le STTA eut malheureusement souvent beaucoup de difficultés à faire comprendre ce point de vue et à le faire se concrétiser en espèces sonnantes et trébuchantes, ce qui se traduisait par des déphasages importants entre programmes avions et programmes de radars.

¹ En tant qu'ingénieur militaire de l'Air puis ingénieur de l'armement, Pierre Barré a été successivement ingénieur d'études au STTA (bureau SER/B1) de 1962 à 1969, ingénieur responsable de la coordination systèmes d'armes au STAé en 1969-1970, ingénieur de marque et directeur du programme Alphajet de 1970 à 1976, puis chef de la section des études radars au STTA de 1976 à 1979.

En troisième lieu, il y a la dépendance physique. L'implantation des matériels doit souvent être effectuée « aux forceps », dans un volume limité et des conditions d'ambiance (température et vibrations) préjudiciables à la bonne tenue du matériel. En outre, la liaison et l'intégration avec les autres composants du système d'armes s'imposent progressivement. Alors que, dans les années cinquante, les radars étaient conçus comme des entités pratiquement isolées dont les liens avec l'avion étaient limités, apparaît progressivement, dans les années soixante, la nécessité de confier la coordination « système d'armes » à un industriel qui, dans la plupart des cas, est l'avionneur².

BREF HISTORIQUE DES RADARS AÉROPORTÉS³

Il semble bien que le premier radar aéroporté utilisé en opérations l'ait été par les Britanniques, au tout début de la Seconde Guerre mondiale, pour le repérage des navires de surface et le ralliement sur lesdits navires : il s'agit de l'ASV (*Aircraft to Surface Vessel*) Mark-II, qui fonctionnait dans la bande des 200 MHz. Ce radar était équipé de deux aériens orientés latéralement pour la recherche, le « balayage » étant assuré grâce au déplacement de l'avion ; le ralliement, quant à lui, était obtenu par comparaison des niveaux reçus sur deux aériens orientés vers l'avant et décalés en azimut. Une copie de cet équipement fut réalisée ensuite par les Américains sous les appellations de SCR-521 et ASE.

Des principes similaires furent utilisés par les Britanniques pour la réalisation d'un matériel destiné à l'équipement des chasseurs de nuit : il s'agit de l'AI (*Aircraft Interception*) Mark-IV. Par rapport à la version ASV, ce radar disposait d'une voie écartométrie supplémentaire en site. Une copie de cet équipement fut également réalisée aux États-Unis, sous l'appellation de SCR-540.

Sensiblement à la même époque, il semble bien qu'un matériel fonctionnant sur des principes analogues ait été mis en œuvre par la *Luftwaffe* sur ses chasseurs de nuit Me-110 et Ju-88.

Fonctionnant à des fréquences très basses, donc avec des diagrammes de rayonnement larges, ces radars étaient fortement perturbés par les échos parasites de mer ou de sol. Ces perturbations étaient particulièrement gênantes pour les radars d'interception, dont la portée était limitée à la valeur de l'altitude de l'intercepteur. Ces perturbations incitèrent donc les ingénieurs à « monter en fréquence », afin d'obtenir des faisceaux étroits avec des antennes suffisamment petites. Une première maquette de radar en hyperfréquences fut essayée en vol dès mars 1941 aux États-Unis, et ce n'est qu'avec la généralisation de ce type de matériels, dans la seconde moitié de la guerre, que l'on vit apparaître des radars aéroportés au fonctionnement satisfaisant.

Paradoxalement, il semble bien que l'*US Navy* ait été, durant cette période, le plus gros utilisateur de radars aéroportés, confrontée qu'elle était, dans le

² À ma connaissance, la seule exception à cette règle fut la coordination de système d'armes du Mirage III C, confiée à CSF, constructeur du radar et du viseur.

³ La majeure partie des données de ce chapitre est tirée de Louis N. RIDENOUR (dir.), *Conception et réalisation de dispositifs radar*, Chrion, 1955, édition en langue française de Louis N. RIDENOUR (ed.), *Radar System Engineering*, New York-London, McGraw Hill, 1947.

Pacifique, à la lutte contre la flotte japonaise (flotte de surface, aviation embarquée), et, dans l'Atlantique, à la lutte anti-sous-marine. En revanche, pour l'*US Air Force* et la *Royal Air Force*, la menace des bombardiers allemands était devenue secondaire dans cette seconde moitié de la guerre.

Sans que cette liste soit exhaustive, on peut citer pêle-mêle, dans le domaine des radars air-sol et air-surface :

- le radar panoramique air-surface SCR-717 ou ASG en bande S ;
- le radar AN/APS-15 en bande X, conçu pour le bombardement mais utilisé également pour la veille air-surface ;
- les radars en bande X de type ASD, AN/APS-3, AN/APS-4, destinés aux avions torpilleurs embarqués de l'*US Navy*, et permettant le ralliement sur navire de surface. Comme ils étaient installés sur monomoteur à hélice, l'antenne de ces radars était implantée dans un carénage encastré sous le bord d'attaque de la voilure, et l'ensemble émetteur-récepteur dans un bidon sous voilure ;
- le radar en bande S de détection ASM (*Anti Submarine*) équipant l'avion de lutte anti-sous-marine TBM : il s'agit probablement là du plus gros radar aéroporté jamais installé sur avion monomoteur embarqué, avec une antenne de plus de deux mètres de diamètre dans un radôme non escamotable sous fuselage.

Et, dans le domaine des radars air-air :

- le radar en bande S, pour chasseur de nuit, dérivé du radar sol SCR-584 de type COTAL, baptisé SCR-702, AN/APG-1, AN APG-2 ;
- le radar en bande S SCR-720, à antenne parabolique de 75 cm, utilisé par l'*US Air Force* et la *Royal Air Force* ;
- le radar en bande X AN/APS-6 pour l'*US Navy*, logé en nacelle comme l'APS-3 ;
- le télémètre bande X réalisé pour la télécommande des mitrailleuses de tourelle du B-29.

PRINCIPALES CATEGORIES DE RADARS AEROPORTES

Dans le cadre des missions opérationnelles évoquées plus haut, il faut distinguer :

- les radars d'alerte avancée, ou AEW (*Airborne Early Warning*), qui permettent d'assurer à grande distance la détection et la poursuite des avions assaillants, une attention particulière étant dévolue aux avions volant à basse altitude ;
- les radars de surveillance maritime, conçus pour la lutte contre les navires de surface et la lutte contre la menace sous-marine classique ;
- les radars d'interception qui, au départ, visent la menace à haute altitude puis, à partir des années soixante, la menace à très basse altitude ;
- les radars air-sol qui permettent, dans un premier temps, d'effectuer la cartographie des zones survolées, le recalage de la navigation en aveugle et la désignation d'objectif ; dans un second temps, ce type de radar fut doté

- d'une fonction dite de « découpe » permettant la pénétration à basse altitude tous temps puis, ultérieurement, de fonctions de suivi de terrain autorisant le vol à très basse altitude en manuel ou en automatique ;
- les radars de cartographie fine pour la reconnaissance tous temps, l'objectif étant d'obtenir des clichés dont la définition puisse approcher celle des capteurs photographiques ;
 - les radars météorologiques, mentionnés pour mémoire : ils furent développés principalement pour les avions de transport civils, et on les retrouva sur la plupart des avions de transport militaires.

PRINCIPAUX ACTEURS INDUSTRIELS DANS LE MONDE OCCIDENTAL

Au lendemain de la guerre, l'industrie américaine dominait le secteur, et son avance sur le reste du monde était écrasante. Parmi les acteurs principaux qui ont marqué les années soixante, sans que cette liste soit exhaustive, on peut citer :

- Westinghouse (radar du F 4, radar de l'AWACS) ;
- Hughes (radars des F 102 et F 106) ;
- Autonetics, filiale électronique de Lockheed (radar NASARR du F 104) ;
- Emerson (radar du F 5) ;
- Texas Instruments (radar du F 111) ;
- General Electric (radar du *Hawkeye*).

L'industrie britannique occupait également une place de choix, avec :

- Ferranti (radars des P2, *Buccaneer*, TSR 2) ;
- Elliott, intégré dans Marconi puis GEC (AEW, radar air-air du *Multirole Combat Aircraft* ou MRCA) ;
- EMI (radar à antenne latérale millimétrique).

Il convient également de signaler Ericson, en Suède, qui réalisa successivement les radars des JAS 35, JAS 37, JAS 39.

En France, il ne restait plus en lice, au début des années 1960, que deux acteurs, CSF et EMD (Électronique Marcel Dassault), que le STTA incita d'ailleurs rapidement à travailler en coopération pour la préparation des générations futures de matériels doppler, faute de moyens budgétaires pour alimenter simultanément deux bureaux d'études sur des projets concurrents.

La société Derveaux, qui avait réalisé, dans la décennie précédente, sur contrat du STAé Armements, une famille de télémètres radars air-air destinés aux intercepteurs *Mystère*, avait disparu à la suite d'une faillite. Ses activités avaient été reprises par COTELEC, qui avait abandonné les radars de bord, mais conservé les activités optroniques (notamment le viseur hyposcopique du *Mirage IV*).

La CFTH (Compagnie française Thomson-Houston) avait tenté de développer une activité radars aéroportés, d'abord par prise de licence américaine, puis par développements propres, mais ces tentatives firent long feu, par suite de

l'abandon des programmes d'avion ou de l'échec des développements envisagés.

On peut mentionner également :

- OMEGA (Société d'optique, mécanique, électricité, radio pour l'aéronautique), qui réalisa dans les années soixante-dix des radars de surveillance maritime pour hélicoptères (l'activité radars de cette filiale de TRT fut intégrée à la fin des années 1980 dans Thomson-CSF RCM) ;
- LCT qui, sur contrat de la SEFT (Section d'études et fabrications des télécommunications de l'armée de Terre), développa, sur la base de matériels sol, un radar de surveillance du champ de bataille dont l'installation, prévue initialement pour la plate-forme captive Orphée, se concrétisa ultérieurement par le programme Orchidée (activité également intégrée dans les années 1980 à Thomson-CSF RCM) ;
- Air-Équipement, qui fabriqua sous licence Bendix le radar météorologique du Transall.

LES ANNEES 1945-1960 AU STTA

À l'issue de la guerre, les armées françaises mettaient en œuvre, pour l'essentiel, des avions anglo-saxons et, par voie de conséquence, des radars anglo-saxons lorsque ces avions en étaient équipés. Ces appareils avaient pour eux d'être opérationnels et d'avoir généralement subi le baptême du feu.

Dans cette période, les industries aéronautiques et électroniques nationales rencontrèrent par ailleurs de nombreuses difficultés pour satisfaire les besoins des états-majors, ce qui contraignit ces derniers à poursuivre leur équipement avec des appareils étrangers importés ou fabriqués sous licence (Vampire, Mistral, Meteor NF-11 pour l'armée de l'Air, Lancaster ASM, TBM, Sea Venom Aquilon, Neptune P2V6/P2V7 pour la Marine).

Le handicap de l'industrie française des radars aéroportés, alors inexistante, fut donc considérable, et il fallut beaucoup de persuasion pour faire prévaloir le choix de solutions purement nationales.

Au sein du STTA, le premier responsable de cette ligne de produits fut l'ingénieur militaire de l'Air Roger Léonetti. On disait, dans les années 1960, que si la France avait pu se doter d'une industrie de radars aéroportés, elle le devait pour une grande part à son opiniâtreté, à sa volonté d'aboutir et à ses talents de persuasion.

C'est en effet sous sa conduite que furent développés par CSF les premiers radars aéroportés d'interception français fabriqués en série, les DRAC-25 et DRAC-32, pour la version chasse de nuit du Vautour de la SNCASO (Société nationale de constructions aéronautiques du sud-ouest, l'un des ancêtres de Sud-Aviation, de la SNIAS, de l'Aérospatiale, puis d'EADS).

Faute d'avoir pu questionner Roger Léonetti, disparu dans le courant de l'été 2001, et d'avoir eu accès aux archives du STTA, je dispose de fort peu d'informations sur la période d'une dizaine d'années qui précéda ce premier succès de l'industrie nationale, hormis quelques éléments recueillis dans l'ou-

vrage de Jean Cuny, *Avions de combat français, 1944-1960*⁴. Je rapporte donc succinctement ces informations, sans être en mesure toutefois de préciser quelle fut l'implication et le rôle du STTA dans les projets envisagés.

Pendant cette période, deux voies furent explorées : l'approvisionnement en matériels étrangers, avec ou sans prise de licence, et le développement de solutions nationales, avec des résultats plus ou moins heureux.

En ce qui concerne les matériels étrangers :

- la CFTH avait proposé, très tôt, de fabriquer sous licence l'AN/APS-6, afin d'équiper les chasseurs de nuit en projet à l'époque, l'Espadon notamment. L'implantation de ce même radar fut également envisagée par la suite sur Mistral et sur Ouragan ;
- l'on avait envisagé la fabrication sous licence d'un radar britannique, l'AI Mk-9C, pour équiper le chasseur de nuit Vampire 113, alors en projet et finalement abandonné au profit du Meteor NF-11 approvisionné directement en Grande-Bretagne ;
- l'implantation d'un radar américain, l'AN/APG-33, ou d'un radar CSF avait été envisagée sur le projet d'intercepteur de nuit de la GAMD (Générale Aéronautique Marcel Dassault), le Mystère IV C ;
- la SNCASO avait prévu le montage de l'APQ-41 sur la version chasse tous temps de son projet SO-6160 destiné à la Marine.

En ce qui concerne les développements nationaux :

- SFR (intégré par la suite dans CSF) avait réalisé un prototype de télémètre radar, ainsi qu'un prototype de radar équipé d'une antenne à balayage spirale, dont la conception semble fortement inspirée par l'AN/APS-6 américain⁵ ;
- CFTH fit une tentative malheureuse dans le développement du DRAC-11 A, destiné à l'Aquilon et dont l'échec contraignit la Marine à acquérir l'APQ-65 (version évoluée de l'APQ-41) ;
- CSF vendit son radar RA-223 (d'une technologie analogue à celle du DRAC-25) à l'armée de l'Air suédoise⁶.

En 1953, l'armée de l'Air émit la fiche programme de l'intercepteur léger, qui allait conduire à la réalisation de plusieurs prototypes d'avions (Mirage I, Trident, Durandal).

Pour ce type d'appareils, le STTA lança le développement de radars dénommés éclaireurs-pointeurs auprès de GAMD (Aladin) et de CFTH. Ces radars avaient des performances modestes, compte tenu du volume limité qui leur était alloué dans la pointe avant fort effilée de ce type d'avions. Ils ne débouchèrent pas sur une production en série, par suite de l'abandon du programme d'intercepteur léger au profit d'un avion de combat polyvalent, le Mirage III.

⁴ Jean CUNY, *Les avions de combat français, 1944-1960*, éd. Larivière, 1988 : notamment dans le chapitre 5, dédié aux chasseurs de nuit et tous temps (p. 127) et dans le chapitre 13, dédié à la chasse navale à réaction (p. 249).

⁵ *L'industrie aéronautique et spatiale française, 1907-1982*, publié par le GIFAS, tome 3 : 1947-1982, *Programmes et matériels*, p. 484.

⁶ Ici s'achèvent les éléments tirés de Jean CUNY, *op. cit.*

Quant aux premiers radars aéroportés de conception française DRAC-25 et DRAC-32 déjà évoqués plus haut, ils furent mis en service opérationnel sur Vautour-N en 1957. Ces radars fonctionnaient en bande X et étaient dotés d'une antenne à *scanning* (balayage mécanique) mue par des moteurs hydrauliques. Les informations étaient exploitées par un opérateur radar situé en place arrière. La technologie utilisée était à base de tubes. Somme toute, il s'agissait de matériels assez peu différents des radars américains de la fin de la guerre. Les principaux sous-ensembles (émetteur, récepteur) étaient implantés dans des bidons séparés pressurisés.

Dans la même technologie, réalisé également par CSF, il y eut le radar ASM DRAA-2A de l'avion embarqué de lutte anti-sous-marine Bréguet Alizé. Il s'agissait également d'un radar en bande X, avec émetteur à magnétron, dont l'antenne à balayage panoramique, avec son radôme, étaient installés sur une plate-forme escamotable sous le fuselage de l'avion (procédé déjà utilisé par les Américains à la fin de la guerre, pour diminuer la traînée aérodynamique du radôme lorsque le radar n'est pas en fonctionnement). Une version dérivée de ce matériel, le DRAA-2B, fut développée à la fin des années 1950 pour l'avion de patrouille maritime Bréguet Atlantic.

CSF développa également le radar de navigation et de bombardement RA-575, destiné au Mirage IV. Cet équipement, classé en catégorie C, c'est-à-dire approvisionné par l'avionneur maître d'œuvre, était suivi techniquement par les équipes du STTA. Ce radar avait la particularité d'être équipé d'une antenne plate à fentes à balayage panoramique, implantée dans un radôme plat sous le fuselage de l'avion. Cette caractéristique permettait de minimiser l'excroissance du radôme et, par voie de conséquence, la traînée aérodynamique ; le radar pouvait donc être utilisé pendant toutes les phases de vol, y compris en supersonique.

Chez le principal concurrent de la CSF à l'époque, le département électronique de la GAMD, devenu par la suite EMD, puis ESD (Électronique Serge Dassault), il faut mentionner le télémètre radar Aïda, dérivé de l'éclaireur-pointeur Aladin, destiné à l'Étendard IV Marine doté de fonctions air-surface et air-air ; également le radar d'interception Super-Aïda, développé sur fonds propres par GAMD pour le Mirage III. Un prototype de ce radar fut d'ailleurs essayé avec succès au CEV sur le prototype du Mystère IV N, mais ne déboucha pas sur une production en série. Le Cyrano de CSF lui fut en effet préféré, car il était réalisé dans une technologie plus récente (tubes subminiatures) et doté d'une antenne à écartométrie *monopulse*, censée lui conférer de meilleures performances en présence de brouillage, ainsi que d'un calculateur de tir qualifié d'original.

La décision de lancer le programme Mirage III fut prise à la fin de 1957. Un prototype de Mirage volait alors déjà depuis plus d'un an. Le choix du radar⁷, en

⁷ Outre le Cyrano de CSF et le Super-Aïda de GAMD, qui étaient restés finalement en lice, le service avait également examiné la possibilité de choisir un radar britannique de Ferranti. GAMD, le concurrent malheureux, fut retenu en 1960 pour la réalisation de l'autodirecteur semi-actif AD-26 du missile air-air Matra 530, après mise en concurrence avec la CFTH.

l'occurrence le Cyrano de CSF⁸, fut effectué à la fin de 1958, conjointement par le chef d'état-major de l'armée de l'Air et le directeur technique et industriel de l'aéronautique, sur proposition du STTA. Ce radar n'existait alors qu'à l'état de maquette. Les contrats d'étude-prototype et de série furent notifiés rapidement à quelques jours d'intervalle. Leurs clauses étaient redoutables : délai d'un an pour le premier prototype, 27 mois pour le premier exemplaire de série, cadence série (en régime établi) d'un radar tous les deux jours, pénalités doublées en cas de retard...

Dans l'ensemble, ces délais furent tenus : il s'agit là d'un vrai tour de force des ingénieurs et techniciens de la CSF, dont les horaires dépassèrent manifestement les 35 heures hebdomadaires. Ce matériel était d'une complexité encore jamais vue : outre les fonctions de détection et de poursuite, il comportait des fonctions de calcul automatique de navigation et de domaine de tir, toutes réalisées en analogique. Les ingénieurs de la CSF furent en outre confrontés à des contraintes d'environnement difficiles : volume limité de la pointe avant, radôme effilé entraînant des réflexions parasites gênantes, obstruction de la visibilité vers l'avant par une perche anémométrique de très grande dimensions, qui provoquait de fortes perturbations dans le diagramme de rayonnement de l'antenne, pas d'opérateur radar, mais exploitation des informations par le seul pilote, dans un cockpit très lumineux imposant l'emploi de tubes à entretien d'image à la dynamique limitée...

Inutile de rappeler que dans ce contexte, un an après la sortie des premiers exemplaires de série, on avait déjà dépassé la centaine de modifications. À ceux qui ont vécu cette période, rappelons quelques mots susceptibles de raviver leurs souvenirs : banane, chaussette, passage de la ligne d'altitude, fuites de coolanol, trou de détection, modification 107 A, etc.

Le Cyrano 1 bis fut le premier radar aéroporté moderne conçu en France. Il fut malheureusement confronté à des difficultés de mise au point qui résultaient, pour une bonne part, de la précipitation avec laquelle il avait été lancé et des objectifs ambitieux qui lui avaient été assignés ; il souffrit en outre beaucoup d'une fiabilité défailante, que la technologie disponible à l'époque ne permettait pas d'améliorer.

Par la suite, au début des années soixante, on développa, pour le Mirage III E, le Cyrano II, très étroitement dérivé du Cyrano I bis pour les fonctions air-air, et que l'on dota de fonctions air-sol (visualisation, découpe, télémétrie air-sol) qui permettaient à l'avion d'effectuer des missions de pénétration à basse altitude (1 500-3 000 pieds) et de délivrer une arme nucléaire tactique par tout temps.

⁸ Qui, après de sérieuses modifications d'implantation (notamment le remplacement de la mécanique d'antenne à parallélogramme par un montage mécanique plus simple, ayant la forme de la lettre C), fut livré en série sous l'appellation Cyrano 1bis, ou DRAC-36.

L'EVOLUTION DES BESOINS OPERATIONNELS DANS LES ANNEES 1960

En ce début de décennie, les progrès réalisés en matière de défense aérienne étaient considérables (alerte, exploitation, intercepteurs, missiles sol-air). La pénétration à haute altitude, et même à très haute altitude, s'avérait donc de plus en plus risquée (cf. l'avion espion U2, abattu en 1960 au-dessus de l'Union soviétique, avec à son bord l'aviateur Powers). Cela contraignit les états-majors à revoir leurs choix et à s'orienter vers les missions de pénétration à basse altitude (1 500-3 000 pieds), ou même à très basse altitude (200-300 pieds), menaces contre lesquelles les systèmes de défense anti-aérienne existants étaient aveugles et peu efficaces. Une évolution comparable pouvait se constater chez les adversaires potentiels : le besoin se fit donc sentir de moyens de défense adaptés. Pour la composante aérienne, cela consista en des systèmes d'alerte avancée qui, compte tenu de l'altitude de vol des assaillants, ne pouvaient être réalisés qu'à partir de plates-formes volantes (AEW) et d'intercepteurs basse altitude.

C'est dans ce contexte que furent lancés, dans un premier temps, les F 105 aux États-Unis, *Buccaneer* en Grande-Bretagne, F 104 G en RFA, Mirage III E en France, qui, équipés d'un radar « peu ambitieux » doté de fonctions de visualisation et de découpe, pouvaient effectuer des missions de pénétration à basse altitude en pilotage manuel et dans de mauvaises conditions de visibilité. Dans un second temps, on vit apparaître des projets beaucoup plus ambitieux, tels que le TSR 2 britannique (équipé de deux moteurs Olympus), le Mirage III V français ou le F 111 américain (équipé de deux moteurs TF-30).

Au début des années soixante, avant que le gouvernement travailliste de Wilson ne décidât l'abandon du programme TSR 2, les Britanniques étaient manifestement en avance dans le domaine de la pénétration à très basse altitude. Dès 1962, il avaient fait voler (en automatique ?) un *Buccaneer* équipé d'un prototype de radar de suivi de terrain.

En France, les projets de programmes avions correspondant à ce besoin se succédèrent pendant toute la décennie, à un rythme élevé mais sans qu'aucun ne soit fabriqué en série (Mirage III V, Mirage III T2, Mirage F2, AFVG⁹, Mirage G, Mirage G4...).

Dans le domaine de la défense aérienne basse altitude, les projets d'avions se succédèrent également sans succès (intercepteur futur pour la Marine, Mirage F3, AFVG, Mirage G8...). Faute de ressources budgétaires suffisantes, l'armée de l'Air dut se contenter, à la fin de la décennie, du Mirage F1, uniquement dédié à l'interception haute altitude. La concrétisation de ces programme basse altitude ne fut effective que quinze ans plus tard, avec le lancement du Mirage 2000.

Par ailleurs, on évoqua de façon éphémère la réalisation d'un AEW embarqué franco-britannique. Ce projet fit long feu après que le gouvernement britannique eut décidé de ne pas renouveler, à terme, sa flotte de porte-avions. On évoqua également la réalisation d'un projet pour l'armée de l'Air, que l'on envisagea d'implanter sur différents porteurs (Bréguet 941, Transall, DC 7, DC 8...).

⁹ Avion franco-anglais à géométrie variable.

La succession rapide de tous ces projets particulièrement ambitieux et l'avenir qui leur fut réservé furent la conséquence :

- des difficultés budgétaires du moment (l'armement tactique n'était pas prioritaire dans le budget de la défense, contrairement aux SSBS, sol-sol balistiques stratégiques, puis MSBS, mer-sol balistiques stratégiques) ;
- de l'évolution de la politique moteur, qui vit le retour à des solutions purement nationales modestes (ATAR-9K50), au détriment de solutions plus ambitieuses (TF-306 sous licence américaine) ;
- des heurs et malheurs de la coopération franco-britannique en matière d'avions militaires.

C'est dans ce contexte qu'un ensemble d'études préparatoires furent lancées, avec des moyens forcément limités, quelques fois même dérisoires compte tenu des enjeux : ces projets ne virent finalement le jour que dans les années 1980.

LES PROGRAMMES AIR-SOL DANS LES ANNEES 1960

En matière de pénétration et de navigation à basse altitude, le STTA avait lancé au tout début des années 1960 :

- une maquette de radar en bande Ku (bande de longueur d'onde centimétrique), essentiellement dévolue au suivi de terrain dans le plan vertical, baptisée Antilope, chez Électronique Marcel Dassault. Elle fut essayée en vol dès 1963, sur avion de servitude B-26, avec des résultats très encourageants ;
- une maquette de radar de cartographie du sol à antenne latérale et affinage de pinceau par filtrage doppler, baptisée Rafal, chez CSF. Cette maquette était dotée d'un émetteur à magnétron en bande X, de l'antenne plate à fente du RA-575, d'un récepteur cohérent et d'un banc de filtres de réjection doppler. Elle fut également expérimentée avec succès sur B-26 dès 1964, et permettait d'obtenir une résolution de l'ordre de la dizaine de mètres à 10 km ;
- une maquette de circuits de suivi de terrain (Cobra) chez CSF, expérimentée dès 1963 sur un prototype Cyrano installé dans le SO-30P n° 16.

C'est dans le courant de l'année 1963 que le STTA décida de relancer la concurrence entre les deux industriels nationaux, EMD et CSF, et leur passa commande de prototypes de définition de radars de suivi de terrain pour le projet d'avion de pénétration français : le Mirage III V (puis, après l'abandon du décollage vertical, le Mirage III T2, puis le Mirage F2 : malgré la valse des projets avion, les interfaces radar-avion restèrent heureusement inchangées). Ces radars devaient permettre d'assurer simultanément le vol automatique à très basse altitude (200 pieds) dans le plan vertical, la découpe dans le plan horizontal permettant au pilote d'infléchir éventuellement son itinéraire, la visualisation du sol, pour assurer le recalage de la navigation, et la télémétrie air-sol pour le largage des armements tactiques. EMD (devenue plus tard ESD) réalisa les deux prototypes Antilope en bande Ku. CSF réalisa les deux prototypes Cobra en bande X.

Ces prototypes furent expérimentés en vol manuel sur avion de servitude Vautour-N dès 1966. À l'issue de plus de deux ans d'essais en vol, le STTA retint le projet Antilope pour la poursuite des essais en vol, en liaison avec le pilote automatique SFENA.

Parallèlement, le STTA avait négocié longuement avec le Service technique aéronautique d'une part, AMD (Avions Marcel Dassault) et CSF d'autre part, les clauses techniques et les conditions d'implantation d'un radar de cartographie du sol de type Rafal pour assurer un recalage de navigation précis. Ce projet ambitieux ne vit pas le jour : il grevait par trop le budget d'un programme avion qui, lui-même, vacillait faute de financement. En revanche, la technique Rafal fut mise à profit pour des applications de reconnaissance aérienne tous temps (cf. *infra*).

Toujours dans le domaine du recalage de la navigation, le STTA s'était intéressé au recalage par « corrélation altimétrique », procédé dans lequel on se positionne sur une carte géographique en comparant le profil du terrain survolé, mesuré à l'aide d'une radiosonde, avec des profils de cartes mis en mémoire. Roger Léonetti avait ramené l'idée d'une mission aux États-Unis, où on lui avait succinctement parlé d'un projet baptisé TERCOM (*Terrain Contour and Matching*). Sur ces bases succinctes, le STTA avait lancé les premières études de concept auprès des sociétés de services AERO, puis SESA. Ces études, confortées par des calculs effectués au sol à partir d'enregistrements en vol de sondes radio sur des terrains plus ou moins accidentés, avaient montré la validité du procédé. La difficulté du projet résidait à l'époque dans la disponibilité de moyens de stockage et de traitement de l'information adaptés. Après consultation, le STTA confia à CFTH l'étude et la réalisation d'un prototype baptisé Coraline (Corrélation altimétrique et inertie), fondé sur deux types de calculateurs, un calculateur numérique classique et un calculateur original de type optique. Ce projet fut malheureusement sacrifié l'année suivante, après une réduction drastique du budget de l'armée de l'Air et le renvoi aux calendes grecques de l'avion de pénétration à basse altitude.

Dans le domaine des hélicoptères, l'armée de Terre avait émis le besoin, pour sa flotte de SA-330 Puma, d'un système de navigation à très basse altitude. Le concept envisagé reposait sur un chef de patrouille suréquipé en moyens de navigation précis, et sur une cohorte d'esclaves rivée à lui grâce à un système de tenue de poste. Le bureau B1, chargé du système de suivi de terrain, confia à ESD l'étude du radar Saïga, radar millimétrique qui donnait au pilote une visualisation de type télévision de l'horizon en site-gisement. Mais, quinze mois après son lancement, ce projet de navigation tous temps à basse altitude fut également abandonné pour des raisons budgétaires. Seuls deux prototypes de radar furent finalisés et expérimentés à la sauvette, uniquement au sol.

Enfin, pour répondre à un besoin de système de reconnaissance tous temps, le STTA lança en 1964 la réalisation d'un projet ambitieux de radar de cartographie Rafal auprès de la CSF. Ce matériel cumulait les nouveautés et les difficultés, parmi lesquelles on peut citer :

- un émetteur-récepteur cohérent à chaîne d'amplification à TPO (tube à propagation d'onde) ;
- une stabilisation d'antenne ultra sensible et la nécessité de connaître les mouvements du centre de phase au millimètre près ;
- un traitement du signal par corrélation optique.

L'objectif visé, qui fut d'ailleurs atteint, était une résolution de quelques mètres, qui permettait d'obtenir des clichés qui, bien que n'atteignant pas la qualité des clichés photographiques classiques, permettaient néanmoins d'identifier correctement les objectifs militaires. Le prototype fut essayé sur Vautour dès 1967. La vidéo « brute » était enregistrée à bord sur film photo. Après développement au sol et traitement dans un corrélateur optique (réalisé par la société américaine Conductron selon les spécifications de CSF), l'information était présentée sur film photographique. Quelle ne fut pas notre admiration à la découverte des premiers clichés ! Silhouettes d'avions alignés sur un parking, échos de véhicules terrestres sur routes ou à leur voisinage, ornières de roues dans des champs boueux, haies de séparation des champs dans le bocage et même, bien que cet objectif soit assez peu militaire, décompte des vaches dans un pré !

Il faut signaler également l'implication du bureau B1 (radars de bord) dans les déclencheurs altimétriques radar (DAR) destinés à l'armement nucléaire. Le STTA avait été impliqué à l'origine dans le développement du DAR-52 de TRT, destiné à l'arme nucléaire du Mirage IV : il s'agissait en l'occurrence d'un matériel dérivé des sondes altimétriques aéroportées, mais doté de sérieuses protections contre le brouillage. Fort de cette expérience, le STTA joua par la suite le rôle de conseiller technique de la DTEN (Direction technique des engins) pour les matériels dérivés ou analogues qui équipèrent les différents engins de la force de frappe.

LES PROGRAMMES AIR-AIR DANS LES ANNEES 1960

C'est dans ce contexte que le STTA tenta également de lancer les premiers développements (on ne parle pas encore, selon la terminologie en vigueur ultérieurement, de « développements exploratoires ») en matière de défense aérienne contre les raids à basse altitude.

Au début des années 1960, l'industrie française n'avait pratiquement aucune expérience des techniques à mettre en œuvre : les techniques doppler.

D'une part, CSF nous avait proposé d'expérimenter un dispositif EEF (élimination d'échos fixes) qui n'était rien d'autre qu'un AMTI (*Airborne Moving Target Indicator*), transposition aux radars aéroportés des MTI (*Moving Target Indicator*) de radars sol. Quelques essais furent d'ailleurs réalisés avec le prototype de Cyrano installé sur SO-30P n°16, qui servait par ailleurs de banc d'essais au suivi de terrain.

D'autre part, EMD nous avait proposé une maquette de télémètre radar doppler auto-cohérent, en vue de doter le radar de suivi de terrain Antilope de fonctions air-air qui eussent permis à l'avion de pénétration de se défendre si d'aventure il avait été attaqué par la chasse ennemie. Les principes utilisés

étaient la transposition en aéroporté de ceux mis en œuvre par cet industriel dans la réalisation des petits radars de détection des personnels et des véhicules terrestres, qu'il avait développés avec succès pour la SEFT. Ce contrat fut toutefois résilié avant terme, l'armée de l'Air ayant abandonné le principe de doter ses avions de pénétration de capacité d'autodéfense.

Parallèlement, dans le cadre des contrats MWDDEA avec les services officiels américains, nous avons pu obtenir quelques éléments disparates¹⁰ sur l'évolution des programmes air-air américains. C'est ainsi que nous avons appris qu'ils ne croyaient pas à la validité de solutions de type AMTI pour l'air-air, et qu'ils préconisaient l'emploi d'émetteurs cohérents à fréquence de répétition élevée (*High PRF*) ou, mieux, à fréquence de répétition moyenne (*Medium PRF*). Par rapport aux générations de radars du moment, ces solutions étaient révolutionnaires et remettaient en cause toute l'architecture des matériels, notamment au niveau de l'émission (chaînes pilotées, pureté spectrale de l'émission...), du traitement du signal et du traitement de l'information (extraction de l'information distance en particulier).

En 1963, au cours d'une mission effectuée aux États-Unis, nos interlocuteurs avaient daigné lever le voile sur un projet particulièrement ambitieux, et semblait-il mis en veilleuse : l'AWG-10 de Hughes, radar pulse doppler multicibles d'une portée supérieure à 100 milles marins, couplé à un missile d'une portée analogue et équipé d'un autodirecteur pulse doppler actif. Ce projet vit finalement le jour dans les années 1970, sur l'avion F 14 de l'*US Navy*.

Hughes nous parla également d'un projet de rénovation du Phantom F 4, pour lequel il proposait un radar à deux émetteurs : un émetteur cohérent à TPO pour l'air-air et un émetteur à magnétron pour l'air-sol. Ce programme fut gagné par Westinghouse, et le radar correspondant fut mis en service à la fin de la décennie. À ma connaissance, une escadre britannique de F 4 fut d'ailleurs équipée de ce matériel au début des années 1970.

En revanche, chez Westinghouse, l'autre champion américain du pulse doppler, nous n'obtinmes aucun élément, mises à part quelques bribes sur l'autodirecteur du BOMARC. À ce moment, Westinghouse avait dans ses cartons le projet de rétrofit du F 4 et développait le radar de l'AWACS. De même, nous ne fûmes pas autorisés à visiter General Electric, qui réalisait le radar AEW du *Hawkeye*.

Nous étions aussi en relation avec les Britanniques du ministère de la Défense et du *Royal Radar Establishment* de Malvern pour deux tentatives de coopération : un AEW embarqué pour la *Royal Navy* et la Marine nationale, et l'avion de combat à géométrie variable franco-britannique AFVG. Pour ces deux projets, les Britanniques préconisaient l'emploi d'une solution pulse doppler à haute fréquence de répétition, qu'ils avaient baptisée FMICW (*Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave*), sur laquelle ils travaillaient depuis quelque temps et qui était supportée par ELLIOT.

¹⁰ À ce moment, les relations diplomatiques entre la France et les États-Unis n'étaient pas au beau fixe, ce qui conduisit nos interlocuteurs à une certaine réserve. Par la suite, quand la France quitta l'organisation militaire de l'OTAN, cette source d'informations se tarit complètement.

Pour l'AEW, ils avaient dans leurs cartons un projet d'avion à silhouette particulière, équipé de deux antennes d'environ deux mètres de diamètre implantées, l'une à l'avant, l'autre à l'arrière du fuselage. Cette tentative de coopération fit rapidement long feu, à la suite de l'abandon par les Britanniques de leur flotte de porte-avions et du peu d'enthousiasme manifesté par la Marine nationale. Il faut néanmoins reconnaître à nos amis britanniques de la suite dans les idées, puisque c'est ce projet, pratiquement inchangé, qu'il développèrent sur un plan national avec le peu de succès que l'on sait (NIMROD AEW).

La coopération sur l'AFVG échoua également, pour des raisons qui ne tenaient pas à l'industrie électronique, mais les Britanniques réalisèrent ce programme en coopération avec la RFA et l'Italie, sous l'appellation de MRCA (*Multirole Combat Aircraft*, devenu par la suite Tornado). La version d'interception britannique fut d'ailleurs équipée d'un pulse doppler FMICW de GEC-Marconi, très proche de la formule proposée par les Britanniques sur l'AFVG. En revanche, pour la pénétration, les Allemands imposèrent le choix d'une solution américaine fabriquée sous licence Texas Instruments.

La mode était donc, comme on le voit, au pulse doppler HFR (haute fréquence de récurrence). Le STTA décida donc de lancer la réalisation d'une maquette de radar pulse doppler HFR en bande X.

On notifia, aux deux industriels crédibles de l'époque réunis pour l'occasion, un contrat conjoint et solidaire. Le STTA n'avait pas voulu procéder à un choix *a priori* après consultation papier car, compte tenu de l'enjeu, cela eût probablement conduit à l'élimination définitive du domaine de l'industriel non retenu.

Mais les ressources budgétaires étaient limitées, et l'on ne put que s'offrir une maquette au rabais (récupération de sous-ensembles d'autres prototypes, banc de filtres doppler restreint au quart du spectre utile...). Cette maquette fut expérimentée à la fin de la décennie sur Mystère 20 ; on la dota quelques années plus tard d'une capacité MFR (moyenne fréquence de répétition). Parallèlement, le STTA chercha à développer des solutions nationales en matière de composants vitaux, par exemple, pour les tubes d'émission, nous lançâmes des études de tubes faible bruit : klystron chez Thomson-Variation, TPO chez CSF.

L'objectif visé était d'explorer les techniques doppler en vue d'applications aux radars d'interception et aux radars AEW. Dans ce dernier domaine, l'industrie était très circonspecte quant à l'emploi possible de la technique HFR. C'était en particulier le cas de CSF, qui marquait une préférence pour la technique BFR (basse fréquence de répétition)¹¹, laquelle autorisait un traitement d'informations moins complexe. C'est la raison pour laquelle le STTA notifia en 1968 aux mêmes industriels la réalisation d'une maquette de pulse doppler BFR en bande S (émetteur à TPO, banc de filtres doppler actifs). Cette maquette, baptisée Madrague, fut expérimentée sur P2V7 Neptune au début des années 1970. Remarquons qu'à cette période, on commence à voir paraître dans la littérature américaine les premiers articles sur l'AWACS ainsi que les transformées de Fourier rapides.

¹¹ Préférence qui se retrouva quelques années plus tard dans les choix techniques de cet industriel pour la réalisation du RDM, financé sur fonds propres.

CONCLUSION

Dans le courant des années soixante, les programmes ambitieux d'avions de pénétration à basse altitude ou d'intercepteur basse altitude n'avaient pu aboutir, faute de financement. Dans ce contexte, l'industrie avait lancé sur fonds propres, ou à l'aide d'avances remboursables du ministère des Finances (« article 5 », puis « article 90 ») des projets, certes moins ambitieux, mais qui étaient censés lui permettre de conforter la place enviable qu'elle avait acquise à l'exportation avec le Mirage III.

C'est ainsi qu'AMD avait lancé successivement un dérivé simplifié du Mirage III (le Mirage V¹²), puis le Mirage F1, que CSF avait entamé le développement du Cyrano 32 (radar classique, interchangeable avec le Cyrano II, ayant les mêmes fonctions et l'EEF ; hormis quelques composants de l'émetteur, ce radar était entièrement transistorisé) pour les versions export du Mirage III ; EMD, de son côté, avait développé un successeur transistorisé à son télémètre Aïda, Aïda-II, qu'il proposait à l'exportation sur Mirage V. Pour ces matériels, le STTA gérait techniquement et administrativement les conventions d'avances remboursables du ministère des Finances.

À la fin de la décennie, l'armée de l'Air arrêta finalement sa politique en matière d'avions de combat futurs. Les projets ambitieux envisagés depuis près de dix ans furent remis à plus tard, les missions air-sol étant assurées par le couple Jaguar et Mirage III E. Pour les missions air-air, l'armée de l'Air décida de retenir le Mirage F1, dont le prototype volait déjà, et de l'équiper du Cyrano IV (Cyrano 32, remis en forme pour l'intégrer dans le F1 et privé des fonctions air-sol et de l'EEF).

Il fallut donc attendre la mise en service du Mirage 2000, dans les années 1980, pour voir finalement déboucher les projets répondant aux besoins opérationnels formulés en 1960. Par rapport au programme européen Tornado, la mise en service de moyens comparables fut concomitante. En revanche, par rapport aux programmes américains (pulse doppler sur F 4, suivi de terrain sur F 111), elle eut lieu avec un retard compris entre dix et quinze ans, ce qui correspond à peu de choses près au décalage du démarrage des études préliminaires.

¹² Mirage cinq, à ne pas confondre avec le Mirage III V (trois vé), à décollage vertical.

ANNEXE : LES METHODES DE TRAVAIL

Au départ de toute action d'étude et de développement, il y a bien entendu l'expression, formelle ou non, par l'état-major d'un besoin opérationnel plus ou moins précis. Dans le cas où ce besoin est flou, ou si les solutions techniques à mettre en œuvre pour y répondre ne semblent pas évidentes *a priori*, il arrivait couramment que le bureau fit appel à des sociétés de service indépendantes de l'industrie, telles qu'AERO ou SESA, pour préciser ce besoin en tenant compte des contraintes techniques actuelles ou futures.

Lorsque ce besoin était à peu près décanté, le STTA consultait l'industrie pour la réalisation d'études préliminaires ou de maquettes susceptibles de préfigurer les solutions qui seraient mises en œuvre dans un prototype ultérieur. Les critères de choix comprenaient bien entendu le prix, mais surtout les aspects techniques, qu'il s'agisse de l'innovation ou de la faisabilité. Il est certain que l'industriel qui avait remporté cette première phase préliminaire disposait d'un avantage important sur ses concurrents lors de la consultation suivante sur les prototypes. Dans le domaine des radars aéroportés, comme nous l'avons vu, il n'était plus possible au milieu des années 1960, compte tenu des limitations budgétaires, de la complexité et du coût croissants des matériels, de maintenir deux bureaux d'études concurrents : ils furent invités à s'associer pour les développements à venir.

Lorsque le choix de l'industriel était arrêté, la tâche de l'ingénieur chargé d'affaire consistait à rédiger les clauses techniques du contrat avec toutes les parties concernées (radariste, avionneur, STAé...), puis les clauses administratives, avec l'industriel retenu, ainsi que le rapport de présentation du contrat auprès de la Commission des marchés publics.

L'ingénieur d'études devait également se préoccuper des composants stratégiques et les faire développer par l'industrie nationale, afin d'éviter, autant que possible, une dépendance trop marquée par rapport à l'industrie américaine. Ce fut le cas systématiquement pour les tubes d'émission, les commutateurs émission/réception, les tubes de visualisation...

Par la suite, il lui fallait rechercher, avec le CEV, un avion de servitude sur lequel seraient effectués les essais en vol. Il s'agissait bien souvent d'avions arrivant en fin de vie et retirés du service par les états-majors (B-26, Vautour, Neptune, Meteor, Camberra) et plus rarement d'avions spécifiquement dédiés à cette tâche (Mystère 20). Cette situation se traduisait généralement par une mauvaise disponibilité des moyens d'essais, source de retards fâcheux.

Une fois l'avion de servitude retenu, il fallait rechercher l'industriel susceptible d'effectuer le chantier d'installation (dans notre cas, ce fut souvent AMD, UTA, puis l'AIA de Clermont-Ferrand), négocier avec lui les clauses techniques et administratives du contrat, commander par ailleurs les matériels d'essais ou de mesures spécifiques.

Pendant l'exécution du contrat, le travail de l'ingénieur consistait à suivre son avancement par des réunions régulières chez le titulaire et à débloquer à celui-ci les acomptes financiers correspondants.

Lorsque le matériel était prêt, le service de recette (M. Raison) était mis à contribution pour vérifier en usine la tenue des clauses techniques ; pour les prototypes, une campagne d'essais climatiques était généralement effectuée dans les laboratoires d'essais de Palaiseau.

Commençait alors la période des essais en vol, ponctuée par les réunions d'avancement régulières au CEV et les tâches administratives associées (menus contrats de fournitures, frais de détachement de spécialistes, etc.).

Après la passation des contrats de série par la section production, le bureau était mis à contribution pour le volet technique des modifications, au sein de la CLM (Commission locale de modification).

ADDENDUM SUR LES RADARS AEROPORTES par Jacques Bousquet

Il se trouve que les hasards de ma carrière, après m'avoir fait quitter le domaine de l'électronique aéroportée pendant presque dix ans, me firent retrouver celle-ci, de façon un peu indirecte et globale d'abord, pendant la période de 1976 à 1979, où j'occupais les fonctions d'adjoint opérations du directeur technique des constructions aéronautiques (mon homonyme, l'IGA Georges Bousquet). Puis, au STTE nouvellement créé, je fus directeur adjoint jusqu'à la fin de 1983. Je suis donc en mesure d'apporter quelques compléments à la note de Pierre Barré. Ils concernent principalement les conditions dans lesquelles se déroula la mise au point du radar RDI (radar doppler à impulsions) du Mirage 2000, et dans lesquelles furent lancées les études préparatoires de la génération future de radar (celle qui devait finalement équiper le Rafale). Il s'agissait d'éviter au maximum les difficultés rencontrées avec la première génération de radars pulse doppler.

Le déroulement du programme du radar RDI destiné au Mirage 2000

Lors du lancement du programme Mirage 2000, aux environs de l'année 1975, le planning général du programme avion montrait que l'on pouvait viser un premier avion de série sept ans après le lancement du développement, mais à un problème majeur près : celui du radar d'interception de pointe avant, dont les premières estimations établies par Thomson-CSF, industriel chargé de sa réalisation, et par le STTA situaient l'arrivée deux ans plus tard seulement.

Les origines de cette situation étaient les suivantes. L'armée de l'Air souhaitait, à juste titre, s'agissant d'un avion de défense aérienne, que ce radar utilisât la technique la plus moderne de filtrage des signaux, à base d'une émission cohérente à haute fréquence de récurrence, dite radar doppler à impulsions, seule capable d'assurer une bonne discrimination contre des cibles à vitesse radiale élevée, même en présence d'échos de sol, donc à basse altitude. Mais les études préparatoires lancées par le STTA dès le milieu des années 1960, et notamment la maquette de radar aéroporté HFR (haute fréquence de récurrence, qui avait donné tous les résultats escomptés, mais qui était loin d'autoriser d'emblée le lancement d'un matériel opérationnel), n'avaient pas été suivies, dans la première moitié des années 1970, des travaux complémentaires qui auraient été nécessaires pour progresser suffisamment.

La responsabilité de cette situation peut être partagée entre l'armée de l'Air, qui n'a pas voulu consacrer à cette technique radar prometteuse, mais difficile à maîtriser, les crédits suffisants, et la DTCA, qui n'a pas suffisamment attiré l'attention de l'armée de l'Air sur les inconvénients potentiels de cette situation. Quoi qu'il en soit, l'alternative était simple : soit décaler tout le programme de deux ans, soit faire accepter à Thomson-CSF un planning raccourci de deux ans. Pour toutes sortes de raisons (impatience de l'armée de l'Air de disposer d'un intercepteur plus moderne que le Mirage F1, souci de Dassault Aviation de se placer le plus tôt possible à l'exportation), on choisit la deuxième solution. Le planning de développement du radar RDI fut établi en conséquence, et le programme fut lancé.

Dès 1980, il apparut que ce planning était bien trop optimiste, et n'avait aucune chance d'être tenu. En particulier, les délais nécessaires pour les essais en vol supposaient une cadence de vol et une rapidité de dépouillement des essais jamais réalisées en pratique. Le STTA, d'ailleurs devenu STTE entre temps, se résolut à l'opération vérité, en bâtissant, en concertation avec Thomson-CSF, un planning dit « réaliste au plus court », partant de l'hypothèse qu'aucun aléa majeur susceptible à lui seul de bouleverser toute l'économie du programme ne surviendrait, mais prenant en compte des délais réalistes de réalisation des diverses opérations élémentaires qui composaient le programme, et des aléas dits « normaux ». Le résultat ne se fit pas attendre : les deux ans arbitrairement enlevés réapparurent aussitôt. Il ne restait plus qu'à officialiser le résultat, ce qui fut facile envers la DTCA, moins aisé du côté de l'EMAA. Mais cette fois, on ne céda pas, et le retard qu'aurait le RDI fut finalement accepté.

Il restait à voir quelles conséquences cette situation nouvelle aurait sur le programme Mirage 2000, sachant qu'avant l'arrivée à la date maintenant prévue du RDI, 40 avions de série devaient déjà avoir été livrés. Une nouvelle fois, la solution consistant à décaler de deux ans la série des avions fut rejetée. La voie fondée sur l'équipement des avions avec des « pointes en bois » tant que le radar ne serait pas disponible faisait un peu désordre pour le bijou de la technologie française que constituait le Mirage 2000.

Finalement, la solution vint... de Thomson-CSF, qui, pour les besoins de l'exportation, avait développé sur fonds propres un radar du nom de RDM (radar doppler multifonctions), et qui le proposa bien vite pour équiper les 40 premiers appareils de l'armée de l'Air. L'acceptation de cette offre permit à l'armée d'échapper au dilemme décrit ci-dessus, et à Thomson-CSF de trouver, en même temps qu'un premier client, une référence (« matériel choisi par l'armée de l'Air ») précieuse pour asseoir la crédibilité de son offre vis-à-vis de ses autres clients potentiels. Le RDM n'était d'ailleurs pas un mauvais matériel ; en particulier, sa fiabilité était sans commune mesure avec celle des autres radars de la même famille qui l'avaient précédé ; mais ses performances à basse altitude étaient, comme on avait pu le craindre, relativement limitées (d'où les déboires enregistrés notamment avec l'armée de l'Air grecque).

Dans cette affaire, l'armée de l'Air sauva la face, mais au prix d'une double famille de radars à maintenir, dont les premiers dotés de performances inférieures à ses espoirs, et ce pour un bilan financier qui reste à établir... Les RDI de série, quant à eux, finirent par arriver, avec un an de retard sur le planning redéfini, donc dix ans après le lancement du développement, et avec un an de retard sur le planning initialement annoncé par Thomson-CSF. Cette affaire est une belle démonstration de la nécessité de conduire avec suffisamment d'anticipation les études préparatoires au lancement d'un programme technologiquement nouveau.

Les études préparatoires à la génération suivante

Les événements ci-dessus convinquirent le STTE d'essayer de faire mieux la prochaine fois, c'est-à-dire pour la génération suivante de radars, dont on commençait à parler pour l'équipement des dernières versions du Mirage 2000, ou même de son successeur le Rafale, dont le prototype de démonstration était déjà en construction dans les usines de Dassault Aviation à Saint-Cloud. Le champ de travail était immense, car, bien sûr, pendant qu'on mettait le RDI au point, le progrès ne s'était pas arrêté. Il se manifestait aussi bien au niveau des technologies de base (miniaturisation et performances des composants, nouveaux types d'antennes, puissance de calcul disponible) que de l'architecture d'ensemble possible pour les futurs matériels. On pouvait maintenant envisager des radars vraiment polyvalents susceptibles, grâce notamment à des formes d'émission variées, de remplir à la fois des missions air-air (avec prise en compte de plusieurs cibles simultanément) et air-sol (visualisation, et même cartographie, recalage de navigation, etc.).

Le service établit une liste, qu'il essaya de rendre la plus exhaustive possible, des travaux nécessaires, et les coucha, par familles et par ordre chronologique, sur une grande feuille blanche (qui prit vite le nom familier de « drap de lit »). Partant de la gauche, où se trouvaient récapitulés les travaux de base, on arrivait sur la droite au radar de nouvelle génération susceptible d'équiper le futur Rafale, en passant par une étape intermédiaire importante, celle du RACAAS (radar aéroporté de combat aérien et appui sol), une maquette aéroportée destinée à dégrossir l'ensemble des problèmes susceptibles de se présenter lors du développement du matériel définitif.

Une fois l'aspect technique du problème ainsi clarifié, se posa le problème du financement de l'opération et du choix du (ou des) titulaire(s) industriel(s) des contrats correspondants. Pour le financement, il apparut bien vite que l'armée de l'Air, certes consciente de la nécessité de ne pas renouveler les erreurs passées en négligeant trop les études amont, était prête à un effort important, mais qui risquait tout de même d'être insuffisant, vu l'ampleur des travaux à effectuer. Il serait donc nécessaire de demander une participation financière à l'industriel qui serait finalement retenu pour être le partenaire principal dans cette opération. Cette façon de procéder, habituelle à l'époque, s'appuyait sur la constatation que les études amont ainsi conduites profiteraient certes à l'État pour ses programmes propres, mais également à l'industrie dans ses actions à l'exportation.

Quant aux problèmes que pouvaient soulever les choix des industriels, ils furent résolus de diverses façons.

Dans certains cas, le titulaire d'une étude donnée était en quelque sorte prédéterminé par une compétence qu'il était seul à posséder. Ainsi, pour les tubes hyperfréquences de tous types, Thomson-CSF (division Tubes électroniques) s'imposait-elle.

Dans d'autres cas, il fallut aller jusqu'à l'approche structurelle au niveau de la société elle-même. Le cas de la société Radant fut, à cet égard, exemplaire. Le procédé Radant avait été breveté par la société éponyme, qui dépendait elle-même de la PME AMP (Antennes moulées plastiques), spécialisée notamment

dans les radômes de grandes dimensions. Ce procédé utilisait des diodes que l'on pilotait en ouverture-fermeture pour former un faisceau à l'émission ou à la réception. Des études théoriques et sur maquette conduites depuis longtemps par le STTA avaient montré la validité du principe, et on en était arrivé au stade de devoir lancer une maquette d'antenne de radar aéroporté, justement prévue dans le « drap de lit ». Mais la société Radant n'avait jamais travaillé sur des matériels ayant à satisfaire aux contraintes correspondantes. Un rapprochement avec Thomson-CSF, qui reconnaissait tout l'intérêt de principe de la formule, fut alors proposé. Les dirigeants de Radant, conscients eux-mêmes qu'ils étaient en train d'arriver au bout de leurs capacités, acceptèrent cette idée, qui permettait la continuation de l'exploitation de leur découverte. Radant devint ainsi une filiale de Thomson-CSF... et les radars de la génération suivante utilisèrent en effet des antennes à balayage électronique exploitant cette formule.

Restait enfin le choix de l'industriel coordonnateur de l'ensemble, auquel serait confié l'essentiel des travaux. La concurrence très vive qui régnait à l'époque entre les deux seules sociétés capables de postuler, à savoir Thomson-CSF et Électronique Marcel Dassault, conduisit à les consulter l'une et l'autre, à la fois sur les aspects techniques et sur la participation financière qu'elles étaient disposées à consentir. Les réponses techniques furent de bon niveau l'une et l'autre. Pour ce qui est de la participation financière, Thomson-CSF s'engageait sur un apport global de 500 millions de francs ; Électronique Marcel Dassault indiquait qu'à son grand regret, sa situation financière actuelle¹³ lui interdisait toute contribution.

L'arbitrage final fut rendu par le délégué général pour l'armement, Henri Martre. Les difficultés sur le RDI, aussi bien qu'un récent voyage aux États-Unis, pendant lequel ses hôtes n'avaient pas manqué de souligner à son intention combien les systèmes d'armes multicibles auraient d'importance dans l'avenir, l'avaient convaincu de l'intérêt de ce programme d'études radar à long terme, et il trancha en faveur de Thomson-CSF.

La fin de l'histoire est digne de l'antique. Les diverses actions prévues s'exécutèrent point par point. La maquette RACAAS arriva à l'heure, fut essayée en vol, et donna les résultats escomptés. Thomson-CSF lança ensuite, sur fonds propres, le RDY destiné au Mirage 2000-5 pour l'exportation, mais qui fut également acquis ensuite par l'armée de l'Air française. Puis vint le radar RBE 2 (radar à balayage électronique deux plans) destiné au Rafale. Aucun de ces matériels ne donna lieu à des difficultés analogues à celles rencontrées sur le RDI. Une fois de plus s'est trouvée vérifiée la nécessité d'un volume suffisant d'études amont effectuées en temps utile avant le lancement proprement dit des programmes, si l'on veut s'éviter de gros déboires.

¹³ Il est vrai que la société, habituellement florissante, avait récemment fait quelques mauvaises affaires, qui lui avaient valu l'ire du père fondateur. C'est à la suite de ce mauvais passage qu'EMD devint ESD.

CHAPITRE 6

RADIOCOMMUNICATIONS ET RADIONAVIGATION AU STTA DE 1950 A 1980

par Robert Carlier¹

Gammes de fréquences utilisées dans les radiocommunications air :

- 2 à 30 MHz (gamme HF) ;
- 100 à 156 MHz (gamme VHF, allouée à l'origine) ;
- 225 à 400 MHz (gamme UHF).

Types de modulation :

- modulation d'amplitude A1 : le signal haute fréquence est découpé (présence ou absence) au rythme de la manipulation en morse ;
- modulation d'amplitude A3 : le signal basse fréquence intervient sur le niveau du signal haute fréquence (l'enveloppe du signal haute fréquence reproduit le signal basse fréquence) ;
- modulation de fréquence F1, ou *shift* : le signal haute fréquence est transmis en permanence sur l'une des deux fréquences voisines F ou F + 400Hz. Ainsi, par exemple, F correspond à la présence du signal et F + 400Hz correspond à l'absence de signal de la modulation d'amplitude A1.

Les modulations A1 et F1 sont utilisés en radiotélégraphie, la modulation A3 est utilisée en radiotéléphonie.

APRES LA SECONDE GUERRE MONDIALE

À la fin des années 1940, les unités aériennes françaises sont dotées d'avions divers :

- les unités formées en Angleterre ont conservé leurs avions *Spitfire*, *Wellington*, *Halifax*... ;
- les unités formées en Afrique du Nord ont été équipées avec du matériel de l'*US Air Force* et volent sur P 47 (*Thunderbolt*), P 38, B 26 (*Marauder*), DC 3 (*Dakota*)...
- l'escadrille Normandie-Niemen est rentrée de Russie avec ses avions de chasse *Yak* ;
- des avions allemands fabriqués en Allemagne ou en France pendant l'occupation ont été récupérés : *Focke Wulf*, Ju 52, Ju 88, *Arado*, *Siebel* (Martinet), *Fieseler*... ;
- des avions de conception allemande ont été rapidement « francisés », comme le Nord 1000.

¹ Robert Carlier a été ingénieur, puis chef de section au STTA de 1950 à 1959 et de 1963 à 1976.

Les unités sont implantées en France, en Allemagne et outre-mer sur des aérodromes à l'infrastructure sommaire ; les moyens radioélectriques mobiles des unités de combat ont généralement fait mouvement avec les avions et constituent, pour l'essentiel, l'équipement radioélectrique du terrain de stationnement. De même, les liaisons entre le commandement et les unités sont assurées avec du matériel disparate, voire récupéré au moment de la libération du territoire national.

À l'état-major de l'armée de l'Air (EMAA), le Bureau transmissions (EMAA/Trans), sous le commandement du colonel Loizillon, a pour tâche de remettre en état le réseau de communications entre l'EMAA et les commandements, d'équiper les avions en service et d'assurer une infrastructure radioélectrique sur les aérodromes. Pour les responsables de ces diverses tâches à l'EMAA/Trans, il existe deux interlocuteurs : le Service technique des télécommunications de l'Air (STTA), en charge de la conception, de la réalisation des matériels ainsi que de leur installation, et la Direction de l'infrastructure de l'armée de l'Air (DIA), qui fait réaliser les travaux de génie civil par les services locaux constructeurs.

LIAISONS DE COMMANDEMENT

Ces liaisons sont assurées, en France, sur le réseau PTT pour les liaisons par téléphone et télétype. Pour les liaisons avec les unités d'outre-mer, la seule possibilité de communication est l'utilisation de messages radio HF, transmis et reçus en A1 par des opérateurs spécialisés, dans la bande de 2 à 30 MHz.

Liaisons HF avec l'outre-mer

L'EMAA dispose du Centre de transmissions, installé au dernier étage du 26, boulevard Victor (Cité de l'Air, XV^e arrondissement), à la fois centre de réception HF et centre de transit pour les différents messages reçus par radio et par télétype. Sur la base aérienne d'Étampes sont installés provisoirement des émetteurs HF manipulés à distance par les opérateurs du Centre de transmissions.

L'armée de l'Air a décidé de se doter d'un réseau HF avec ses grands commandements implantés notamment à Saïgon, Tananarive, Djibouti, Tunis, Alger, Brazzaville, Dakar et Rabat. Au cours des années 1950, le STTA est chargé de la réalisation des centres d'émission HF (et aussi de certains centres de réception associés) de Paris, Alger (à Blida), Djibouti, Brazzaville, Tananarive...

Les émetteurs sont implantés à Étampes Villesauvage, sur un ancien aérodrome militaire désaffecté, près de la base d'Étampes. Il n'y a ni bâtiment ni énergie électrique, mais le terrain disponible permet une bonne disposition des antennes en losange (10 au total).

Les émetteurs ont été conçus et fabriqués par les Laboratoires radioélectriques (LR), société installée rue Mario-Nikis, à Paris, dans le XV^e. Au cours de l'été 1949, au moment où le sous-lieutenant Carlier y effectue son stage de Sup'élec, la société traverse une période difficile ; MM. Fyssen et Kniazeff viennent de la quitter pour créer une nouvelle société (SINTRA). Les émetteurs, pilotés par quartz, ne fonctionnent qu'en A1 (ultérieurement, après une légère

modification du pilote, ils fonctionnèrent en F1) ; leur puissance d'émission est de 10 kilowatts.

La principale difficulté à résoudre pour les centres d'émission est la commutation d'antennes. À Étampes, par exemple, il y a 5 émetteurs avec chacun 4 baies HF, et donc 5 émissions simultanées possibles à partir de 20 baies d'émission. Ces 5 émissions sont à répartir sur les 10 antennes. Après examen des solutions techniques disponibles chez les constructeurs français, la commutation en 600 ohms est réalisée, avec commande à partir d'un pupitre central lors de l'installation des matériels. Pour Djibouti, où le centre d'émission est enterré, on a recours à des commutateurs coaxiaux manuels et on utilise les brevets de Delapalme² pour passer de basse impédance (dans la partie enterrée) à 600 ohms (à l'extérieur du bâtiment).

Après consultation de LMT et SFR, seules sociétés capables de proposer une solution pour la commutation émetteurs/antennes, la réalisation du Centre d'Étampes (installation des émetteurs, construction des antennes en losange, du système de commutation, réglage des matériels) est confiée à SFR, en vue de remettre des installations en état de marche à l'armée de l'Air. C'est la première fois que la SIT (Section des installations à terre du STTA) fait appel à un installateur unique sans procéder à des découpages de tâches. Cette démarche fut notamment reprise pour les centres d'émission de Djibouti, de Brazzaville et de Tananarive.

Liaisons HF en métropole

Ce sont principalement des liaisons de secours. Progressivement, les matériels anciens d'origine allemande ou américaine sont remplacés tant par des émetteurs 1 kW HF Sadir-Carpentier, construits également pour l'aviation civile, que par des émetteurs 400 W TRT installés soit à poste fixe, soit en *shelter*³.

Après la commande, dans l'immédiat après-guerre, de matériels LR, l'armée de l'Air acquiert chez SFR des émetteurs HF 10 kW fabriqués pour des clients divers : ces matériels furent installés à Djibouti et à Brazzaville.

Enfin, l'Atelier de Montage Electrique (AME) assure après 1955 un rééquipement assez important de l'armée de l'Air en émetteurs HF 5 kW, faciles à régler en utilisation courante, ainsi qu'en récepteurs ; ces matériels fonctionnent en A1, mais aussi en F1, pour assurer les liaisons par radiotélétypes.

À la fin des années cinquante, des émetteurs et récepteurs HF à bande latérale unique (BLU) sont achetés chez Thomson pour l'armée de l'Air. Ils permettent notamment de réaliser un système rustique de transmissions avec les avions Mirage IV lors de leur mise en service opérationnelle, le 1^{er} octobre 1964 (centre d'émission à Étampes, centre de réception à Chartres et centre d'exploitation à Taverny), en attendant la fourniture et la mise en service par Collins, en 1965-1967, des deux systèmes de transmission BLU analogues à ceux réalisés pour l'*US Air Force*.

² cf. Bertrand DELAPALME, « Les antennes Caroline et les détecteurs de radars BD1/ARBR/ARAR/ARUR », in Comité pour l'histoire de l'armement, *La guerre électronique en France au XX^e siècle*, 2003.

³ Sorte de conteneur protégeant des matériels électroniques.

MATERIELS HF DE BORD

Il n'y a pas de besoin immédiat à satisfaire dans ce domaine, parce que les avions en service sont équipés. Le premier besoin correspond à la sortie des avions de transport Nord 2501. Comme il n'existe pas encore de fabrication française, les premiers avions de série sont équipés avec des postes HF ART 13 rachetés aux surplus américains et rénovés en France par de petites sociétés. Ensuite, c'est le matériel EB3BA, développé et produit par Radio Air, qui est monté sur les Nord 2501.

Pour l'équipement des avions ravitailleurs et des patrouilleurs Atlantic, sont commandés des postes HF BLU Collins à synthétiseur de fréquences au pas de 10 kHz. Au moment des premières réunions de définition de l'avion de transport Transall, dans le cadre d'une coopération franco-allemande, Radio Air présente un équipement de performances analogues à celles du matériel Collins. Il est décidé de le retenir pour l'équipement de série de l'avion. Fabriqué en série par CIT, cet équipement est connu sous l'appellation TRAP 33. Il a été installé sur le Mirage IV.

En 1975, une étude d'un équipement BLU à l'état solide est lancée par le STTA. Elle est confiée à LMT et scindée en deux parties : l'amplificateur HF large bande et les circuits bas niveau. L'étude de la première partie se déroule de manière satisfaisante, mais l'EMAA ne donne pas son accord pour le lancement de la seconde partie.

RADIOCOMMUNICATIONS SOL-AIR

Le développement de l'aéronautique, dans ses applications tant militaires que civiles, s'est très vite heurté à la saturation du spectre électromagnétique créée par le nombre croissant de fréquences nécessaires pour couvrir les besoins des liaisons entre le sol et les aéronefs.

Après la guerre, la gamme VHF (*Very High Frequencies*) allouée aux radiocommunications sol-air et air-sol va de 100 à 156 MHz, avec des canaux espacés à l'origine de 180 kHz. Cette gamme se réduit progressivement pour faire place aux systèmes de radionavigation autour de 110 MHz (VOR et ILS), puis, dans le haut de la gamme, à d'autres utilisateurs. Cette réduction est compensée par le resserrement des canaux, espacés de 100 kHz, puis de 50 kHz, mais l'augmentation corrélative du nombre de canaux utilisables est insuffisante pour satisfaire les besoins. Les militaires doivent abandonner la VHF à l'aviation civile, après que leur a été attribué l'usage de la gamme 225-400 MHz en UHF (*Ultra High Frequencies*).

Les premiers matériels UHF réalisés pouvaient fournir 1 750 canaux espacés de 100 kHz, ce qui était encore insuffisant ; très vite, ils furent modifiés pour fournir 3 500 canaux à l'espacement de 50 kHz.

MATERIELS SOL VHF

L'EMAA/Trans fait commander en 1947 des émetteurs A3 de puissance 15 watts, pilotés par quartz dans la gamme 100-156 MHz. C'est Radio-Industrie qui fabrique cet émetteur, appelé RI 1547. En même temps, l'EMAA/Trans fait commander chez Sadir-Carpentier des récepteurs R 297, puis R 298, qui, avec les émetteurs RI 1547, sont les matériels d'infrastructure en place pendant plus de 20 ans dans les aérodromes et les centres de défense aérienne.

Les émetteurs et les récepteurs ont été commandés avec des antennes dipôles accordables, mais sans moyen d'exploitation. Il appartient à la SIT de trouver de petites sociétés connaissant le domaine de la basse fréquence, comme SAF, qui réalisait des studios de radiodiffusion, puis STERA pour les bases de l'aéronautique navale, Radio Laboratoire Jaubert, implanté à Nice, devenu Rally puis SAFARE (Société anonyme de fabrication et d'applications pour la radio et l'électronique).

Les matériels à tubes, RI 1547 et R 298, ne sont remplacés que dans les années 1970, par des matériels à transistors étudiés sur fonds propres et fabriqués par la société Télérad, implantée à Anglet, à proximité de Biarritz. Cette société avait déjà fabriqué des équipements identiques pour le Service technique de la navigation aérienne (STNA), implanté à proximité du STTA et avec lequel nous entretenons les meilleures relations.

À cette même période apparaissent en série des multicoupleurs de réception, étudiés et fabriqués par ELECMA (département électronique de la SNECMA filialisé ensuite), et des multicoupleurs émission, étudiés et fabriqués par STAREC (rachetée par SFIM ultérieurement). Ces deux sociétés réalisèrent également des multicoupleurs UHF. Enfin, l'antenne dipôle ajustable fut remplacée par une antenne parapluie large bande, étudiée au CEV/Télec par M. Jodelet, spécialiste des antennes de radiocommunication.

MATERIELS SOL UHF

Dès 1953, la France reçoit du PAM (Pacte d'assistance militaire), c'est-à-dire des États-Unis, des matériels UHF pour équiper les aérodromes et les centres de contrôle aérien, afin de faciliter le transit, dans l'espace aérien supérieur français, des avions de l'OTAN équipés en UHF. Les matériels reçus comprennent des postes de bord E/R (émetteur-récepteur) AN/GRC 32 pour utilisation en secours au sol, en particulier dans les tours de contrôle, des postes au sol GRC 27 avec émetteurs et récepteurs séparés et des antennes.

Pendant que la SIT fait installer ces matériels UHF, avec l'assistance éventuelle d'un technicien américain du PAM, la SEP (Section des études et prototypes) fait étudier des matériels sol par Thomson. Cette société fournit non seulement des matériels à l'armée de l'Air française, mais aussi à l'armée de l'Air allemande, qui rééquipe ses bases. Les antennes sont étudiées et réalisées par STAREC, à l'exception des antennes directives en site, confiées à ELECMA. Pour télécommander les émetteurs et les récepteurs Thomson, il est fait appel à SECRE, qui fut pendant une longue période le spécialiste des télécommandes pour voies radiotéléphoniques.

MATERIELS DE BORD VHF, UHF, V/UHF

Quant aux matériels VHF, la société LR fabrique en 1949-1950 une petite série d'émetteurs-récepteurs de bord, dont la faible fiabilité a sans doute vite déçu les utilisateurs de ce premier matériel français.

Deux autres sociétés étudièrent et produisirent des émetteurs-récepteurs qui équipèrent les avions français : SARAM (Société d'applications radio pour l'aviation et la Marine) pour l'armée de l'Air et SOCRAT pour l'aéronautique navale et l'ALAT.

SOCRAT est une société implantée à Paris, dans le XIII^e arrondissement ; ses matériels, dont les performances sont en général légèrement inférieures à celles des équipements SARAM, mais moins chers, sont montés sur les avions de l'aéronautique navale et les hélicoptères de l'armée de Terre.

SARAM est implantée en banlieue parisienne, à Asnières. C'est une société qui ne réalise que des études et des prototypes sur fonds propres. Son PDG, M. Merle, est bien introduit dans le milieu aéronautique, en particulier auprès des Avions Marcel Dassault. Il se tient au courant de l'évolution des matériels étrangers – surtout américains – pour définir les spécifications techniques de matériels répondant aux besoins futurs et qu'il entreprend d'étudier.

Les prototypes sont confiés au laboratoire du STTA, au CEV et au CEAM pour essais. Les résultats sont analysés, pour définir les modifications à apporter au matériel de série quand l'EMAA aura exprimé son besoin et défini les avions à équiper. Pour la production en série, M. Merle fait appel à Bronzavia, puis, à partir de 1952, à une autre société implantée à Argenteuil, OMERA. Le prix de série de chaque équipement englobe une « redevance » que Bronzavia ou OMERA paient à SARAM, ce qui permet de financer des études ultérieures.

Les premiers E/R SARAM 5/41 sont à douze fréquences pré-réglées, mais cela s'avère insuffisant pour les avions de transport qui se déplacent à l'étranger. SARAM imagine alors un adaptateur qui permet de disposer de 36 fréquences, en fait de deux fréquences proches de part et d'autre des 12 canaux d'origine. Le problème ne fut résolu qu'avec l'arrivée de postes à standard de fréquences, dont OMERA fabriqua au total 5 500 exemplaires.

En matière d'UHF, les premiers E/R sont destinés à équiper les avions de série Mirage III. SARAM et SOCRAT présentent tous les deux des prototypes. À l'issue des essais au sol et en vol, les services officiels retiennent le matériel de SARAM.

Pour éviter l'emport de deux postes E/R, l'un en VHF, qui fonctionne dans une gamme de fréquences de plus en plus réduite mais nécessaire en circulation aérienne générale (circulation sous la responsabilité de l'aviation civile), l'autre en UHF, gamme de fréquences utilisée prioritairement dans l'armée de l'Air en circulation opérationnelle militaire (circulation sous la responsabilité de l'armée de l'Air), il est décidé en 1967 d'étudier un E/R qui couvre les deux gammes VHF et UHF.

Le programme est ambitieux : le poste à canaux espacés de 25 kHz (7 000 fréquences possibles en UHF) doit être piloté à l'aide d'un synthétiseur

de fréquences et, entièrement transistorisé, doit fournir une puissance de 5 watts dans l'encombrement particulièrement réduit de 1/4 ATR⁴.

Il donne lieu à une concurrence longue et acharnée entre TRT, nouveau venu dans le domaine des radiocommunications air-sol, et SOCRAT, concurrence qui instaure des relations particulièrement tendues entre le STTA, soucieux de faire réaliser un matériel de qualité, et l'EMAA/BPM, pressé de choisir – et entre le STTA et le SCTI, qui soutenait TRT. Finalement, le choix se porta sur le matériel TRT qui, après correction de quelques insuffisances non rédhibitoires, constitua, avec un amplificateur 25 watts, un poste UHF seul et des versions exportation, une famille de postes E/R aéroportés qui furent fabriqués à partir de 1970 à plus de 7 000 exemplaires.

SARAM réalisa plus tard quelques prototypes de poste UHF, mais ce matériel n'intéressa pas les clients potentiels. Ce fut la fin de l'activité de SARAM dans le domaine.

RADIONAVIGATION

Un système de navigation ne doit pas se limiter à un seul pays, parce que les avions ne peuvent être équipés de plusieurs types de récepteurs (un par système). Compte tenu de cette contrainte, le couple balise MF au sol / radiocompas à bord a été, aussitôt après la guerre, le seul moyen de radionavigation en usage chez les civils et les militaires. Ce système ne donne qu'une information de direction ; c'est la montre du pilote qui permet de calculer la distance parcourue.

Radiogonométrie

Si le couple balise MF-radiocompas permet de faire la navigation en route, le radiogoniomètre VHF Sadir-Carpentier équipe de nombreuses bases aériennes. Un « gonio » est installé sur le terrain et un autre est en flanquement, à 50 ou 100 km par le travers de la piste la plus utilisée par mauvais temps ; il suffit au pilote de parler avec la tour de contrôle, qui le localise par triangulation et lui donne des instructions pour se poser sur le terrain.

En 1950, M. Dubourg développe le premier radiogoniomètre automatique en VHF, matériel qui est fabriqué en série pour l'aviation civile et pour l'armée de l'Air.

En ce qui concerne l'équipement des avions, les radiocompas donnèrent lieu à des fabrications de nombreux matériels : l'ARN 6, fabriqué sous licence par Air Équipement sous l'appellation interarmées NR AN 5 ; le NR AN 8 de Bezu et le NR AG 5 de SFR qui, en 1954, furent retenus respectivement par l'armée de l'Air et par l'aéronautique navale et qui furent fabriqués au total à 3 000 exemplaires ; enfin le NR AN 11, radiocompas léger à bande réduite de CSF, qui équipa le Mirage III C, le Transall et les hélicoptères de l'aéronautique navale et de l'ALAT (Super Frelon, Alouette II et III, SA 330 Puma).

⁴ Standard américain pour les dimensions des équipements électroniques de bord.

VOR/ILS

Venant des États-Unis et normalisés par l'OACI (Organisation de l'aviation civile internationale), le VOR (*VHF Ominidirectional Range*, autour de 110 MHz), puis le DME (*Distance Measuring Equipment*, autour de 1 000 MHz) s'installent en France dans l'infrastructure de l'aviation civile. Le couple VOR-DME donne le relèvement et la distance de l'avion par rapport aux points d'implantation correspondants des balises, ce qui constitue un réel progrès par rapport au couple balise MF-radiocompas, qui ne disparaît cependant pas.

Autour du milieu des années 1950, une étude de récepteur VOR est confiée à SOCRAT en vue d'équiper quelques avions militaires. Vers 1960, CSF commence l'étude sur fonds propres de matériels VOR-DME ; il est envisagé de proposer de retenir le matériel de série pour le Transall, mais CSF abandonne assez vite le développement entrepris. Ainsi, pour le Transall développé en coopération franco-allemande, on choisit le matériel Collins, qui équipe la majeure partie des avions civils dans le monde, mais en retenant la version transistorisée.

On choisit en même temps les équipements de bord Collins pour la réception de l'ILS (*Instrument Landing System*), équipement d'aide à l'atterrissage installé alors sur de nombreux terrains civils, et quelques années plus tard sur plusieurs terrains de l'armée de l'Air⁵. L'équipement ILS sol, conçu et produit par les Américains, était un matériel à tubes. Sous l'égide du STNA, CSF en a étudié et développé une version transistorisée dans les années 1960. Au début de la production en série de cet équipement pour l'aviation civile française, il est apparu qu'il n'y avait pas d'équivalent industriel aux États-Unis, parce que la *Federal Aviation Agency* (FAA) réalisait elle-même les ILS à partir d'éléments de conception ancienne acquis chez divers constructeurs. M. Dautremont, chef du projet ILS chez CSF, sut saisir l'occasion du besoin aux États-Unis et, pour pénétrer le marché américain, céda la licence du matériel ILS de CSF à Texas Instruments, qui en devint le producteur.

TACAN (*Tactical Air Navigation*)

Aux États-Unis, ITT a étudié et développé pour l'*US Air Force* un système de radionavigation tactique (*Tactical Air Navigation*) dans la même gamme de fréquences que le DME. Ce système comprend une balise sol omnidirectionnelle et un E/R embarqué ; la balise interrogée par l'E/R fournit à l'avion porteur sa distance et son relèvement par rapport à la balise.

⁵ Les militaires avaient utilisé, pendant la guerre, et ont continué d'utiliser des matériels radar comme moyens d'aide à l'atterrissage : le recueil des avions en retour de mission et leur guidage vers la base est assuré par un radar d'aérodrome SRE (*Search Radar Equipment*), l'atterrissage s'effectuant à l'aide d'un radar de précision (*Precision Approach Radar*, PAR). Aucun matériel particulier n'est nécessaire à bord des aéronefs, qui utilisent leur liaison radio existante. À partir des années 1950, tous les terrains de l'armée de l'Air sont équipés de radar PAR Thomson en bande X et du SRE SFR en bande S.

Le TACAN est adopté par l'OTAN, et il faut équiper les bases françaises et les avions⁶. Pour l'équipement des avions, la solution de fabrication sous licence est retenue, dans le cadre d'une coopération franco-allemande entre les deux filiales d'ITT : LMT en France et SEL en Allemagne. Un groupe de travail franco-allemand (STTA-BWB) anime cette coopération, mais chaque pays commande directement les équipements à son industriel national. LMT et SEL fabriquent chacun une partie de l'AN/ARN 21, les deux industriels font l'assemblage final et les essais des matériels commandés par leurs clients respectifs. La même démarche a été adoptée pour l'AN/ARN 52.

Ultérieurement, LMT et SEL, devenus compétents dans le domaine du TACAN, purent effectuer des études financées par les services officiels, comme par exemple celles de la balise en *shelter* BALTAC, de la balise sol d'infrastructure et de la version transistorisée de l'émetteur-récepteur, appelée MITAC (micro-TACAN).

Radars de navigation doppler

L'utilisation d'un radar doppler à bord d'un aéronef permet de mesurer la vitesse sol et la dérive⁷. L'introduction du matériel doppler a été le résultat des choix des responsables des programmes avion lors de la définition du système de navigation. Malgré plusieurs tentatives, le STTA n'a jamais pu faire étudier et développer par un industriel français ce type de matériel, essentiellement pour des raisons de financement et de délais, alors que les Britanniques pouvaient proposer des matériels éprouvés de Marconi ou Decca, que CSF ou EMD étaient disposés à fabriquer sous licence.

Par exemple, pour le Mirage IV, l'avionneur, responsable des performances du système de navigation, a proposé aux services officiels un équipement disponible sur le marché, et il en a assuré l'approvisionnement. Le choix s'est porté sur le radar doppler Marconi et le calculateur associé du même constructeur anglais.

Pour le patrouilleur Atlantic, dont le directeur de programme était l'IC René Bloch, pour des raisons techniques et politiques, le choix s'est porté sur le radar doppler de Canadian Marconi.

Pour l'avion Transall, le choix s'est porté sur un matériel Bendix, qui était également le constructeur du radar météo ; ce choix satisfaisait d'autant plus les partenaires que l'on avait obtenu de Bendix un accord pour faire fabriquer les équipements sous licence par des firmes française (Radio Air) et allemande (Teldix).

Pour le Jaguar A, et plus tard pour certains hélicoptères de l'ALAT, le choix s'est porté sur un radar doppler Decca, que la société EMD fabriqua sous licence.

Cela n'a pas empêché les essais des matériels au CEV, à la Section équipements, tant pour évaluer les performances des équipements que pour confirmer les options retenues avant les choix définitifs.

⁶ Les balises au sol ont vraisemblablement été importées, mais peut-être un certain nombre d'entre elles ont-elles été fournies par l'OTAN, qui souhaitait une mise en place rapide de l'infrastructure.

⁷ Angle entre le vecteur-vitesse par rapport à l'air et le vecteur-vitesse par rapport au sol.

Radioaltimètres

La connaissance de l'altitude de l'avion au dessus du relief du sol survolé a été très tôt une préoccupation des pilotes, mais ce n'est qu'un peu avant la guerre qu'apparut l'utilisation de matériel radioélectrique (sondes radioélectriques ou radioaltimètres). Elle se développa pendant la guerre : sondes à modulation de fréquence pour les basses altitudes, puis sondes à impulsions, bénéficiant du développement des techniques radar.

SFR fabriqua les premiers matériels français, les sondes Aviasol, qui équipèrent le Martinet (bimoteur de transport). De 1953 à 1970, SFR, puis CSF, développa une famille de sondes à modulation de fréquence (NR AS 2-5-6-10), ainsi que la NR AS 7 à impulsions pour le Mirage IV.

À la fin des années 1950, TRT mit à profit des études de sonde pour le missile MALAFON de la Marine nationale pour développer ses activités dans le domaine des radioaltimètres : l'AHV 3, incorporé dans le système d'atterrissage tous temps de Caravelle, permit, à partir de décembre 1962, la réussite des essais d'atterrissage sans visibilité catégorie II puis catégorie III, et fit connaître TRT dans le monde de l'aviation civile. Cela lui permit de prendre la place de CSF dans le domaine. Progressivement, les radioaltimètres TRT ont acquis une renommée mondiale. Ils équipent tous les avions français, mais aussi des F 104 et des Tornado de la *Luftwaffe*, et sont homologués sur presque tous les avions civils (Concorde, Airbus, Boeing).

CHAPITRE 7

LES CONTRE-MESURES AU STTA AU DEBUT DES ANNEES 1960

par Jacques Bousquet¹

SITUATION GENERALE DES CONTRE-MESURES

Qu'elles soient offensives ou défensives, les contre-mesures électroniques constituaient au début des années 1960 une discipline nouvelle, à laquelle se consacraient un nombre limité de spécialistes au sein du STTA, de l'état-major de l'armée de l'Air et de l'industrie. Leur collaboration était particulièrement étroite et confiante : ils avaient en quelque sorte le sentiment d'être des précurseurs et de constituer un « club » d'initiés. Leurs hiérarchies respectives suivaient le mouvement plutôt qu'elles ne l'animaient, avec des motivations diverses.

Les responsables de l'armée de l'Air, constatant l'intérêt que ces techniques soulevaient à l'OTAN et chez nos grands alliés, acceptaient sans rechigner les initiatives qu'on leur proposait et accordaient les financements correspondants, sans qu'on puisse être vraiment sûr qu'ils en appréciaient entièrement le bien-fondé.

Les dirigeants de l'industrie avaient, dans l'ensemble, compris qu'il s'agissait d'un domaine nouveau, susceptible de développements ultérieurs importants, et fournissaient les moyens humains et matériels nécessaires, et ce d'autant plus volontiers que les travaux étaient pour la plupart financés en totalité par l'État.

Quant à la situation au sein de la DMA en cours de création, elle était contrastée. L'adhésion de la direction du STTA, et en particulier de l'IGA Pénin (directeur) et de l'IGA Pérot (sous-directeur technique), était évidemment entière. Au niveau supérieur, celui de la DTIA, les choses étaient moins nettes, mais, il faut le dire à leur décharge, les directeurs successifs n'étaient pas tous des spécialistes de l'électronique. Quant à savoir ce que pensait le délégué ministériel de l'époque du sujet, j'avoue l'ignorer complètement.

Cette « ignorance bienveillante » des grands chefs se traduisait en pratique par le fait que les initiatives proposées étaient en général acceptées, et ce d'autant plus qu'un certain nombre de facteurs objectifs facilitaient des décisions positives.

¹ L'auteur de la présente note n'a consacré aux contre-mesures qu'un temps somme toute limité : cinq ans, à compter d'octobre 1960. Les réalisations antérieures ne lui étaient connues que par la tradition orale, forcément imparfaite ; il n'a pas été impliqué dans les développements ultérieurs, sauf pendant une brève période, de 1980 à 1984, quand il s'est retrouvé au sein de l'équipe de direction du STTE nouvellement créé. Aucune archive personnelle n'ayant été conservée, tout ce qui suit est rédigé de mémoire. Ce témoignage ne peut donc avoir aucune prétention à l'exhaustivité, ni même à une parfaite exactitude.

Tout d'abord, le développement du Mirage IV, composante aéroportée de la FNS, battait son plein. Tout ce qui pouvait contribuer à assurer le succès de la mission ou contribuer à la survie de l'appareil était évidemment bienvenu : or c'était le cas des contre-mesures.

D'autre part, les budgets étaient suffisants, la priorité à donner à la Défense n'étant contestée par personne étant donnée la situation géopolitique de l'Europe.

Enfin, les procédures de lancement des programmes étaient d'une grande simplicité. L'instruction n° 1514 sur la conduite des programmes restait à écrire, et une opération nouvelle était décidée sur une simple décision du général sous-chef « Plans » de l'état-major de l'armée de l'Air, au vu d'un dossier succinct, établi par le capitaine chargé de ces affaires au Bureau des programmes de matériels sur la base d'éléments fournis, parfois téléphoniquement, par l'ingénieur d'études du STTA. Dans un tel contexte, les décisions pouvaient être rapides, à défaut d'être précédées d'une réflexion exhaustive.

LE CHAMP COUVERT

Le terme même de contre-mesures implique que l'objectif recherché est, en général, de gêner, ou mieux d'empêcher le fonctionnement de systèmes électroniques adverses, de détection (radars de tous types) ou de communication. L'objectif peut être aussi de détecter la présence d'un signal électronique, indicateur d'une menace (détecteurs aéroportés signalant l'accrochage d'une conduite de tir adverse).

Diverses classifications étaient utilisées à l'époque.

Le brouillage pouvait être offensif, c'est à dire déclenché *a priori*, par exemple contre une défense aérienne adverse, pour faciliter la pénétration d'une force aérienne. Il pouvait être, au contraire, défensif : dans ce cas, il n'était déclenché, pour l'autoprotection d'un avion, qu'après la détection d'une menace effective (conduite de tir accrochée). Le brouillage pouvait prendre : diverses formes, la suppression (et il s'agissait alors d'émettre sur la (ou les) fréquence(s) concernée(s) des signaux de bruit d'un niveau suffisant pour empêcher la détection du signal utile) ou la confusion² (en émettant des signaux de même nature que les signaux utiles et dont la multiplication permettait de saturer le matériel attaqué).

D'autre part, la détection des signaux adverses pouvait viser la nature même des signaux, que l'on cherchait à mieux connaître pour pouvoir ensuite les brouiller ou les imiter avec le maximum d'efficacité (on parlait alors d'ELINT, pour *Electronic Intelligence*, ou de SIGINT, pour *Signal Intelligence*), ou bien sur le contenu de l'information transmise (on parlait alors de COMINT, pour *Communication Intelligence*).

Bien entendu, les efforts consentis pour brouiller les matériels adverses s'accompagnaient d'efforts tout aussi importants pour anti-brouiller nos propres matériels de détection ou de communication, c'est-à-dire pour accroître leur résis-

² Ultérieurement est apparu le brouillage par déception, impliquant la création de faux signaux parfaitement imités et capables d'entraîner le matériel attaqué sur une fausse piste, au sens propre du terme.

tance à des agressions adverses. Tant qu'il s'est agi d'améliorer dans ce domaine les capacités de matériels existants, dont la conception avait négligé cet aspect des choses, l'anti-brouillage était confié aux spécialistes de contre-mesures. Ensuite, et bien naturellement, les capacités de résistance au brouillage des matériels ont fait partie des spécifications initiales (elles étaient même bien souvent dimensionnantes³), et ont été étudiées en même temps que le matériel concerné : les spécialistes de contre-mesures sont devenus des experts conseillant les équipes, étatiques et industrielles, en charge de ces matériels. Ainsi l'anti-brouillage du radar de défense aérienne ER 37, en service opérationnel à l'époque et qui, de conception ancienne, n'avait à l'origine été doté d'aucune capacité dans ce domaine, était-il de la responsabilité du bureau Contre-mesures. En revanche, l'anti-brouillage du radar Palmier, destiné à succéder aux ER 37, était sous la responsabilité des équipes, étatiques et industrielles, chargées de ce programme.

Dernière distinction : la majorité des matériels développés étaient destinés à être intégrés dans l'avionique des divers avions de l'armée de l'Air. Mais certains étaient des matériels sol : ainsi les stations de détection (ELINT) ou les dispositifs d'anti-brouillage des radars de défense aérienne.

L'ORGANISATION

Au STTA, en 1960, le développement des matériels nouveaux était confié à une sous-direction technique, elle-même décomposée en deux sections : la section Études radar (SER) et la section Études télécommunications (SET), les productions de série étant pour leur part confiées à la sous-direction Production. La SER était elle-même décomposée en quatre bureaux : SER/B1 (radars aéroportés), SER/B2 (radars de défense aérienne), SER/B3 (contre-mesures) et SER/B4 (traitement de l'information).

Pour les contre-mesures, cette organisation n'allait pas sans inconvénients. La séparation qu'elle impliquait, d'abord entre les deux sections chargées respectivement des matériels de télécommunications et des radars, puis au sein de la SER elle-même, n'était pas un facteur d'efficacité pour la promotion de techniques qui, par définition, étaient transverses. Des contacts suivis entre sections et bureaux étaient donc nécessaires en permanence. Ainsi le déclencheur altimétrique de l'arme nucléaire du Mirage IV, qui relevait de la responsabilité du bureau SER/B1, était-il, pour ce qui concerne sa capacité de résistance au brouillage (évidemment tout à fait capitale), traité en commun avec le bureau SER/B3.

Mais le problème s'élargissait dans certains cas aux relations entre le STTA et l'autre service technique, le service technique aéronautique (STAé), qui, en principe, n'avait pas compétence pour les équipements communiquant avec l'extérieur ; mais il y avait quelques exceptions. C'est ainsi que la section Engins spéciaux du STAé, qui faisait développer par Nord-Aviation un missile à télécommande, le N 5103, dont il s'agissait d'accroître la résistance aux contre-mesures, et qui avait constaté que l'industriel, dans un cadre de travaux en régie aux contours mal définis, lui présentait des factures élevées pour des résul-

³ Les paramètres dimensionnants sont ceux qui, si on les modifie, imposent des modifications majeures.

tats peu probants, fit appel au STTA, qui l'aida à réorienter l'affaire sur des bases mieux assurées.

LES ORIGINES DE LA COMPETENCE TECHNIQUE DU STTA

À cette époque, la compétence technique des services de la DMA était incomparablement mieux assurée que celle des services de la DGA d'aujourd'hui. Plusieurs raisons objectives expliquent cet état de fait.

D'une part, le potentiel « de haut niveau » disponible était plus important. Le STTA des années 1960 possédait un nombre d'ingénieurs de l'Air très supérieur au nombre d'ingénieurs de l'armement chargés des mêmes domaines techniques aujourd'hui. L'origine de cette situation est à rechercher à la fois dans la diminution du volume des promotions annuelles⁴ et dans la création progressive d'un grand nombre d'organismes fonctionnels, dont il n'est pas question ici de discuter de la mission, mais qui, en toute hypothèse, absorbent un nombre élevé de cadres.

D'autre part, les procédures liées à la préparation et au suivi des programmes n'étaient qu'embryonnaires. La « tutelle » exercée par la DTI était fort légère, et celle que la DMA exercerait plus tard pas encore établie. Comme on l'a déjà noté, l'instruction n° 1514 sur la conduite des programmes n'existait pas encore ; le contrôle exercé par la Commission des marchés était dans l'ensemble peu contraignant. Enfin, les crédits étaient abondants, et un des problèmes importants qu'avaient à résoudre les services techniques était souvent d'arriver à utiliser la totalité des autorisations de programme qui leur étaient ouvertes chaque année.

Dans ce contexte d'ensemble favorable, les ingénieurs militaires du STTA pouvaient se consacrer en priorité aux activités d'ordre technique, et ils ne s'en privaient pas. Deux facteurs venaient conforter leur compétence.

D'une part, l'industrie était, comme on le verra ci-après, extrêmement dispersée. Seuls les ingénieurs des services de l'État avaient une vision complète des travaux effectués dans chaque domaine, des avancées éventuelles sur tel ou tel point et des difficultés restant à résoudre.

D'autre part, les ingénieurs de l'État avaient le monopole des relations avec les pays alliés. Ce point important mérite quelques développements. Le plus important de nos alliés était évidemment les États-Unis d'Amérique, et, dans le domaine des contre-mesures comme dans l'ensemble des techniques liées à l'armement, ils étaient fort en avance sur nous. Mais divers moyens existaient pour recueillir une information de qualité suffisante pour que notre retard reste stable au fil des années, de l'ordre de trois à cinq ans. Le premier était l'analyse attentive de l'information ouverte (périodiques, revues scientifiques, stands des salons professionnels, etc.). Malgré la confidentialité qui marquait le domaine des contre-mesures, les résultats ainsi obtenus étaient loin d'être négligeables. Le second était constitué par les contacts entretenus au niveau des services officiels eux-mêmes, qui pouvaient prendre des formes diverses.

⁴ La promotion 1954 de l'École Polytechnique avait permis le recrutement de plus de 80 ingénieurs militaires des différents corps de l'époque. Aujourd'hui, le volume d'une promotion d'ingénieurs de l'armement est toujours inférieur à 35.

Avec les États-Unis existait la procédure des MWDP (*Mutual Weapon Development Program*), qui permettait, avec un financement américain, le développement de matériels divers par l'industrie européenne. La première version du brouilleur Agacette développé par Électronique Marcel Dassault pour le Mirage IV avait bénéficié de cette formule. D'autre, part, divers organismes créés par l'OTAN disposaient de compétences dans ce domaine : ainsi du SADTC (*SHAPE Air Defence Technical Center*) situé aux Pays-Bas, à proximité de La Haye, avec lequel nous entretenions des contacts suivis et souvent productifs dans le domaine de la défense aérienne. Des groupes de coopération existaient aussi avec divers pays européens. Les contacts étaient particulièrement actifs avec l'Allemagne, et il est intéressant de noter qu'ils étaient conduits en commun par les trois services techniques de la DMA ayant à connaître des contre-mesures : le STTA, la SEFT (Section d'études et fabrications des télécommunications) pour l'armée de Terre et le STCAN (Service technique des constructions et armes navales) pour la Marine.

Enfin, le STTA avait suscité la compétence de diverses sociétés d'études et de conseil, au premier rang desquelles se situait la société AERO, créée et dirigée par Émile Labin. Les études de recherche opérationnelle ainsi conduites étaient fort utiles pour la clarification des idées et la détermination des paramètres sensibles.

L'INDUSTRIE FRANÇAISE DES CONTRE-MESURES

Comme on l'a déjà signalé, l'industrie française des contre-mesures était à l'origine fort dispersée. Les deux grands de l'électronique qu'étaient alors CSF et CFTH étaient évidemment très présents dans divers domaines : brouilleurs offensifs, tubes électroniques, dispositifs d'anti-brouillage pour radars de défense aérienne pour CSF ; détecteurs d'alerte aéroportés, tubes électroniques également pour CFTH.

Mais un grand nombre d'industriels moins puissants avaient également su s'intéresser au secteur. Au premier rang de ceux-ci, on doit évoquer Électronique Marcel Dassault (EMD), créée quelques années auparavant, et qui s'était vu confier la réalisation du brouilleur du Mirage IV. Il faut citer également FERISOL, spécialisée dans l'appareillage de mesure électronique et qui réalisait des stations sol d'écoute et d'analyse des signaux ; ELECMA, division électronique de SNECMA, qui réalisait des éléments à large bande (antennes, coupleurs etc.) ; TRT, retenue pour le développement de déclencheurs altimétriques ; et STAREC, pour des antennes à large bande.

Même si, pour des raisons à la fois de confidentialité et de politique industrielle, le recours à des fournisseurs étrangers était quasi inexistant, un exemple inverse peut être cité : celui de l'achat de *chaffs* (paillettes métallisées larguées en grand nombre pour saturer les radars adverses, de défense aérienne ou de conduite de tir) réalisé auprès de la société anglaise Chemring⁵, dont la mise en œuvre opérationnelle au profit du Mirage IV fut confiée à GAMD (le nom, à ce moment, de la société fondée et dirigée par Marcel Dassault).

⁵ Par l'intermédiaire d'un citoyen suédois, du nom de Peter Wessel, au sujet duquel on hésita longtemps sur le point de savoir s'il était un aigrefin ou un honnête homme. La suite des événements prouva que le deuxième terme de l'alternative était le bon.

Entre fournisseurs, la concurrence était forte, et le service ne se privait pas de la faire jouer au maximum. Les considérations qui prévalurent ensuite, dans un contexte financier plus contraint, quant à la nécessité de créer des « champions nationaux » n'étaient pas encore de mise, et le souci de développer les capacités nationales en « faisant flèche de tout bois » primait toute autre considération. Des duplications de compétences étaient donc acceptées. Certaines durèrent fort longtemps : ainsi de la concurrence entre CSF et Dassault électronique, qui ne se termina... qu'en 1998.

LES PROGRAMMES

En amont des développements de matériels complets, le bureau B3 conduisait des activités diverses de construction des compétences et de préparation de l'avenir. On a déjà évoqué à ce sujet les nombreuses études de recherche opérationnelle sur des sujets très divers. Un autre domaine très important était celui des composants. Les matériels de contre-mesures doivent, en règle générale, disposer de bandes de fonctionnement aussi larges que possible, de façon à pouvoir s'adapter à un nombre maximal de matériels adverses. D'où la nécessité de disposer de composants de tous types : coupleurs, mélangeurs, standards de fréquences, tubes d'émission, etc., qu'il fallait développer les uns après les autres dans une gamme très large, allant de la bande L aux bandes X et même Ku.

Le cas des tubes d'émission mérite un développement particulier, du fait de son influence sur la performance globale des matériels : la largeur de bande de fonctionnement, la densité de puissance émise (en W/MHz) et le rendement global étaient en particulier des paramètres dimensionnants. Deux voies s'ouvraient *a priori* pour résoudre le problème : l'utilisation de chaînes amplificatrices à partir d'une source de bruit, ou bien celles de tubes ayant la capacité de créer par eux-mêmes le signal désiré au niveau convenable. La première voie était celle des tubes à ondes progressives, la seconde celle des carotrons.

L'invention de ces familles de tubes s'était faite aux États-Unis, mais l'industrie française, CSF principalement, mais aussi CFTH, sut rattraper son retard, et jamais les matériels que l'on souhaitait développer ne manquèrent des tubes qui leur étaient nécessaires. Certes, les difficultés ne furent pas absentes, et le déroulement de certaines affaires confina même parfois à la saga. Tel fut en particulier le cas pour le développement, au début des années 1960, d'une famille nouvelle de tubes, baptisés tométrons, dont l'idée avait vu le jour au sein de la division tubes de CFTH, et qui était parée de toutes les vertus théoriques pour constituer le tube idéal pour contre-mesures. Las, quelque difficulté nouvelle de réalisation surgissait toujours au moment où l'on croyait le but proche et, malgré l'optimisme indéfectible des inventeurs de ce bijou, il fallut se résoudre, après bien des efforts et d'argent dépensé, à admettre l'échec et arrêter les frais...

Les principaux programmes de matériels proprement dits couvraient la palette des équipements décrits ci-dessus.

Le programme le plus « en vue » était celui du brouilleur d'auto-protection du Mirage IV, pour lequel l'échec n'était évidemment pas permis. On a déjà dit que

le développement de ce matériel, l'Agacette, avait été confié à EMD, dans le cadre d'un contrat MWDP. Mais on s'aperçut bien vite que, dans la conception initiale, la densité de brouillage serait, à coup sûr, trop faible pour garantir une efficacité suffisante. Vers 1959, on lança donc, sans en parler à nos amis américains, une version de l'Agacette aux performances améliorées, qui donna satisfaction, et équipa donc en série les Mirage IV. Mais l'histoire de l'Agacette 1 n'était pas terminée pour autant. Dans le cadre du contrat MWDP précité, l'*US Air Force* proposa, en 1962, d'essayer notre matériel sur un simulateur de systèmes d'armes⁶ dont elle disposait à l'usine de Fort Worth de General Dynamics. Il n'y avait pas moyen de refuser. Et le verdict tomba, sans appel : « Votre matériel est sans doute très bon pour protéger les avions français, qui sont petits. Mais nos avions sont trop gros pour lui ». Il ne nous surprit pas outre mesure...

Autre programme de brouilleur, mais offensif celui-ci, et donc en bande S : le Chipiron, développé par CSF. Il était destiné aux Mirage III et IV, pour faciliter la pénétration de forces aériennes. Le déroulement de ce programme s'est effectué sans difficultés particulières.

Des programmes de détecteurs d'alerte aéroportés, destinés à prévenir nos pilotes de l'accrochage sur leur avion d'une conduite de tir adverse, furent lancés à la fin des années 1950. Développés par CFTH, ils étaient destinés à équiper notamment les Mirage III (matériel BZ) et les Super Étendard (matériel BW). Ils constituaient la première famille de matériels aéroportés entièrement transistorisés développée en France, et leur mise au point complète n'alla pas sans d'importantes difficultés liées à des fausses alarmes intempestives, qu'il fallut du temps pour juguler sans altérer de façon inacceptable la sensibilité de détection.

Des matériels d'écoute et d'analyse des signaux, de la bande L à la bande X, furent également développés, à la fois sous la forme de stations sol et d'équipements aéroportés destinés aux Mirage III. Le programme de stations sol, dénommées SMYRNE, fut conduit par la société FERISOL. Il conduisit à la réalisation de plusieurs stations, qui furent installées par l'armée de l'Air en Europe centrale, le long du Rideau de fer, et fonctionnèrent pendant de longues années à la satisfaction des utilisateurs. Le matériel FURET aéroporté fut, quant à lui, confié à la société EMD. On peut également citer un matériel plus original, le MARABOUT, développé de façon très discrète par ELECMA à l'intention des agents de nos services spécialisés pour l'analyse des radars de défense aérienne sur le territoire même des pays de l'Est. Extérieurement, il se présentait comme un simple poste à transistors, et sa mise au point ne fut pas un lit de roses.

On peut enfin évoquer le développement d'une baie d'anti-brouillage pour les radars de défense aérienne ER 37. Réalisée par CSF, cette baie était dotée des diverses chaînes de réception connues à l'époque (amplificateur logarithmique, *dicke fixe*, etc.). Son expérimentation opérationnelle, au Centre d'expériences aériennes de Mont-de-Marsan (CEAM), n'alla pas sans quelques diffi-

⁶ Ce simulateur était une immense « usine à gaz ». Utilisant un brouilleur et un radar de tir réels, il reconstituait les trajectoires des deux avions, à une époque où les moyens de calcul n'étaient évidemment pas ce qu'ils sont aujourd'hui, et où les calculateurs, analogiques bien sûr, utilisaient encore les tubes à vide !

cultés, et dura assez longtemps. Il est vrai que l'opération concernée, si elle était suivie de très près par les officiers directement concernés, ne passionnait pas les échelons plus élevés de la hiérarchie, et ne se voyait pas toujours accorder facilement les importants moyens aériens nécessaires...

EN GUISE DE CONCLUSION

Au total, le bilan des actions conduites dans un domaine où tout était à inventer, et qui, du fait de sa nouveauté même, était souvent mal compris des responsables de l'époque, n'est pas défavorable. Les rendez-vous fixés pour les principaux programmes ont, dans l'ensemble, été tenus, et, s'il y a eu quelques échecs dans les actions de préparation de l'avenir, ils ne paraissent pas anormaux, compte tenu du contexte.

Comme il est bien normal, près de quarante ans après, les progrès accomplis ont été considérables. Les matériels actuels ont des performances sans commune mesure avec celles de leurs lointains prédécesseurs, mais ces derniers constituaient une première étape nécessaire que les services concernés de l'État et de l'industrie ont su franchir. Puisse cette modeste contribution aider à garder leur mémoire...

CHAPITRE 8

LES RESEAUX D'INFRASTRUCTURE LE RESEAU AIR 70

par Jacques Clavier et Robert Carlier

POURQUOI UN RESEAU ?

Pour l'essentiel, la structure de l'armée de l'Air est simple : une trentaine de bases fixes et des avions ou hélicoptères. En conséquence, la question des communications entre ces éléments appelle des réponses non moins simples. Il faut des liaisons entre aéronefs (air-air), entre eux et les bases (air-sol), enfin entre les bases elles-mêmes : ce sont les liaisons dites d'infrastructure (sol-sol), objets du présent chapitre, dont on admettra que, sous son titre de « Réseau Air 70 », il donne une histoire résumée des idées et des actions qui, de 1955 à 1985, ont bâti les télécommunications sol-sol de l'armée de l'Air

Dans les années 1950, l'armée de l'Air dispose, pour relier ses bases, du réseau PTT et d'un réseau incomplet, Philco, héritage de la guerre et fourni au titre du Pacte d'assistance militaire (PAM). Philco est vieillissant, et la fiabilité du réseau PTT n'est pas assurée en cas de troubles ou d'actions terroristes. Or l'efficacité de l'armée de l'Air exige qu'elle soit constituée et gérée en tant que système, c'est-à-dire comme un ensemble cohérent de moyens convenablement liés entre eux. C'est une belle leçon de la guerre que les Britanniques, les premiers, nous ont apprise.

L'idée a donc germé, dans les années 1955-1960, qu'il serait judicieux de doter l'armée de l'Air d'un réseau de télécommunications d'infrastructure moderne, performant et autonome. On ne jugeait pas stupide de placer la qualité des télécommunications entre les bases à la hauteur de celle de la série des Mirage et de la défense aérienne (radar Palmier, système STRIDA 2), pour ne citer que ces deux exemples.

Il n'était pas question de faire appel aux câbles coaxiaux enterrés, coûteux et vulnérables. Les satellites étaient encore balbutiants. Par ailleurs, construire pour soi un réseau hertzien de type PTT n'était pas enthousiasmant. Autant essayer alors (mais comment ?) de sécuriser le réseau existant.

Des officiers de l'état-major (EMAA) et des ingénieurs du STTA se sont souvenus que les bases de l'armée de l'Air se répartissaient assez régulièrement sur le territoire (malgré une certaine accumulation à l'Est), que les distances entre elles allaient de 100 à 150 km et qu'il existait une technique nouvelle, déjà partiellement mise en œuvre par les Américains et l'OTAN, permettant d'assurer des portées de cet ordre sans relais intermédiaire (situés tous les 50 km en moyenne dans un réseau PTT). Il s'agissait des faisceaux hertziens troposphériques. Cette possibilité toute récente résolvait élégamment le problème, limitait

grandement le nombre de stations à construire, et permettait d'envisager un instrument nouveau, voire original, et en tous cas adapté aux besoins.

Un mot sur la « tropo », comme on l'appelle : on sait que la règle de propagation des ondes hertziennes (de 500 Mhz à 5 000 Mhz, soit de 60 à 6 cm de longueur d'onde, à cette époque) est la ligne droite. On travaille « à vue directe ». Souvent les radaristes (dont Marconi), pendant la guerre, ont constaté des propagations anormales, « au-delà de l'horizon ». Le responsable est l'indice de réfraction de l'air (n), certes toujours très voisin de 1, mais soumis à des fluctuations erratiques dues à l'hétérogénéité de la troposphère, en température et humidité notamment. Aussi la météo troposphérique et indiciaire évolue-t-elle entre deux états extrêmes :

- un temps calme, caractérisé par un empilement de couches d'air dont chacune est à indice constant. Attaquées par le faisceau hertzien, ces couches se comportent comme des miroirs, plus ou moins ondulants, évidemment à faible pouvoir réfléchissant. On dit qu'on est en régime de réflexion spéculaire ;
- un temps perturbé : les couches deviennent des volutes turbulentes, les surfaces de discontinuité sont traversées sous tous les angles par le faisceau. C'est la réflexion diffuse.

On évoque souvent une image, d'ailleurs juste : celle de l'apparence du soleil sur la mer, selon qu'elle est plate (réverbération), peu agitée (scintillement) ou agitée (poudroïement). On a compris que le phénomène « tropo » est par nature fluctuant, sensible au temps et parasité¹ par référence à la loi de propagation directe qui reste de règle.

Il est rare, dans les applications techniques, de faire appel à des propriétés marginales. En l'occurrence, la tropo permet de diviser par 3, *grosso modo*, le nombre de stations (relais) d'une liaison, donc par 9 la densité d'un réseau. C'est pourquoi elle fut, pour l'essentiel, utilisée dans deux cas : là où les besoins sont relativement distants, et là où les difficultés du relief sont grandes.

Les conséquences sur le matériel, en raison de la faiblesse des signaux reçus, sont importantes. Il faut utiliser des antennes de grande dimension, en fait des paraboles de 6 à 12 m de diamètre, et une forte puissance d'émission, avec des klystrons d'un ou plusieurs kW de puissance moyenne (cf. chapitre 4).

L'affaiblissement standard est proportionnel à l'inverse du carré de la distance. L'affaiblissement « tropo » s'établit entre l'inverse de la distance et celui de la puissance huitième de la distance. Il faut donc des récepteurs à faible bruit, très souvent munis d'amplificateurs d'entrée dits paramétriques. Il faut aussi, pour contrer le caractère fondamentalement aléatoire (parfois ± 20 db de fluctuation en une seconde) du signal reçu, mettre en œuvre ce qu'on appelle la diversité. Par exemple, la diversité d'ordre 4 installe une liaison avec 2 émetteurs et 2 antennes à l'émission et 4 récepteurs et 2 antennes à la réception : d'où 4 chemins optiques et 4 signaux reçus décorrélés dans le temps ou dans l'espace. À chaque instant, on choisit le meilleur, ou mieux encore une combinaison des quatre !

¹ Le signal reçu en tropo s'élève à plusieurs dizaines de décibels au-dessous du signal qui serait reçu en vue directe.

L'ENVIRONNEMENT

L'idée d'un réseau moderne d'infrastructure pour l'armée de l'Air s'est précisée, on l'a vu, dans les années 1955-1960. Elle répondait à un besoin d'autonomie et de sécurité. Elle est devenue réalisable grâce à l'emploi de faisceaux hertziens troposphériques, qui furent en quelque sorte le déclic de l'opération. En réalité, elle a bénéficié d'un environnement exceptionnellement favorable, du côté de la technique comme des hommes, sans lequel elle ne se serait probablement pas concrétisée.

La technique

La découverte, en 1948, de l'effet transistor et de la possibilité de le traduire industriellement allait fonder l'électronique moderne et provoquer l'explosion technologique, puis économique, que l'on sait.

On sait moins qu'autour des années 1960, les sceptiques abondaient, dont (en 1959) certains élèves de Sup'élec qui estimaient le transistor sans avenir, en raison du nombre de travaux pratiques qui ne marchaient pas !

Pour ce qui nous intéresse, la révolution qui, assez vite, a remplacé les bonnes vieilles lampes à filament ou les contacts à relais électriques par des composants cristallins froids (diodes et transistors au germanium ou au silicium) puis par des circuits intégrés comprenant des transistors, des diodes, des résistances et des capacités, a permis :

- la numérisation des signaux donc de l'information, opération capitale qui établit un pont entre télécommunications et informatique, avant de les lier définitivement ;
- la transistorisation des faisceaux hertziens, leurs récepteurs à faible bruit, leurs émetteurs à l'état solide ;
- l'irruption de la commutation électronique, industriellement si soudaine qu'elle souleva de graves problèmes d'emploi dans l'industrie ;
- le développement de la transmission des données, initialement langage des ordinateurs, aujourd'hui expression de toutes les machines numériques, téléphone et télévision compris.

Dans un pareil contexte où fourmillaient les idées, les concepteurs du Réseau Air se sentaient épaulés, encouragés, et apportèrent de ce fait leur contribution au développement de l'industrie électronique.

Les hommes

Les souvenirs embellissent avec le temps, c'est sûr, mais on doit reconnaître que les circonstances se sont très heureusement prêtées à la réussite de nos projets.

L'armée de l'Air – les télécommunications, alors, n'étaient pas son premier souci – comptait au BPM (Bureau des programmes de matériels) et au bureau TRANS des officiers (tels que le commandant Bœuf, le commandant Duboz, le colonel Brénac) issus de la guerre, dynamiques, entreprenants, ouverts. Ils étaient de ceux pour qui les obstacles administratifs devaient être bousculés

avant d'être surmontés, et ils constataient certainement sans déplaisir que les équipes de jeunes ingénieurs du STTA pensaient comme eux.

Une bonne entente était aussi établie avec les services du CNET (son directeur, M. Marzin, l'ingénieur général Sueur, et MM. Voge, Boithias, Battesti pour les hertziens, Dondoux² pour la commutation). Elle contribua à conforter nos idées, à les éclairer, et à les assurer tant auprès de notre hiérarchie qu'auprès de l'état-major et des industriels.

Ces derniers ne furent jamais en reste. Il fallait souvent les freiner, tant la compétition était vive, alimentée par la jeunesse des sections d'étude, la volonté des dirigeants et les enjeux : pour des raisons économiques évidentes, il n'était en général pas question de relancer la concurrence au stade de la fabrication. Elle avait donc lieu, souvent féroce, lors de l'attribution des contrats d'étude.

La règle la plus commune, alors, était le marché forfaitaire de gré à gré. On en a dit, depuis, beaucoup de mal. C'était pourtant, à notre avis, le moyen le plus intelligent de parvenir au meilleur compromis entre coût et performances. Cela entraînait, évidemment, une forte responsabilité du Bureau des programmes de matériels (le décideur), mais impliquait aussi, pour lui, une grande conscience morale et professionnelle. A l'époque, cela allait de soi et nous ne nous posions même pas la question.

Des patrons et ingénieurs remarquables ont jalonné les progrès de toute cette période : MM. Ponte et Danzin à CSF, MM. Dontot, Bouyssonnier, Chavance, Iltis, Piolet à la CFTH, MM. Môme, Labarre, Ménager à la SAGEM, MM. Parce, Lebedenski, Boulou, Lévy, Liger, Le Menestrel à la SAT, M. Boudeville chez TRT, MM. Fromageot et Manière chez LTT, MM. Meyniel et Brue à la CIT...

Les relations établies avec l'*US Air Force* à travers un contrat MWDDEA (*Mutual Weapon Development Data Exchange Agreement*) eurent l'avantage de nous informer largement sur ce qui se faisait en Amérique, de conforter notre action et de la rendre crédible en France : nous n'explorions pas des voies sans issue. Le personnage central de nos affaires outre atlantique était Dick Benoit, du RADC (*Rome Air Development Center*, dans l'état de New York), ingénieur d'origine française, grand, pittoresque (il avait installé chez lui un émetteur radio de 1 kW, au grand dam de ses voisins), jovial, régulier comme tous les Américains, c'est-à-dire appliquant scrupuleusement les termes du contrat qui nous liait. La moisson fut ample, recueillie auprès de l'industrie électronique américaine qui, elle aussi, « jouait le jeu ». Sans doute, comme en France, les autorités ne tenaient-elles pas encore aux télécommunications comme à la prunelle de leurs yeux. Il reste que nous finîmes par connaître assez bien, après de nombreux voyages, les idées d'ITT, Collins, RCA, Motorola, SDS...

Ces liens outre-atlantique étaient complétés par ceux, plus proches, établis avec l'OTAN ou plus précisément le SADTC (*SHAPE Air Defence Technical Center*) à La Haye. La préoccupation d'alors, dans notre domaine, était l'extension hertzienne du réseau existant (dont la *Hot Line* en Norvège) et la normali-

² Ensuite directeur du CNET, puis de la Direction générale des télécommunications, et ministre en 1997 (récemment décédé).

sation des liaisons de défense aérienne (dont la liaison 1 sol-sol). Le patron de la section télécom était le Dr Knudsen, gigantesque norvégien – on devrait dire normand – débonnaire, compétent et francophile, ce qui fait beaucoup. Les différents contacts et réunions (je fus désigné officier de liaison en 1964) au SADTC achevèrent de nous prouver que nous étions « dans le coup ».

Il reste l'essentiel : notre milieu propre, c'est-à-dire le STTA. Tout était fait pour que les jeunes ingénieurs (en tous cas l'équipe du bureau E4, études télécom sol) s'y épanouissent. Le chef de la section d'études télécom était l'IC Long. Placide, inébranlable, ménageant ses efforts, il nous donnait dans nos initiatives, dans la technique, dans nos rapports avec l'industrie, la plus grande liberté. En revanche, fin connaisseur du code des marchés et de la gestion qu'il implique, c'était un censeur minutieux qui ne laissait passer aucune faute dans nos projets de contrats.

Il faut rappeler que la règle, au STTA, voulait que l'ingénieur d'étude – comme d'ailleurs l'ingénieur de production – soit complètement responsable des marchés qu'il contractait avec l'industrie : il rédigeait et envoyait les consultations ou appels d'offre, discutait prix, délais et clauses techniques, établissait la totalité du contrat, assorti du rapport de présentation destiné à la Commission électronique des marchés. Quelle formation quand, sorti de l'école, on est plongé dans ce bain administratif ! Nous nous rendîmes compte, avec le temps, quel service l'IC Long, avec sa rigueur souriante, nous avait rendu. Il nous tendait ce filet de sécurité, assurés que nous étions d'un dossier bien ficelé en Commission, mais désireux aussi de n'y point tomber.

Le directeur des études, l'IC Pérot, scientifique dans l'âme, à l'intelligence acérée et un rien diabolique, s'intéressa, lui, de plus en plus à notre domaine, ce qui nous valut son soutien dans certains de nos projets un peu hasardeux.

Enfin, au sommet de la maison, le patron au sens latin du terme : l'IG Francis Pénin. Massif, carré dans son fauteuil, derrière une pipe souvent allumée, il observait ses ingénieurs, jeunes chevaux un peu fous. Les laisses étaient tenues très longues, mais nous savions notre directeur toujours prêt à les reprendre si nécessaire. Son bureau était synonyme d'accueil, surtout le soir où l'on pouvait toujours exposer un problème, chercher un conseil ou recevoir une consolation. On n'aura garde d'oublier les équipes d'étude, de réalisation et d'installation. Tous ne peuvent être cités. Pour E4, il faut évoquer : R. Fraysse, mon prédécesseur, MM. Niquil, Dages et Scheller, mes successeurs, l'IC Fourastier, le capitaine Tritant, MM. Manconi, Gery, Morillon, Mouffock...

LA CONCEPTION DU RESEAU

L'environnement a donc permis l'étude et la réalisation du réseau de se développer dans de bonnes conditions. Par ailleurs, le concept était en lui-même porteur de cohérence. Il intégrait en quelque sorte les besoins de l'armée de l'Air en matière de télécommunications, même si certains rattachements au système restaient discutables. Les principes retenus étaient pour l'essentiel les suivants :

- le réseau serait analogique (contrairement au réseau tactique Terre, étudié par l'IC Vitry à la SEFT, numérique et qui devint le RITA) et fondé sur le ca-

nal de transmission élémentaire : la voie téléphonique normalisée CCITT ou ses multiples (12, 60, 120, 240) ; rien que du très classique, quoique réalisé avec des matériels nouveaux ;

- le réseau serait résistant aux attaques, d'où le maillage et l'automatisme du routage des informations. Si un chemin radioélectrique est encore possible entre deux bases, il doit être établi. Cette nécessité de la robustesse a entraîné l'emploi de la commutation électronique, où l'armée de l'Air a tenu un rôle de pionnière ;
- les progrès scientifiques et techniques, fruits de la conception du réseau, devraient intéresser une large part de notre industrie électronique. Incidemment, on s'assurait ainsi son concours pour la réussite du projet (voir tableau *infra*).

L'étude des éléments du système s'est étalée de 1958 à 1964, et leur réalisation de 1964 à 1975.

Dans sa structure, le système comporte une ossature principale hertzienne maillée, formée de nœuds occupant en général des points hauts, à partir desquels s'effectue la desserte également hertzienne des bases. C'est l'ossature secondaire.

Dans le fonctionnement, on distingue :

- le réseau en temps réel (ou RTR), transportant voix ou données (jusqu'à 2 400 bits/s), avec gestion automatique des priorités et quelques lignes stratégiques montées à l'envers : elles sont établies en permanence et l'alarme sonne quand elles ne sont plus disponibles. Dans chaque nœud, il y a un commutateur électronique principal (CP), et dans chaque base un auto-commutateur électronique secondaire (CS) ;
- le réseau en temps différé (ou RTD) : en fait, c'est la messagerie du système, avec ses problèmes militaires de routage, d'urgence, d'archivage. Organisé autour de quatre centres puissants, les RAID (Relais automatiques d'information digitale, comportant les calculateurs 10070 du Plan calcul), reliés à grande vitesse, il nourrit les téléimprimeurs électroniques et autres terminaux de données ;
- le réseau de télésurveillance et de télésignalisation (ou RTT). Il a pour objet de connaître l'état de situation dans chaque station (base ou nœud), notamment en matière de disponibilité et de charge de liaisons. Les messages recueillis localement et datés sont émis dans toutes les directions et constituent, par agrégation, un message d'information générale, rafraîchi toutes les 10 secondes, qui informe les commutateurs des décisions à prendre, selon la programmation en cours. Le RTT a été longuement simulé sur ordinateur pour s'assurer de ses performances et de sa stabilité.

Matériels constitutifs de Réseau Air 70

Désignation	Caractéristiques	Début d'études	Constructeur	Remarques
Ariane	FH (faisceau hertzien) tactique modulaire 960 MHz Vue directe	1957	CFTH + SAT	commun avec l'armée de Terre
Mercuré	FH tropo 4 400-4 600 MHz 1 kW	1960	CFTH + SAT	licence Westinghouse, et Varian pour le klystron
MX 621-622	FH 1 700-2 700 MHz	1960-1962	CSF	premier faisceau hertzien transistorisé
Multiplex 12 voies X2, 5, 10, 20	multiplex (courants porteurs) de voies téléphoniques	1960	SAT + AOIP	carte noyée dans une résine ; indestructible
Liaison 1-OTAN	modems à 750 / 1 500 bit/s	1960	LTT + SACM	parmi les premiers modems en France
RAID	centre de traitement de messages	1963	CIT Alcatel	calculateur 10070 + modems 1 200 / 2 400 bit/s
Commutateurs électroniques	centre principal centre secondaire	1962	SAT + AOIP	début de la commutation électronique
Télesurveillance Télésignalisation	informe sur l'état du réseau	1964	TRT	le cerveau du réseau
Antennes paraboliques	de 2 à 6 m de diamètre	1966	CFTH + CSF	
Groupes de secours à t = 0	pour les stations principales	1966	Alsthom	mise en place par DIA
Ateliers d'énergie sans coupure	pour les stations secondaires	1966	CSF	

LA REALISATION DU RESEAU

L'organisation des partenaires

Pour passer à la phase de réalisation du RA 70, on créerait aujourd'hui une Direction de programme. En fait, une telle direction informelle a bien existé au sein du STTA, même si l'activité dominante s'est déplacée au fur et à mesure de l'avancement des études de la section qui leur était dédiée (SET) vers la commande des matériels de série (Section production), puis vers l'installation (Section des installations à terre). Les responsables du RA 70 dans chaque section (l'IC Clavier à la SET, le commandant Henry à la SP, le commandant Hugounenq à la SIT) et les personnes placées sous leur autorité ont travaillé ensemble en bonne harmonie, dans un souci d'efficacité maximale. Ils ont trouvé un appui constant de leur hiérarchie pour l'avancement du projet, en par-

ticulier auprès de l'IG Derbesse, sous-directeur industriel du STTA, mais qui avait auparavant passé quelques années aux études de télécommunications.

De son côté, l'EMAA/Trans s'est mobilisé fortement pour assurer la liaison entre l'utilisateur futur du réseau (le Commandement des transmissions de l'armée de l'Air, ou CTAA) et son responsable pour le génie civil : la Direction de l'infrastructure de l'Air (DIA).

Entre le STTA, l'EMAA/Trans et le CTAA, les rapports étaient directs et les contacts informels. Les réunions de type « grand messe » étaient limitées au strict minimum, pour faire remonter à la hiérarchie l'état d'avancement du RA 70. Avec la DIA, c'était un peu plus difficile, celle-ci n'étant finalement qu'un donneur d'ordres et un bailleur de fonds pour les Services locaux constructeurs (SLC), en l'occurrence les diverses directions de travaux du Génie pour la majorité des stations principales, et les services spéciaux des bases aériennes pour les stations secondaires.

Du côté industriel, compte tenu de l'ampleur du projet, mais aussi de la bonne définition des responsabilités de chaque participant, les rapports ont paru courtois, comme si chacun sentait que l'échec d'un partenaire signifierait l'échec de tous.

Un bureau de coordination du RA 70 (BCRA) fut créé à l'initiative de la SET en 1963, pour répondre à une demande informelle exprimée tant par les différents industriels que par l'armée de l'Air. Le responsable de ce bureau de coordination était M. Brénac, ancien officier du BPM, assisté d'ingénieurs de différentes spécialités venant des sociétés impliquées dans le RA 70. C'est le BCRA qui établissait le plan des fréquences d'émission ou de réception des équipements selon leur répartition géographique, participait au bilan des liaisons et définissait, à partir des résultats d'essais de propagation, les matériels à mettre en place pour chaque liaison.

L'installation

En raison du nombre important de stations (23 stations principales) réparties sur le territoire national, il fallait concevoir un plan type de station, avec une certaine modularité selon qu'il s'agissait d'un nœud simple ou complexe du réseau. À partir de ce plan type, il appartenait à chaque SLC, en fonction notamment des conditions météo locales, de définir les plans de construction.

En 1963, l'IP Fraysse, alors chef de la SIT, confia à Thomson les tâches de conception du plan type de station, de participation avec les services officiels à la recherche des points d'implantation, et d'établissement d'un dossier d'installation pour chaque station. Il s'agissait là de la déclinaison du plan type pour chaque station, prenant en compte tous les problèmes qui se posent pour une implantation isolée sur un point haut et à réaliser le plus souvent sur un terrain nu (accessibilité, énergie...). Deux stations firent l'objet de dossiers spécifiques, celles du mont Ventoux et du Haut-Folin (dans le Morvan), stations communes à l'armée de l'Air et à la radiodiffusion (ORTF). Enfin, Thomson se voyait aussi confier le tracé des profils des liaisons à partir de la cartographie existante et la vérification de l'existence de conditions satisfaisantes de propagation.

En 1962-1963, il avait été décidé de réaliser une liaison expérimentale entre Metz et Drachenbronn avec des matériels prototypes. L'installation, faite hâtivement et sans avoir pris beaucoup de précautions pour l'implantation des antennes, ne fonctionna pas de manière satisfaisante, ce qui servit à alimenter pendant quelques mois une querelle entre les partisans des liaisons à vue directe et les partisans des liaisons troposphériques. Celle-ci ne fut définitivement close qu'en octobre 1964, lors d'une grande réunion présidée par le sous-chef « Plans » à l'état-major, le général Rouquette, qui eut la sagesse de ne pas remettre en cause les projets en cours.

De cet échec, une leçon fut tirée : il ne fallait pas figer l'implantation du réseau avant d'avoir effectué des essais de propagation sur chaque liaison. Un « cirque Pinder » fut réalisé, avec des camions, groupes électrogènes, *shelters* pour les équipements de liaison et de mesure et antennes. Un essai d'une quinzaine de jours eut lieu entre les deux points de chaque liaison, un sous-officier de l'armée de l'Air affecté à la SIT étant responsable du bon fonctionnement du matériel en chaque point. Les conditions de vie sur place étaient spartiates, mais comme les ingénieurs du STTA, du BCRA et de Thomson montraient beaucoup d'intérêt pour les résultats obtenus, la motivation était entretenue.

L'intérêt de la campagne d'essais de propagation était de disposer d'un ensemble de mesures de la propagation, à comparer avec les bilans théoriques de liaison, mais aussi de s'assurer qu'il n'y avait pas d'erreur d'implantation. En pratique, on s'aperçut, à la suite d'une erreur de report sur les cartes, qu'un point proposé dans l'Est de la France ne convenait pas ; après quelques heures de rectification de tracés sur cartes, le point d'implantation proposé fut déplacé et le problème soulevé résolu. Le coût de la campagne d'essais était bien inférieur aux dépenses qui auraient été provoquées par cette erreur d'implantation, sans compter les critiques !

Pour le réseau secondaire, la même démarche fut entreprise, mais l'exécution fut plus simple. CSF, constructeur du MX 622, décida très tôt, au vu de la campagne décrite plus haut, de réaliser un ensemble de mesures de performances pour des liaisons à vue directe ; cet ensemble fut loué contractuellement au constructeur, chargé aussi de la réalisation des essais.

Le contrat d'installation à prix forfaitaires pour le réseau principal fut confié à Thomson, SAT, TRT et CSEE (Compagnie des signaux et entreprises électriques), qui avaient chacun des tâches bien identifiées. Dès qu'une liaison était achevée, elle devait être remise à l'armée de l'Air, qui devait alors prendre en main les équipements. Pour éviter les problèmes inhérents à la prise en charge d'équipements nouveaux, ainsi que leur répercussion sur le fonctionnement du réseau, la solution suivante fut retenue : à l'achèvement d'un tronçon ou d'une liaison dans une station, une équipe du CEV télécommunications disposant de matériels adaptés procédait à des essais de réception avec traitement statistique de chaque voie de transmission, et les anomalies étaient traitées par les industriels. On possédait ainsi un document de référence pour les performances.

Quant au contrat d'installation à prix forfaitaires pour le réseau secondaire, il fut confié à CSF, et son exécution ne posa pas de problèmes particuliers.

L'installation des équipements de commutation fit l'objet de la troisième phase d'installation, une fois que la réalisation du réseau principal et du réseau secondaire eut avancé de manière significative.

AUTRES RESEAUX OU MATERIELS D'INFRASTRUCTURE

L'exposé sur le Réseau Air 70 peut donner au lecteur une fausse impression de succès permanent, tant il reste aux auteurs un peu de l'enthousiasme d'alors. Certes, les études menées l'ont été dans l'objectif concret de la production, pour bâtir un système dont le financement profitait de l'essor des années 1960-70. Il y eut toutefois des échecs ; on en donnera ici trois exemples.

La machine Violette

Un colonel de l'armée de l'Air eut l'idée de faire étudier une version électronique de la machine à chiffrer électromécanique OTAN appelée KL 7, elle-même dérivée de la célèbre Enigma allemande.

La KL 7 se présentait sous la forme d'un empilage de huit rotors mobiles autour d'un même axe. Chacun d'entre eux était un cylindre plat muni de 36 plots électriques d'entrée reliés à 36 plots de sortie. Chacun était solidaire d'un flasque³ cranté dont les dents, présentes ou absentes, représentaient des 0 ou des 1. Les caractères à chiffrer étaient injectés sur la première roue et ressortaient par la huitième, d'où ils étaient utilisés tels quels, à moins qu'ils ne soient réinjectés dans la machine. À chaque pas de chiffrement, les rotors tournaient d'un cran ou pas, selon une loi d'avance mécanique, justement déterminée par la présence ou non d'une dent sur le flasque associé à chaque rotor.

Mathématiquement, on voit que chaque rotor matérialisait une substitution d'ordre 36, soit un choix parmi 36 ! possibilités⁴. La structure d'une machine se construit par le choix de 8 rotors parmi les 36 ! possibles, ainsi que celui de 8 flasques parmi les 2³⁶ possibles. La mise à la clé – la position initiale de la machine – offre, pour sa part, le choix de l'ordre des rotors, celui des flasques retenus, ainsi que la position initiale des rotors et des flasques associés. C'est dire que l'étude de la sûreté de la machine est un régal pour les mathématiciens spécialistes, qui ont comme principal menu le groupe de substitution d'ordre 36 à décortiquer. Comme il se doit, ce groupe comporte des sous-groupes dont certains, très courts, qu'il serait imprudent de câbler, sauf à admettre pour la KL 7 des périodes de fonctionnement brèves et donc dangereuses.

Il était presque évident que la transposition électronique de la machine apporterait une grande souplesse et une liberté nouvelle de programmation, donc une puissance accrue. Il suffit de penser que la substitution câblée d'un rotor est remplacée par une suite quelconque des 36 premiers nombres, très aisément modifiable.

³ Pièce mécanique verticale servant de support.

⁴ $36! = 36 \times 35 \times 34 \times \dots \times 2 \times 1 \cong 10^{41}$.

Une maquette de cette première machine à chiffrer électronique fut donc développée. Elle montra la compatibilité effective avec la KL 7, en même temps que ses possibilités, donc sa supériorité sur la mécanique. Mais l'armée de Terre et la SEFT procédaient, de leur côté, à l'étude d'une machine spécifiquement électronique, issue des derniers développements en matière de cryptographie. Elle bénéficiait par ailleurs d'un lobbying puissant, et, en l'occurrence, justifié. Elle se nommait Myosotis, et elle gagna la bataille des fleurs.

Le réseau Radian

Quelqu'un s'avisa un jour du fait que le constat d'une attaque nucléaire n'était pas forcément évident. Ceux qui la subissaient n'étaient plus là pour le dire et les autres étaient peut-être un peu loin pour la constater sans erreur, et ce surtout dans le cas, pas invraisemblable du tout, d'une attaque ponctuelle du type « coup de semonce ».

D'où l'idée d'un réseau établi sur le territoire, réunissant les moyens de détection acoustiques, sismiques, électromagnétiques et optiques dans une gestion automatique des informations recueillies.

E4 fut chargé de la pré-étude sur ce projet et demanda des conseils à Émile Labin, célèbre radariste. Celui-ci nous apprit, entre autres leçons, à nous méfier des très faibles – ou très fortes – probabilités. Dans un tel système, la non-détection peut être « regrettable », mais la fausse alarme est une catastrophe. Aussi l'armée de l'Air avait-elle exigé, pour cette dernière, un taux incroyablement faible. É. Labin fit observer que cela devrait entraîner la prise en compte de phénomènes à l'échelle géologique, voire inconnus....

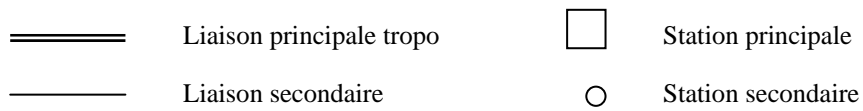
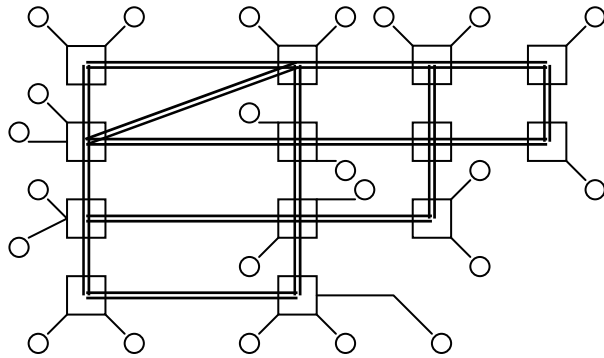
La pré-étude menée à bien ne déboucha pas, principalement en raison du coût du projet. Nous aurions pourtant disposé d'un réseau original et certainement performant en matière sismique et météorologique. Le CEA développa un réseau d'alerte indépendant.

La TPS (transmission par le sol)

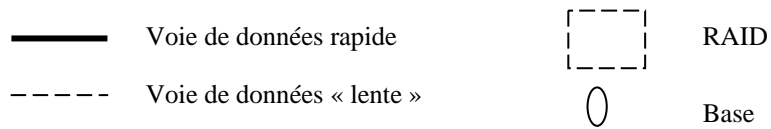
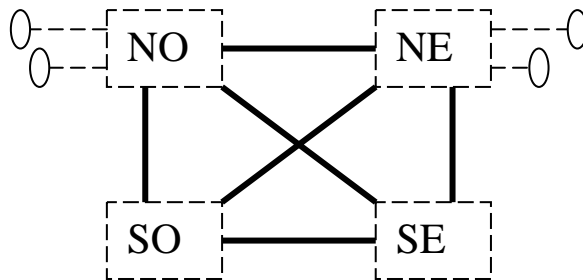
Il s'agit là de vieux souvenirs de la guerre de 1914... Certains croyaient possible d'utiliser en sous-sol le phénomène de *duct*⁵ utilisé en radio. Pourvu qu'il soit à très basse fréquence, le champ électromagnétique pourrait être, en partie, confiné entre les nappes phréatiques et le sous-sol profond (de température plus élevée). À partir de là, si la géologie est complaisante, on peut imaginer des liaisons quasiment invulnérables, avec des antennes formées de simples câbles d'acier. On s'intéressa beaucoup, un temps, au phénomène : ce fut le cas, en France, du professeur Gabillard. Puis on n'en parla plus, au moins officiellement.

⁵ Entre deux couches ionisées, l'énergie circule assez longtemps dans des sortes de conduits.

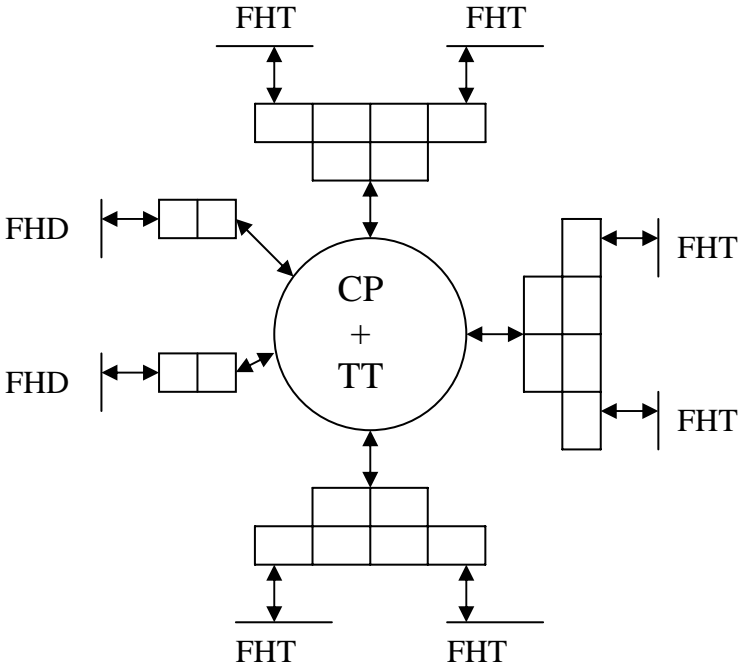
Réseau Air 70, graphe schématique



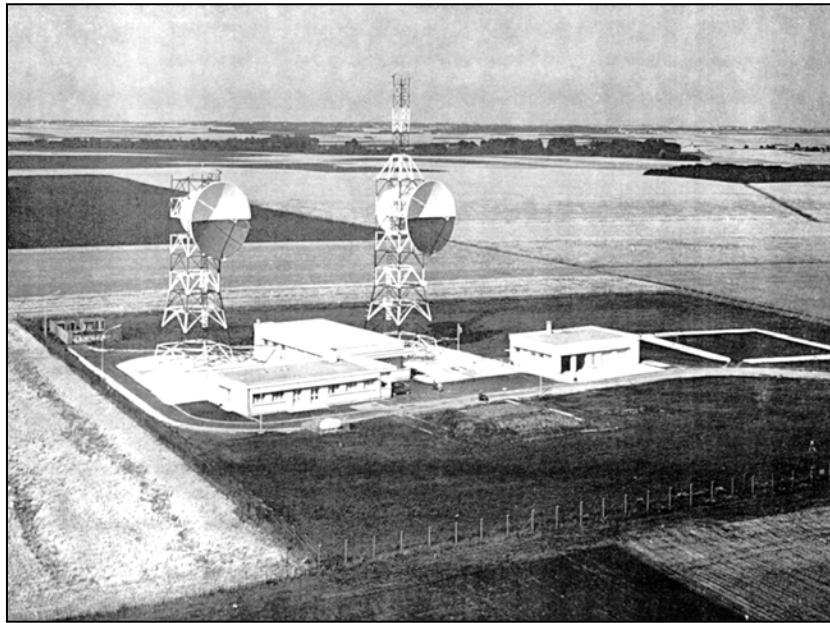
Les quatre relais automatiques d'information digitale (RAID),
qui utilisent les liaisons du réseau ci-dessus



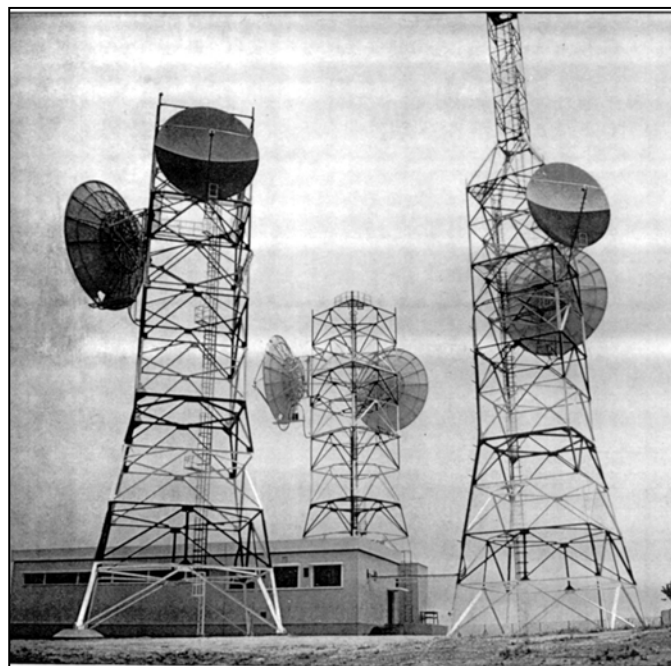
Station principale du réseau



- CP : commutateur principal
- TT : télésurveillance de la télésignalisation
- FHT : faisceau hertzien tropo : 2 antennes, 2 émetteurs, 4 récepteurs
- FHD : faisceau à vue directe : émetteurs et récepteurs doublés, une antenne



Vue aérienne d'une station principale



Station principale : bâtiment technique, pylônes et antennes

Illustrations tirées de *Le Réseau de transmission Air 70*, Éditions 2 B, 1968, pp. 90-91
(plaquette éditée par l'armée de l'Air et les industriels impliqués,
indiquant pour source des photographies : 2^e RA, CIT, CSF, SAT, Neveu).

CONCLUSION

par Michel Bergounioux et Jacques Clavier

Les acteurs de la construction de notre électronique professionnelle d'après-guerre ne furent certainement pas exceptionnels, même s'il peut être agréable de penser le contraire. Il est raisonnable de constater que ce furent des ingénieurs, officiers et techniciens normaux, auteurs de prouesses comme de fiascos, confrontés aux succès comme aux échecs.

Comment expliquer alors que la période en question reste synonyme de réussite évidente, dans les mémoires comme dans les témoignages ?

Sans doute les circonstances ont-elles réuni un ensemble de facteurs favorables, que l'histoire future aura la tâche difficile de prendre tous en compte.

Tout d'abord, quand la paix fut revenue, tout était à faire. L'industrie électronique professionnelle n'existait pratiquement pas, mais d'éminentes personnalités étaient de retour des États-Unis ou de Grande-Bretagne. Elles ont semé des germes de renouveau et apporté l'acquis de leurs travaux de guerre.

Ensuite, deux inventions majeures, comme on n'en trouve pas à chaque génération, firent irruption : le transistor et son cousin, le circuit intégré. Elles fondèrent l'informatique et les télécommunications modernes, en rupture totale avec le passé récent. Ainsi, il faut rappeler que tous les auteurs des présents fascicules ont fait leurs « manips » scolaires avec des tubes à vide et des machines électromagnétiques...

Par ailleurs, il s'est trouvé que la formation très mathématique des ingénieurs français (ceux issus de l'École Polytechnique, de Sup'aéro et de Sup'élec en particulier) s'adapte très bien aux exigences de l'électronique, qui demande logique, rigueur et précision. L'outil y « colle » parfaitement à l'objet, phénomène rare dans l'industrie. Le DVD est quantique, Maxwell se fait rigoureusement obéir dans les tubes radar, et Fourier règne en maître sur les signaux. Les « fanas » de théories peuvent – presque tous – se réjouir : ils sont servis.

De plus, l'« esprit aéronautique » nous a tous animés. Nous avons tous porté l'uniforme de l'armée de l'Air, nous avons tous été navigants, exigence naturelle de notre hiérarchie. Cela permet d'affronter quelques risques, d'apprendre l'équipe, ou plutôt l'équipage, où la compétence compte autant que les galons. Cela permet aussi de voir les choses « d'un peu haut ». C'est l'évidence, c'est même trivial, mais finalement très important, comme l'expérience de la mer l'est pour les marins.

Enfin, nous avons eu des chefs issus de la guerre, fonceurs, sachant distinguer le principal de l'accessoire, souvent pittoresques. Petit à petit, ils cédèrent la place à des jeunes plus normaux, directement issus des écoles, sérieux...

Ces éléments rassemblés expliquent peut-être le constat qui doit conclure cet ouvrage : en 1945, l'industrie électronique professionnelle française est pratiquement inexistante ; dans les années 1980, elle occupe le deuxième rang mondial.

SIGLES UTILISES

ACCS	<i>Air Command and Control System</i>
ACSI	<i>Air Command Systems International</i>
ADM	Service administratif
AEW	<i>Airborne Early Warning</i>
AFCAD	<i>Anglo-French Coopération for Air Defence</i>
AFCP	<i>Anglo-French Cooperation Projects</i>
AFVG	Avion franco-anglais à géométrie variable
AI	<i>Aircraft Interception</i>
AIA	Atelier industriel de l'aéronautique
ALAT	Aviation légère de l'armée de Terre
AMD	Avions Marcel Dassault
AME	Atelier de Montage de Electricque
AMP	Antennes moulées plastiques
AMTI	<i>Airborne Moving Target Indicator</i>
AN	Aéronautique navale
AOIP	Association d'ouvriers en instruments de précision
AR	Armement-reconnaissance
ARN	<i>Airborne Radio Navigation</i>
ASM	<i>Anti Sub-Marine</i>
ASV	Aircraft to Surface Vessel
AVI	Avionique générale et intégration
AWACS	<i>Airborne Warning and Control System</i>
BALTAC	Balise en <i>shelter</i> pour TACAN
BCRA	Bureau de coordination du Réseau Air 70
BFR	Basse fréquence de répétition
BLU	Bande latérale unique
BPM	Bureau des programmes de matériels
BWB	<i>Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung</i>
CAPAC	Calculateur arithmétique de poursuite, d'acquisition et de contrôle
CCITT	Comité consultatif international pour le téléphone et le télégraphe
CDC	<i>Control Data Company</i>
CDC	Compagnie des compteurs
CDTAT	Commandement des transmissions de l'armée de Terre
CEA	Commissariat à l'énergie atomique
CEAM	Centre d'expérimentations aériennes militaires de Mont-de-Marsan
CELAR	Centre d'électronique de l'armement
CEM	Champ électromagnétique
CENG	Centre d'études nucléaires de Grenoble
CEV	Centre d'essais en vol de Brétigny-sur-Orge
CFTH	Compagnie française Thomson Houston
CIT	Compagnie industrielle des télécommunications
CITGV	Circuits intégrés à très grande vitesse
CLM	Commission locale de modification
CNET	Centre national d'étude des télécommunications
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
COM	Communications

COMINT	<i>Communication Intelligence</i>
COPEP	Commission permanente de l'électronique du Plan
Coraline	Corrélation altimétrique et inertie
COTAL	Conduite de tir pour l'artillerie légère
CP	Commutateur principal
CS	Autocommutateur électronique secondaire
CSEE	Compagnie des signaux et entreprises électriques
CSF	Compagnie générale de télégraphie sans fil
CSR	Commandement, soutien et recueil de données
CTAA	Commandement des transmissions de l'armée de l'Air
CTG	Coordination technique gestion
DAC	Détection aéroportée-contre-mesures
DAR	Déclencheurs altimétriques radar
DAT	Défense aérienne du territoire
DCAé	Direction des constructions aéronautiques
DCC	Détection-commandement-contrôle
DEI	Direction de l'électronique et de l'informatique
DEL	Département électronique
DEM	détection aérienne électromagnétique
DERA	<i>Defence Evaluation and Research Agency</i>
DGA	Délégation générale pour l'armement
DGRST	Délégation générale à la recherche scientifique et technique
DIA	Direction de l'infrastructure de l'Air
DMA	Délégation ministérielle pour l'armement
DME	<i>Distance Measuring Equipment</i>
DRAM	<i>Digital Random Access Memory</i>
DRBI	Détection radar bâtiment interception
DRET	Direction des recherches, études et techniques d'armement
DRME	Direction des recherches et moyens d'essais
DTCA	Direction technique des constructions aéronautiques
DTEN	Direction technique des engins
DTI	Direction technique et industrielle
DTIA	Direction technique et industrielle de l'aéronautique
DVD	<i>Digital Versatile Disc</i>
E/R	Émetteur-récepteur
EDF	Électricité de France
EEF	Élimination d'échos fixes
ELECMA	Division électronique de la SNECMA
ELINT	<i>Electronic Intelligence</i>
EMAA	État-major de l'armée de l'Air
EMAC	Essais et évaluations des matériels et composants électroniques
EMAT	État-major de l'armée de Terre
EMD	Électronique Marcel Dassault
ENSA	École nationale supérieure de l'aéronautique
ENST	École nationale supérieure des télécoms
ENSTA	École nationale supérieure des techniques avancées
EPF	École Polytechnique féminine
ESD	Électronique Serge Dassault
FAA	<i>Federal Aviation Agency</i>
FERISOL	Fer isolé

FET	<i>Field Effect Transistors</i>
FH	Faisceau hertzien
FHD	Faisceau à vue directe
FHT	Faisceau hertzien tropo
FIEC	Fédération des industries électroniques de communication
FLORAKO	acronyme allemand regroupant : remplacement des radars du système Florida ; système de communications ; système de présentation de la situation aérienne ; système d'acquisition des renseignements aériens
FMICW	<i>Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave</i>
FNS	Force nucléaire stratégique
GAMD	Générale Aéronautique Marcel Dassault
GCA	<i>Ground Control Approach</i>
GEC	<i>General Electric Company</i>
GETIS	<i>Ground Environment Team of International Staff</i>
GICI	Groupe interministériel sur les circuits intégrés
GIFAS	Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales
HF	Haute fréquence
HFR	Haute fréquence de récurrence
HPR	<i>High Power Radar</i>
IA	Ingénieur de l'armement
IBM	<i>International Business Machines</i>
IC	Ingénieur en chef
ICA	Ingénieur en chef de l'armement
IFF	<i>Identification Friend and Foe</i>
IG	Ingénieur général
IGA	Ingénieur général de l'armement
IGESUCO	<i>Infrastructure Ground Environment Sub-Comittee</i>
ILS	<i>Instrument Landing System</i>
IM	Ingénieur militaire
IMA	Ingénieur militaire de l'Air
IP	Ingénieur principal
IPA	Ingénieur principal de l'armement
ITT	<i>International Telegraph & Telephone</i>
LCC	Le Condensateur Céramique
LCT	Laboratoire central des télécommunications
LDTR	<i>Long Dwell Time Radar</i>
LE	Laboratoires d'essais
LETI	Laboratoire d'électronique, de technologie et d'instrumentation
LLMT	Laboratoire LMT
LMT	Le matériel téléphonique
LR	Laboratoires radioélectriques
LTT	Lignes télégraphiques et téléphoniques
MF	Moyenne fréquence
MFR	Moyenne fréquence de répétition
MILTAC	Micro-TACAN
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MOS	<i>Metal Oxyd Semiconductor</i>

MPR	<i>Medium Power Radar</i>
MRCAs	<i>Multirole Combat Aircraft</i>
MSBS	Mer-sol balistique stratégique
MTI	<i>Moving Target Indicator</i>
MWDDEA	<i>Mutual Weapon Development Data Exchange Agreement</i>
MWDP	<i>Mutual Weapon Development Program</i>
NADGE	<i>Nato Air Defence Ground Environment</i>
OACI	Organisation de l'aviation civile internationale
ODEM	Opérateur de détection électromagnétique
OMERA	Société d'optique, mécanique, électricité, radio pour l'aéronautique
ONERA	Office national d'études et de recherches aéronautiques
ORTF	Office de radiodiffusion et télévision françaises
OTAN	Organisation du traité de l'Atlantique Nord
PACEO	Plan d'action pour les circuits intégrés et l'optoélectronique
PACIM	Plan d'action pour les circuits intégrés modulaires
PAM	Pacte d'assistance militaire
PAR	<i>Precision Approach Radar</i>
PARCA	Projectile autopropulsé radioguidé contre avions
PDG	Président directeur général
PM	Bureau personnel militaire
PME	Petites et moyennes entreprises
PPI	<i>Plan Position Indicator</i>
PPM	Plan pour la microélectronique
PPRE	Plans pluriannuels des recherches et études
PTT	Postes, télégraphe, téléphone
RA 70	Réseau Air 70
RACAAS	Radar aéroporté de combat aérien et appui sol
RADAR	<i>Radio Detection And Ranging</i>
RAID	Relais automatiques d'information digitale
RAMOLO	Radar mobile lourd
RARDE	<i>Royal Aeronautics Research and Development Establishment</i>
RBE 2	Radar à balayage électronique deux plans
RDI	Radar doppler à impulsions
RDM	Radar doppler multifonctions
REAL	Bureau réalisation
RER	Rechanges et réparations
RFA	République fédérale allemande
RITA	Réseau intégré de transmission automatique
RPC	Recherches physico-chimiques
RRE	<i>Royal Radar Establishment</i>
RTD	Réseau en temps différé
RTR	Réseau en temps réel
SACM	Société alsacienne de construction mécanique
SADTC	<i>SHAPE Air Defence Technical Center</i>
SAFARE	Société anonyme de fabrication et d'applications pour la radio et l'électronique
SARAM	Société d'applications radio pour l'aviation et la Marine
SAW	<i>Surface Acoustic Waves</i>

SC/Aéro	Service central de l'aéronautique
SCCOA	Système de commandement et de contrôle des opérations aériennes
SCPM	Service central de la production, des prix et de la maintenance
SCTI	Service central des télécommunications et de l'informatique
SDA	Système de détection aéroporté
SECRE	Société d'études et de constructions électroniques
SEFT	Section d'études et fabrications des télécommunications
SEP	Section études prototypes
SER	Section études radar
SERL	<i>Signal and Electronic Research Laboratory</i>
SET	Section études télécommunications
SFENA	Société française d'équipements pour la navigation aérienne
SFIM	Société de fabrication d'instruments de mesure
SFR	Société française de radioélectricité
SHAPE	<i>Supreme Headquarter Allied Powers in Europe</i>
SI	Service intérieur
SIAR	Surveillance industrielle de l'armement
SIB	Section installations à bord
SIGINT	<i>Signal Intelligence</i>
SINTRA	Société industrielle des nouvelles techniques radioélectriques
SIT	Section installations à terre
SLC	Services locaux constructeurs
SMG	Service moyens généraux
SNCASO	Société nationale de constructions aéronautiques du Sud-Ouest
SNECMA	Société nationale d'études et de constructions de moteurs d'avions
SP	Section production
SPAé	Service de la production aéronautique
SRE	<i>Search Radar Equipment</i>
SRE	Section recherches essais
SRU	Section recette en usine
SSBS	Sol-sol balistique stratégique
STAé	Service technique aéronautique
STCAN	Service technique des constructions et armes navales
STEI	Service technique de l'électronique et de l'informatique
STET	Service technique des engins tactiques
STNA	Service technique de la navigation aérienne
STPA	Service technique des programmes aéronautiques
STRIDA	Système de transmission et de représentation des informations de défense aérienne
STTA	Service technique des télécommunications de l'Air
STTE	Service technique des télécommunications et des équipements de l'aéronautique
STTM	Service technique des transmissions de la Marine
Sup'aéro	Ecole nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace
Sup'élec	École supérieure d'électricité
TACAN	<i>Tactical Air Navigation</i>
TERCOM	<i>Terrain Contour and Matching</i>
TI	Texas Instruments
TPO	Tube à propagation d'onde
TPS	Transmission par le sol
TRAP	Transmission / réception aéroporté
TRT	Télécommunications radioélectriques et téléphoniques

TT	Télésurveillance de la télésignalisation
UHF	<i>Ultra High Frequencies</i>
URSS	Union des républiques socialistes soviétiques
VHF	<i>Very High Frequencies</i>
VHSIC	<i>Very High Speed Integrated Circuits</i>
VLSI	<i>Very Large Scale Integration</i>
VOR	<i>VHF Ominidirectional Range</i>

INDEX DES NOMS DE PERSONNES

Adamsbaum, André	49	Coignet	53
Alberge	35	Coligny (de), Marie-Guerric	26, 46, 47
Alfandari, Roger	52	Colonna, Marc	28
Allègre, Maurice	35	Conze, Henri	35
Altovsky, V. A.	43	Cordelle	34
Amann, Jacques	53	Crémieux, Alain	27
Ameil, Xavier	25	Cray, Seymour	49
Assens, Paul	48	Cuny, Jean	70
Assimon, Marcel	51	Dabas, Régis	28
Audran, René	50	Dages	113
Babin	18	Danton, Jean	54
Balkansky	34	Danzin, André	25, 34, 112
Barraqué	18	Daugny, Bertrand	28
Barré, Pierre	65, 82	Dautremont	94
Battesti	112	Daveau	49
Beignot-Devalmont	28	David, Pierre	41
Benoit, Dick	112	Debart	49
Bergounioux, Michel	15	Degas	53
Berline, Sylvain	42	Delahaye	51
Bertrais, Jean	18, 26, 28, 29, 32-34, 38	Delapalme, Bertrand	88
Bloch, René	95	Deloraine, E.-M.	42, 43
Bœuf	111	Derbesse	18, 116
Boithias	112	Derveaux, R.	43
Boole	12	Dieulesaint, Eugène	57
Boudeville	112	Dondoux, Jacques	112
Boudigues	33	Dontot	112
Bouix, Maurice	44	Dreyfus	25
Boulin	112	Dubourg	93
Bousquet, Georges	82	Duboz	111
Bousquet, Jacques	82, 99	Dumas	26
Bouyssonnie	112	Dummer, G. W.	32
Brénac	111, 116	Epsztein, Bernard	45
Brûlé, Jean-Pierre	50, 51	Ferrié	28
Brue	112	Flourens, André	47
Busignies, Henri	42	Ford	53
Carlier, Robert	18, 87, 88, 109	Fouché, Yvon	49
Carpentier, Michel-Henri	17, 25, 28, 41, 47-50, 53, 54, 56	Fouilliant, Maurice	26, 28
Cauvin, Gérald	56	Fourastier	113
Cazenave	15	Fourier	48, 78, 125
Chabrol, Maurice	48	Fraysse, Robert	113, 116
Chambeau, Louis	46, 51, 53	Fromageot	112
Chappe, Claude	9	Fyssen-zidis, dit Fyssen	43, 88
Chappey, Marc	35	Gabillard	119
Chavance	112	Gadelle, Félix	28
Chiron, Bernard	25	Galley, Roger	35
Clavier, Jacques	9, 17, 109, 115	Gery	113
Clément, Alex	43	Givaudon	35
		Griset	34
		Grosvallet	29, 38

Grumberg	34	Moreau, Jean	51
Guenard, Pierre	25, 27, 45	Morillon	113
Gutton, Henri	42	Mouffock	113
Halliday	53, 54	Naday, G.	43, 48
Henry	115	Naves	25
Hervé	26	Néel	34
Hognon	18	Niquil	113
Houston	52	Parce	112
Hugounenq	115	Paufichet, Jacques	46, 51, 53, 54
Hülfsmeyer, Christian	41	Peltier	26
Iltis	112	Pénin, Francis	1, 18, 28, 46, 99, 113
Javelot	35	Peres	48
Jodelet	91	Pérot, Gilbert	46, 48, 49, 53, 54, 99, 113
Jullierat	27	Peyssoix	26, 37
Klippel (de)	52	Picquendar, Jean-Edgar	25, 47
Kniazeff	43, 88	Pilatre-Jacquin	18
Knudsen	113	Piolet	112
Kreder	28	Ponte	112
Krönert	49	Raison	20, 81
Labarre	112	Regnaut	20
Labin, Émile	41-43, 103, 119	Ridenour, Louis N.	44
Larkin	32	Rieux	35
Lagorse	30	Robinson, C. V.	45
Le Menestrel	112	Rostas, E.	43
Lebedenski	112	Rouquette	117
Leclerc	29	Rousselot	52, 56
Lehmann, Gérard	41	Saint-Esprit (M ^{me} de)	34
Léonetti, Roger	18, 69, 75	Saudreau	49
Lévy	112	Scheller, Michel	31, 113
Liger	112	Shockley, Bill	38, 51
Loizillon	88	Simon	52
Long	113	Sirel, Michel	48
Maillard, Jean-René	28	Stark, H.	41
Maillard	25	Stern, Jacques	51, 55
Malavard	48	Sueur	112
Manconi	113	Swobada	25, 27
Manière	112	Teszner, Jean-Louis	35
Margier, Gilbert	35	Thomas	56
Martre, Henri	85	Thomson	52
Marzin	112	Thourel	28
Mattern	35	Tien Chi	26
Maxwell	12, 125	Tritant	113
Ménager	112	Vasseur, J.-P.	25-27
Merle	92	Villard, Pierre	50
Métivier, Robert	25, 47, 48	Vincelet	53
Meyniel	112	Vitry	113
Miller, Marwin	32	Voge	112
Mitchell	33	Warnecke	25, 36
Moisson-Franckausser, André	43	Watts, Watson	41
Môme	112	Wessel, Peter	103
Mondon, Pierre	51	Wilson	73

INDEX DES SOCIETES

ACSI	57	Fairchild	51
AEI	52, 53	FERISOL	103, 105
AERO	75, 80, 103	Ferranti	68, 71
Aérospatiale	69	GAMD	70, 71, 103
Airbus	96	GEC	52, 68, 78
Air-Équipement	69, 93	GeCo	30
Alcatel	37, 115	General Dynamics	105
Alsthom	115	General Electric	48, 56, 68, 77
AMD	75, 79, 80, 82, 84, 92	Hazeltine	56, 57
AME	89	Hughes Aircraft	52, 56, 68, 77
AMP	84	IBM	50, 51, 53, 55, 56
Andersen	56, 57	Intel	35
AOIP	115	ITT	94, 95, 112
Autonetics	68	LCC	26
Bendix	69, 95	LCT	31, 43, 69
Bezu	93	LMT	41-44, 89, 90, 95
Boeing	22, 96	Lockheed	68
Bronzavia	92	LR	88, 89, 92
British Thomson-Houston	52	LTT	25, 26, 30, 34, 112, 155
CDC	43	Marconi	52, 53, 68, 78, 95, 110
CFTH	43, 52, 68, 70, 71, 75, 103- 105, 112, 115	Matra	53
Chemring	103	Motorola	33, 35, 112
CIT	90, 112, 115	Nord-Aviation	101
Collins	89, 90, 94, 112	Northrop-Grumman	57
COTELEC	68	OMERA	69, 92
CSEE	117	Philips	33
CSF	17, 25, 27-38, 42-46, 48-50, 53, 66, 68-72, 74-76, 78, 79, 93-96, 103- 105, 112, 115, 117, 118	Radant	84, 85
Decca	95	Radio Air	90, 95
Derveaux	43, 68	Radio-Industrie	25, 41, 43-47, 51, 91
EADS	69	Radio Laboratoire Jaubert	91
ELECMA	91, 103, 105	Radiotechnique	25, 33, 34
EMD	28, 68, 71, 74, 76, 79, 85, 95, 103-105	Rally	91
EMI	68	Raytheon	45, 57
Elliott	68	RCA	30, 112
Emerson	68	SACM	49, 115
Ericson	68	Sadir-Carpentier	41, 43, 89, 91, 93
ESD	71, 74, 75, 85	SAF	91
		SAFARE	91
		SAGEM	112
		SARAM	92, 93
		SAT	112, 115, 117

SDS	112	STM	30
SECRE	43, 44, 91	Sud-Aviation	69
SEL	95	Teldix	95
SESA	75, 80	Telefunken	32, 56
SESCO	30, 31	Télérad	91
SFENA	75	Texas Instruments	30, 33, 38, 68, 78, 94
SFIM	91	Thomson	25, 26, 29-31, 33-36, 44, 47- 51, 53-57, 78, 89, 91, 94, 116, 117
SFR	25, 43, 44, 70, 89, 93, 94, 96	Thomson-CSF	36, 38, 41, 43, 57, 69, 82-85
Siemens	32	TRT	69, 76, 89, 93, 96, 103, 112, 115, 117
SILEC	26	UTA	80
SINTRA	43-45, 50, 51, 88	Varian	78, 115
SNCASO	69, 70	Warnecke Inc.	36
SNE	47	Westinghouse	48, 68, 77, 115
SNECMA	91, 103		
SNERI	44, 47-49, 51		
SNIAS	69		
SOCRAT	92-94		
STAREC	91, 103		
STERA	91		

