

Comité pour l'histoire de l'armement
Association Guerrelec
Centre d'études d'histoire de la Défense

LA GUERRE ÉLECTRONIQUE EN FRANCE AU XX^e SIÈCLE

Actes du colloque organisé le 20 avril 2000,
à l'École militaire

*Le Département d'histoire de l'armement tient à dédier
ces actes à la mémoire du général Siffre.*

Le présent colloque a été préparé en 1999, avec le soutien de l'association Guerrelec et du Centre d'études d'histoire de la Défense, par un Comité comprenant l'IGA Paul Assens, le général Jean Augier, l'IGA Geoffroy d'Aumale, l'ICA Bruno Berthet, l'IGA Jean Margier, le général Jean-Pierre Moller, le général Jean-Paul Siffre (†) et le professeur Maurice Vaïsse. Il a été organisé par le Comité pour l'histoire de l'armement (CHARME), alors présidé par Maurice Magnien (†), et en particulier par sa secrétaire scientifique, Anne Rasmussen, et par le chef du département d'histoire de l'armement du Centre des hautes études de l'armement (CHEAr), l'IGA Alain Crémieux. Que l'IGA Gérard La Rosa, alors directeur du CHEAr, soit également remercié pour son soutien.

La mise en forme des actes a été assurée successivement par Anne Rasmussen, par l'équipe du Centre d'études d'histoire de la Défense, puis par Claire Lemerrier (nouvelle secrétaire scientifique du CHARME). Les propos tenus n'engagent que leurs auteurs.

Sommaire

INTRODUCTION

Geoffroy d'AUMALE p. 5

LES DÉBUTS DE LA GUERRE ÉLECTRONIQUE FRANÇAISE

La conquête du spectre des fréquences électromagnétiques et son
utilisation en guerre électronique..... p. 9
Jean-Paul SIFFRE

La guerre électronique en 1914-1918 : deux faits marquantsp.15
Louis RIBADEAU-DUMAS

Applications navales de la radiogoniométrie en France entre les
deux guerresp.19
Philippe WODKA-GALLIEN

La protection contre le brouillage ennemi des systèmes de
télécommande de la Marine française durant l'entre-deux-guerres
..... p. 25
Sébastien SOUBIRAN

Le développement des radiogoniomètres instantanés et des
brouilleurs radars avant et pendant la Deuxième Guerre mondiale
..... p. 43
Gérard LEHMANN

Les antennes Caroline et les détecteurs de radars
BD1/ARBR/ARAR/ARUR p. 47
Bernard DELAPALME

LA GUERRE ÉLECTRONIQUE FACE AUX NOUVELLES MENACES

La guerre électronique dans les unités aériennes de combat de
l'armée de l'Air, 1950-1980 p. 73
Michel FORGET

La mise en service et la prise en compte des contre-mesures ayant
équipé les forces de combat de l'armée de l'Air, 1976-1993 p. 83
André CARBON

La recherche en guerre électronique et ses retombées depuis 1960
..... p. 97
Pierre BARATAULT

Les activités de guerre électronique dans l'armement terrestre
dans les années 1960 p. 117
Paul ASSENS

Historique du projet EGIDE : bilan des études préparatoires ... p. 135
Jean-Pierre MOLLER

La guerre électronique dans la Marine française, 1960-1976 ... p. 143
Gilbert MARGIER

CONCLUSIONS

La guerre de l'information p. 151
Jean-Paul GILLYBOEUF

INTRODUCTION

Geoffroy D'AUMALE

« Chacun a ses raisons d'être aujourd'hui parmi nous, que nul autre n'est en droit de connaître ». En revanche, il est dans mon rôle de vous expliquer les raisons qui ont animé le Comité.

Elles sont de trois ordres :

- Développer la connaissance historique. L'histoire française de la guerre électronique n'a pas été écrite. Peu de thésards d'histoire de la Défense retiennent le domaine du renseignement comme sujet, encore moins l'histoire du renseignement d'origine technique. Pourtant, que de belles histoires à découvrir ! D'un côté, quelques professionnels de l'histoire décryptent le passé en s'appuyant sur des archives, pas toujours faciles à débusquer. De l'autre, l'histoire récente est encore dans la tête d'un certain nombre de responsables. Les rassembler peut profiter aux deux parties. Je salue à cette occasion la présence du professeur Gérard Lehmann qui, malgré ses 91 ans, nous fait l'honneur d'être parmi nous.
- Faire connaître les concepts de la discipline. Ceux-ci ont une permanence qui anticipe et dépasse les progrès techniques. Plus les généraux et les étudiants – vous excuserez l'amalgame – deviennent perméables à ces concepts, plus l'avenir se révèle prometteur. Les généraux approuveront les budgets et les opérations. Les étudiants entreront dans les services, puis prendront du galon.
- Encourager la fierté nationale. La France, ses officiers et ses ingénieurs ont des raisons d'être fiers de ce pan de leur histoire. Il est temps qu'ils s'en rendent compte, même si d'autres nations ou d'autres groupes d'intérêts ne les encouragent pas dans cette voie.

La méthode retenue

Le Comité a été constitué par cooptation représentative du milieu. Nous regrettons seulement que les officiers de Marine n'aient pas pu nous rejoindre à temps.

Il a retenu l'appel à communication comme moyen de recueillir des interventions ; cet appel a été émis en octobre 1999. Les interventions ont été sélectionnées en fonction de critères objectifs : pertinence du sujet, qualité du résumé et respect des dates.

Il nous a fallu réunir historiens et anciens responsables et, à cette occasion, gérer des conflits de méthode. Il a fallu également faire attention aux limites imposées par la classification des informations.

Remerciements

Je remercie les trois organismes qui ont apporté leur soutien à l'idée de cette journée :

- le chapitre Lafayette des *Old Crows* (présidé par l'ingénieur en chef Berthet), qui est le principal point de rencontre de la profession ;
- le Centre d'études d'histoire de la Défense (CEHD), dirigé par le professeur Maurice Vaïsse, qui, par ses publications, ses colloques et l'encouragement des doctorants, fait progresser la connaissance historique de la Défense ;
- le Département d'histoire du Centre des hautes études de l'armement, dirigé par l'ingénieur général Crémieux, qui, par son dynamisme, nous a permis de nous réunir aujourd'hui. En particulier, je remercie Anne Rasmussen et Christine Gouriellec qui, dans l'ombre des couloirs de l'École Militaire, ont joué un rôle majeur dans la préparation de cette journée.

LES DÉBUTS
DE LA GUERRE ÉLECTRONIQUE
FRANÇAISE

LA CONQUÊTE DU SPECTRE DES FRÉQUENCES ÉLECTROMAGNÉTIQUES ET SON UTILISATION EN GUERRE ÉLECTRONIQUE

Jean-Paul SIFFRE

Rappels sur la découverte du spectre des fréquences électromagnétiques

Le spectre des fréquences électromagnétiques est connu depuis toujours dans sa partie visible, qui constitue l'arc-en-ciel. C'est il y a environ deux cents ans que l'on découvrit que l'arc-en-ciel continuait au-delà du rouge par l'infrarouge, et au-delà du violet par l'ultraviolet.

Infrarouge	Lumière visible : rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet	Ultraviolet
------------	---	-------------

Dans la seconde moitié du XIX^e siècle, Maxwell élaborait la théorie des ondes électromagnétiques, plus tard mises en évidence par Hertz (ondes hertziennes), avant que les rayons X et les rayons γ ne soient découverts à leur tour.

Ondes hertziennes	Infrarouge	Visible	Ultraviolet	X	γ
-------------------	------------	---------	-------------	---	----------

La conquête du spectre des fréquences électromagnétiques

Après avoir été découvertes, les ondes électromagnétiques ont été étudiées, puis exploitées pour répondre aux besoins de la civilisation moderne. Devenues une richesse, elles ont été défendues par leurs propriétaires au même titre que les autres richesses nationales (le territoire, l'eau, le sous-sol, l'espace aérien, etc.). La naissance de la guerre électronique correspond aux débuts de l'utilisation des ondes électromagnétiques.

Pour toutes les gammes d'ondes électromagnétiques, le processus qui conduit de la découverte à l'exploitation est toujours le même. Tout d'abord, les scientifiques découvrent les nouvelles fréquences, puis les techniciens développent les composants électroniques qui permettent de construire des équipements émetteurs ou récepteurs adaptés à ces fréquences. Ensuite, parfois dans le secret des programmes militaires, on utilise les nouvelles ondes, qui entrent dans les mœurs soit sous le nom de leur longueur d'onde (comme les ondes millimétriques), soit sous celui de leur fréquence (comme les ondes haute fréquence, la HF dans le langage courant).

Le tableau qui suit indique les dates d'utilisation des ondes électromagnétiques dans un but militaire, sous une forme forcément très approximative, car il s'écoule souvent de longues périodes entre les toutes premières utilisations et la mise en service d'équipements opérationnels dotés de capacités significatives.

Les abréviations des unités de longueur utilisées dans ce tableau font référence aux longueurs d'onde des ondes électromagnétiques correspondantes. Les abréviations IR1 et IR2 signifient respectivement : infrarouge proche de la lumière visible et infrarouge éloigné de la lumière visible.

Date	Le spectre des fréquences (ou des ondes) électromagnétiques									
	hm	m	cm	mm	IR2	IR1	visible	UV	X	γ
1900	OUI						OUI			
1910	OUI						OUI			
1920	OUI	OUI					OUI			
1930	OUI	OUI					OUI			
1940	OUI	OUI	OUI				OUI	OUI		
1950	OUI	OUI	OUI				OUI	OUI		
1960	OUI	OUI	OUI		OUI	OUI	OUI			
1970	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI			
1980	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI		
1990	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI		
2000	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	?	
2010	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	?	?

Utilisation du spectre des fréquences électromagnétiques

La première utilisation des ondes électromagnétiques remonte à peu près à 1900, pour la transmission de messages. C'était la télégraphie sans fil (TSF) car, à l'époque, on ne savait pas encore transmettre directement la parole au moyen des ondes électromagnétiques.

Très vite, les fonctions des équipements utilisant les ondes électromagnétiques ont été de plus en plus variées, pour répondre aux besoins exprimés par les civils ou par les militaires.

Les dates ci-dessous correspondent approximativement aux dates d'utilisation opérationnelle des ondes électromagnétiques pour de nouvelles fonctions : chacune d'entre elles a des applications militaires très importantes.

1900	1910	1920	1930	1940
Communiquer	Localiser	Naviguer	Détecter	Identifier

Les fonctions de détection des émissions par des services autres que les destinataires, ainsi que celles de brouillage, sont apparues avec les premiers postes de TSF.

Pour une exploitation harmonieuse du spectre des fréquences électromagnétiques, des réglementations internationales ont été élaborées. Pour faire respecter ces règlements, il faut une force de police du spectre électromagnétique. La guerre électronique a de ce fait une composante juridique, nationale et internationale. Sur réquisition de la justice, les forces de l'ordre peuvent dresser procès-verbal contre les utilisateurs du spectre électromagnétique qui ne respectent pas les réglementations, et / ou saisir les équipements qui ne sont pas conformes aux règlements de normalisation.

*Le spectre des fréquences électromagnétiques,
champ de bataille de la guerre électronique*

Aujourd'hui, la partie du spectre électromagnétique utilisée dans le cadre de la guerre électronique (GE) va des ondes hertziennes aux ultraviolets pour des missions d'écoute, de brouillage et de protection contre les écoutes et contre le brouillage. Si la définition de la GE n'est pas normalisée, les définitions les plus usuelles sont résumées par la formule suivante :

$$GE = \text{écoutes} + \text{brouillage} + \text{protection} + (\text{destruction})$$

Depuis sa naissance aux environs de 1900, la GE peut aboutir à la destruction « indirecte » des cibles, car les informations recueillies par les « écoutes » peuvent permettre de diriger des bombardements sur le bon objectif, au bon moment. Depuis les années 1980, la destruction obtenue par les moyens GE peut également être « douce » (c'est-à-dire concerner les capteurs). Depuis les années 1990, elle peut être « dure » (c'est-à-dire engendrer la destruction physique de l'objectif). L'utilisation par la guerre électronique des rayons X et des rayons γ devrait développer ses capacités de destruction directe.

Depuis le début du siècle a eu lieu une progression très importante de la GE, illustrée par l'évolution du vocabulaire (on est passé des interférences et de la radiogoniométrie aux brouillages et à la destruction) et par le fait que la GE n'intéressait, il y a cent ans, que les diplomates et les états-majors, alors qu'elle concerne aujourd'hui tout le monde (les civils et les militaires, les ministres et les simples citoyens, avec leurs téléphones mobiles par exemple). La GE touche la vie économique et la vie privée. Elle est devenue une affaire interministérielle.

La progression est également très nette si l'on considère la forme des affrontements électroniques, qui sont passés des combats à la guerre totale :

- combat entre équipements (interférences, radiogoniométrie) ;
- batailles entre forces pour maîtriser le spectre avant une offensive ;
- guerre ;
- guerre totale dès le temps de paix.

Les anciens disaient déjà :

« *Si vis pacem, para bellum electronicum* ».

LA GUERRE ÉLECTRONIQUE EN 1914-1918 : DEUX FAITS MARQUANTS

Louis RIBADEAU-DUMAS

Avant 1914, aucun des futurs belligérants n'avait de projet de guerre électronique. Seuls étaient envisagés les écoutes, l'interception des messages et leur décryptage.

Dans l'organisation des transmissions en France, en 1914, deux noms se détachent. D'abord celui du commandant Ferrié, responsable, avec le succès que l'on sait, depuis 1899, de la conception et de la réalisation des matériels de TSF, de leur expérimentation (notamment au Maroc en 1908) et du fonctionnement technique des stations principales de la tour Eiffel.

Le commandant Cartier, comme Ferrié, avait été (en 1900) affecté au Mont-Valérien, où il commanda une compagnie de sapeurs télégraphistes du 24^e bataillon du Génie, devenu plus tard le 8^e régiment du Génie, puis le 8^e régiment de Transmissions. Mais il était aussi, depuis cette date, secrétaire de la Commission de cryptographie militaire, et devint, en 1912, le chef de la section chiffre du ministère de la Guerre, nouvellement créée.

Il avait été chargé auparavant, en 1911, de confectionner les systèmes de chiffrement des liaisons par TSF avec la Russie et l'Angleterre, et de superviser leur fonctionnement. Des chiffreurs, comme le général Givierge, lui ont d'ailleurs reproché d'être plus transmetteur que chiffreur !

Déjà, alors qu'il était (avant 1912) affecté au 2^e bureau, il avait obtenu que l'on fasse des écoutes sur les liaisons allemandes, italiennes, etc. La section du chiffre avait notamment pour mission de chiffrer et de déchiffrer les télégrammes et de les acheminer

vers leurs destinataires. Elle jouait donc le rôle de centre de transmissions, rôle qui fut élargi par la création au sein de la section d'un « bureau central de TSF » ayant le rôle de chef de réseau, nécessaire après la mise en place de stations dans les places fortes (Belfort, Épinal, Maubeuge, Toul, Verdun).

Au début de la guerre, le trafic était naturellement très faible, et Cartier donna l'ordre aux stations d'intercepter les émissions allemandes, au bureau central d'analyser ce trafic et à son élément de recherche de décrypter. Dès le 11 ou 12 août 1914, les réseaux allemands furent reconstitués, et les correspondances entre indicatifs, fréquences et états-majors établies. Cela permit à Cartier de donner à cette date au GQG un organigramme des armées, corps et divisions de cavalerie allemands (à l'exception de la 1^{re} armée de von Kluck, qui n'était pas encore engagée).

Mais quelqu'un avait remarqué que les niveaux de réception n'étaient pas les mêmes dans toutes les stations, en raison de la propagation en onde de sol des ondes longues utilisées. Ces différences d'intensité de réception permirent de localiser approximativement les émetteurs et de suivre la progression des PC des armées allemandes. C'est pourquoi Cartier put indiquer, au début de septembre, l'infléchissement des 1^{re} et 2^e armées allemandes vers le sud-est, mouvement vérifié ensuite par d'autres sources, notamment le lendemain grâce aux reconnaissances aériennes.

Un autre exemple de guerre électronique concerne les raids des Zeppelin sur la France et l'Angleterre. On disposait alors, dans ces deux pays, de chaînes radiogoniométriques, depuis 1915 seulement pour la France. Ferrié s'était en effet opposé, avant la guerre, à l'achat d'appareils Marconi, et la section technique du Génie, chargée d'expérimenter deux radiogoniomètres Bellini-Tosi achetés en 1914, les avait longtemps gardés en caisse.

Les écoutes permirent de relever les caractéristiques propres à ces raids : d'abord, avant leur départ, les Zeppelin essayaient leurs postes de TSF, dont la note particulière donnait l'éveil et permettait d'alerter les moyens de protection, « saucisses » et

chasse. Ensuite, les Zeppelin se dirigeaient au moyen de relevés goniométriques : aussi bien en France qu'en Angleterre, ces liaisons furent brouillées avec succès.

Certains disent même qu'ayant remonté le système de chiffrement correspondant, on put envoyer de faux messages pour les égarer. Quoi qu'il en soit, les brouillages rendaient leur retour très difficile, et on s'aperçut qu'ils utilisaient pour se repérer la station de la tour Eiffel. Au cours du raid du 19 octobre 1917, Ferrié arrêta le fonctionnement de cette station et la remplaça par Lyon-La-Doua, dont l'équipement était identique. Un Zeppelin finit sa course près de Sisteron et un autre se perdit en Méditerranée ; peut-être avait-il été entraîné par le mistral ! Je n'ai pas trouvé d'autres exemples français de guerre électronique en 1914-1918.

En revanche, les interceptions et la goniométrie jouèrent un rôle important dans les opérations navales des Britanniques. En décembre 1914, la sortie de la Marine allemande vers les côtes Est de l'Angleterre fut détectée, mais le mauvais temps, la nuit, l'imprécision des relevés goniométriques et des positions firent échouer les essais d'interception.

Lors de la bataille du Jutland, l'interception, le 30 mai 1916, d'un signal d'opérations permit d'alerter la grande flotte de Jellicoe, quoique les Allemands eussent pris la précaution d'échanger les indicatifs de leur amiral et d'une station à terre.

Le 31 mai, les erreurs de position (notamment de l'avant-garde de Beatty) et l'imprécision des relevés goniométriques ne permirent pas la grande bataille espérée. À 1 h 15, le torpilleur *Faulkner* avait repéré la position de la flotte allemande, mais son message fut brouillé par les Allemands.

Pendant toute la guerre, les écoutes fournirent évidemment de très nombreux messages en provenance non seulement du front français, mais aussi de toute la Méditerranée et du Proche-Orient. La section du chiffre réussit toujours le décryptage de ces trafics.

On doit enfin rappeler qu'un message décrypté le 2 juin 1918 permit d'informer le commandement sur la zone de l'attaque allemande du 9 juin 1918. Grâce à la vérification de ce renseignement par d'autres sources, l'attaque put être contrée.

APPLICATIONS NAVALES DE LA RADIOGONIOMÉTRIE EN FRANCE ENTRE LES DEUX GUERRES

Philippe WODKA-GALLIEN

En février 1919, le ministère de la Guerre, à travers son Établissement central du matériel de radiotélégraphie militaire, publie un rapport intitulé *Radiogoniométrie*. L'auteur de cette étude identifie trois missions de la radiogoniométrie : l'aide à la navigation, le renseignement militaire et l'élimination des émissions gênantes. Cette nouvelle technologie issue de l'invention de la TSF connaît après la Première Guerre mondiale un développement très important : à cette époque, le radar n'est pas encore inventé, ce qui lui laisse le champ libre.

Pour les militaires, outre l'intérêt que cet outil représente en matière de navigation, la radiogoniométrie permet de connaître la position des postes ennemis, celle des sous-marins ou des dirigeables et avions. À partir de 1916, la France se distingue en effet en exploitant un réseau de stations côtières de radiogoniométrie, qui permet le repérage des sous-marins allemands.

Entre les deux guerres, la France poursuit ses efforts dans le domaine de l'aide à la navigation et dans celui du renseignement. Ainsi, dans un article paru dans la *Revue maritime* en 1920, Gérard Massenet, inspecteur général d'hydrographie, écrit : « La précision des routes, condition essentielle d'une navigation économique et de la sécurité de la navigation, exige l'emploi des radiogoniomètres. Ils constituent pour le navigateur le moyen de

contrôle le plus précieux parce qu'il peut être utilisé assez loin de la terre, de nuit comme de jour, quelles que soient les circonstances ».

La technologie française est au meilleur niveau. L'inspecteur général souligne notamment les perfectionnements apportés par les ingénieurs de la SFR (Société française de radio-électricité) à la technologie des radiogoniomètres, avec l'introduction d'amplificateurs à lampe. Grâce à cette innovation, il est désormais possible de réduire la taille du cadre orientable, c'est-à-dire de l'antenne du radiogoniomètre, et donc de le manœuvrer plus aisément. La miniaturisation permet même d'installer l'ensemble de l'équipement, antenne comprise, dans une cabine en bois. La SFR, société fondée en 1910, devient après la Première Guerre mondiale une filiale de la Compagnie générale de télégraphie sans fil, la CSF, l'ancêtre du groupe Thomson-CSF que nous connaissons aujourd'hui.

Mais, au début des années 1920, les militaires, les marins et les aviateurs doivent encore prouver l'intérêt de ce nouveau dispositif pour améliorer la sécurité de la navigation. Ils visent une installation systématique de radiogoniomètres à bord des bâtiments : leur emploi doit venir en complément de l'action des stations de goniométrie à terre. Grâce à son radiogoniomètre, un équipement SFR, la *Jeanne d'Arc* parvient ainsi à rejoindre par temps de brume un bateau de pêche, afin de porter secours à un marin malade à son bord.

Un autre épisode a lieu en décembre 1923, à l'occasion de la traversée Le Havre-New York du paquebot *Paris*. Le commandant note dans son rapport : « Durant la traversée du *Paris*, il a été fait 230 observations radiogoniométriques. À l'atterrissage à New York, nous avons eu l'occasion d'utiliser les phares hertziens américains, les résultats ont été des plus satisfaisants. Il a été constaté que l'utilisation des relèvements des phares hertziens permettait d'obtenir des positions sans aucune erreur et facilitait ainsi les atterrissages par temps bouché, lorsque les observations astronomiques font défaut ». Considérés comme un outil indispensable à la navigation, les radiogoniomètres équipent

rapidement les navires en tout genre : paquebots, cargos, bateaux de pêche et bâtiments de guerre, mais aussi les ballons dirigeables et les hydravions.

En 1935, 650 navires français possèdent un radiogoniomètre, parmi lesquels les paquebots *Normandie* et *La Fayette*. Pour la SFR, c'est un grand succès industriel. L'électronicien français emporte même plusieurs marchés à l'exportation : 200 appareils sont livrés à la flotte de commerce norvégienne, et les grandes compagnies maritimes japonaises comme la *Nippon Yusen Kaisha* ou la *Mitsui Bussan Kaisha* passent commande pour leurs grands paquebots. En 1935, près de 1 500 navires de par le monde sont équipés par des radiogoniomètres français développés par la SFR. Plusieurs programmes d'équipement s'enchaînent. Suite à un contrat passé le 18 juin 1932 avec la SFR, la Marine dote ses bâtiments de guerre de nouveaux équipements, des radiogoniomètres à tubes électroniques de type 1934 300 / 3 000. Parmi les 21 bâtiments de la flotte concernés par ce programme, on compte le cuirassé *Jean-Bart*, les croiseurs *Suffren*, *La Motte-Picquet* et *Primauguet*, ou encore le transport d'aviation *Commandant Teste*. En 1937, le radiogoniomètre ARUGL 1 / 60, développé par la SFR, équipe largement les hydravions de la Marine : *Laté 302*, *Loire 70* et *Laté 523*. La Marine a notamment été séduite par la commande à distance du cadre et par un répétiteur d'angle jugé « bien réalisé » par le ministère.

Sur le plan de l'organisation et de l'emploi, l'état-major général privilégie les procédures interministérielles. En cas de mobilisation et de guerre, l'utilisation des stations côtières passe sous les ordres de la Marine. Le personnel des Postes, télégraphes et téléphones chargé de leur mise en œuvre en temps de paix est alors mobilisable sur place. Preuve de l'importance de ce domaine d'action au service du renseignement, en 1939, le poste central d'opérations installé à Maintenon, que dirige Darlan, amiral de la Flotte, est doté d'une salle d'exploitation de la radiogoniométrie.

Pour terminer, il faut mentionner les travaux de l'ingénieur Maurice Deloraine dans le domaine de la radiogoniométrie à usage militaire. En 1928, il avait fondé un laboratoire qui

travaillait alors pour la société ITT. Mais, à la fin des années 1930, le défi pour la Marine réside dans la détection des signaux radio très brefs des sous-marins allemands. En 1938, le laboratoire de Deloraine reçoit des commandes de l'état-major général de la Marine (plus précisément du Service technique des transmissions). À cette date, alors que le laboratoire affiche un effectif de 700 personnes, Deloraine y crée une division radiogoniométrie. Face à ce nouveau besoin imposé par la parade de la Marine allemande et de ses *kurz Signale*, les travaux du laboratoire aboutissent à la mise au point du procédé *Huff-Duff*, procédé révolutionnaire qui permet d'offrir un radiogoniomètre capable de relever des signaux radio très courts, tout en se passant d'un cadre d'antenne mobile.

Après la défaite de juin 1940, Deloraine se réfugie aux États-Unis avec trois de ses principaux collaborateurs, en ayant pris soin auparavant de dissimuler ses inventions et ses documents. Ayant emporté avec lui les dessins permettant la fabrication du matériel, il propose son système à l'*US Navy*, qui l'adopte. Entre le milieu de 1942 et le début de 1944, 1 700 radiogoniomètres sont fabriqués par ITT. Ces radiogoniomètres conçus à partir du brevet de Deloraine furent déterminants dans l'issue victorieuse, pour les Alliés, de la bataille de l'Atlantique.

En France, l'histoire de la radiogoniométrie et de la guerre électronique des communications traverse tout le XX^e siècle. Malgré l'arrivée d'autres technologies – qu'il s'agisse du radar ou du GPS –, le développement de la radiogoniométrie s'est poursuivi.

Les systèmes actuels répondent à des besoins similaires à ceux rencontrés par les opérationnels et les marins de l'époque : renseignement militaire ou combat électronique ; s'y ajoutent des applications civiles, qui connaissent aujourd'hui un formidable développement avec l'essor des télécommunications. Ainsi, on attend toujours des radiogoniomètres d'aujourd'hui qu'ils accomplissent les trois missions bien identifiées dès 1919 par les services officiels.

BIBLIOGRAPHIE INDICATIVE

L'auteur a exploité des archives conservées au Service historique de la Marine, ainsi que les ouvrages suivants :

Société française radio-électrique, *Vingt-cinq années de TSF*, impr. de J.Makowsky, 1935.

COUTAU-BÉGARIE, Hervé et HUAN, Claude, *Darlan*, Fayard, 1989.

FOURES, M.J.B. (contrôleur général des armées), « Le Huff-Duff, une invention française », in *Les Marines de Guerre du Dreadnought au nucléaire*, Service historique de la Marine, 1990.

LA PROTECTION CONTRE LE BROUILLAGE ENNEMI DES SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMANDE DE LA MARINE FRANÇAISE DURANT L'ENTRE-DEUX-GUERRES

Sébastien SOUBIRAN

La télémechanique correspond à l'utilisation de la TSF pour conduire à distance des engins, tels que des bateaux ou des avions. Son étude, entreprise pendant la guerre, est développée par la Marine française durant l'entre-deux-guerres. Étudier la télémechanique revient, entre autres, à étudier des moyens de protection pour s'affranchir du brouillage ennemi. Après avoir décrit les techniques développées par la Marine, je voudrais montrer comment ce cas permet de comprendre le processus d'innovation mis en place à l'époque, d'en décrire les acteurs et d'évoquer leurs pratiques. Seule une analyse sociologique et politique de la mise au point d'une technique peut permettre de définir les caractéristiques de la recherche scientifique « militaire » durant l'entre-deux-guerres.

LES TRAVAUX PENDANT LA PREMIÈRE GUERRE MONDIALE

Naissance d'un besoin

En 1917, les militaires français développent l'étude de l'utilisation de la TSF pour la conduite à distance d'engins. Il semble que des recherches avaient déjà été envisagées par l'état-major (suite aux propositions de différents inventeurs), mais que la difficulté de s'affranchir des brouillages, même parasites, ne permettait pas,

à leurs yeux, de poursuivre plus avant. Pourquoi, en 1917, les militaires décident-ils finalement de continuer ces recherches ?

Tout d'abord, l'intérêt des militaires français naît de l'attaque allemande à Nieuport, le 1^{er} mars 1917. Une dépêche de l'armée française, envoyée aux services de renseignement britanniques, décrit cette attaque : « L'engin ressemble à une petite embarcation à moteur, l'avant à environ 1 mètre au-dessus de l'eau, l'arrière masqué par la volute, sans aucun homme visible, faisant une route à embardée, et à une vitesse considérable [...] une explosion d'une violence inouïe comparable à celle d'un dépôt de munitions eut lieu alors, avec production d'une énorme fumée noire haute d'une cinquantaine de mètres, et d'une brèche de 10 mètres dans la jetée de madriers de chêne. Un hydravion ennemi volait à une altitude d'environ 300 mètres à proximité immédiate de l'engin. L'engin n'ayant pas reparu après l'explosion, on suppose qu'il s'agit d'une torpille dirigée par ondes hertziennes ou lumineuses dont les déserteurs et les agents de renseignement ont plusieurs fois fait mention »¹.

Après étude, il s'avère que l'embarcation allemande était dirigée par câble, depuis une station à terre proche de Nieuport. Néanmoins, cette attaque sert de point de référence à l'état-major pour établir une tactique d'utilisation de la télécommande. Il s'agit de conduire vers une cible ennemie un engin aussi rapide que possible, contenant quatre à cinq tonnes d'explosifs, à partir d'un avion.

D'autre part, à la même époque, les Marines américaine et britannique s'intéressent également au procédé. La Marine américaine collabore avec un certain Hay Hammond pour la télécommande d'avions et de bateaux. Les Britanniques, suite à l'attaque allemande, mobilisent également leurs stations et départements expérimentaux pour mettre au point une embarcation télécommandée.

¹ Communiqué à l'*Admiralty*, mars 1917, ADM 116/3141, *Public Record Office* (PRO).

Enfin, les progrès réalisés pendant la guerre en matière de TSF – le développement des lampes notamment – permettent effectivement d'envisager la mise au point de postes émetteurs et récepteurs moins sensibles aux brouillages.

Engagement des recherches

Ainsi, en 1917, Léon Brillouin entreprend, en collaboration avec les ingénieurs Manescau et Guéritot du Service technique de l'aéronautique, l'étude d'appareils de transmission permettant la télécommande d'un avion et d'un bateau. Léon Brillouin, sorti en 1912 de l'École normale supérieure, est mobilisé pendant la guerre au laboratoire de radiotélégraphie militaire, sous la direction du général Ferrié. Il y invente l'amplificateur à résistance et, avec la collaboration de Louis de Broglie, il met au point, en 1915, le premier récepteur radioélectrique pour sous-marin submergé. Guéritot travaille également pour la Marine, à la 8^e section du Génie. La Marine vient alors de construire à Toulon un laboratoire de recherche sous-marine, dans lequel travaille entre autres Paul Langevin, et dont les recherches aboutissent à l'invention du sonar.

Les recherches en télémécanique permettent, en septembre 1918, lors d'une expérience menée à Étampes, de commander un avion sur une distance de 100 km. L'avion n'est pas encore muni de dispositifs de départ ni d'atterrissage ; le poste émetteur de TSF est monté sur un deuxième avion. Des essais sont également effectués à Toulon entre octobre 1918 et janvier 1919, pour la commande d'un canot automobile. Le poste émetteur est soit à terre, soit sur un avion².

Il faut souligner la présence de savants et d'ingénieurs civils dans des institutions militaires. C'est la première fois que la communauté scientifique se mobilise de façon aussi franche. C'est également la première fois qu'elle travaille en groupe dans un laboratoire avec des ingénieurs, des officiers et des industriels. On

² Léon BRILLOUIN, *Titres et travaux scientifiques*, Niort, imprimerie Poitevine, 1931.

l'a suffisamment répété, durant la Première Guerre mondiale, l'avancée technologique fut un enjeu stratégique majeur.

Il existe d'autre part un lien intrinsèque entre la télémécanique et la protection contre le brouillage. « C'est la valeur de cette défense qui donne au procédé choisi son véritable caractère militaire »³. On suppose que l'ennemi cherchera à brouiller en utilisant des postes puissants, parfois rapprochés et toujours accordés aussi exactement qu'il le pourra. Le brouillage est une véritable arme⁴. Ainsi, étudier le développement de la télémécanique dans la Marine française permet également d'étudier les moyens de protection inventés pour se prémunir des brouillages ennemis.

L'IMMÉDIAT APRÈS-GUERRE

Démobilisation des savants, mobilisation de l'état-major général

Après le conflit, la plupart des ingénieurs et savants mobilisés pendant la guerre quittent les institutions militaires. Cette démobilisation entraîne sinon l'arrêt brutal de nombreuses études, du moins un ralentissement certain. L'intérêt militaire de la poursuite de certaines d'entre elles, telles que le sonar ou même la télémécanique, est un argument majeur pour que la Marine décide d'intégrer la recherche scientifique en son sein.

En 1919, la direction de la recherche scientifique est confiée à un Comité directeur des recherches scientifiques appliquées à la Marine. Par décret ministériel du 20 juin 1920, sur proposition du chef de l'état-major général, la Marine française inscrit les mots « recherche » et « scientifique » au sein de son état-major, en créant l'état-major général de recherche scientifique (EMGRS)⁵.

³ Rapport du LCET du 5 mars 1925, *La télémécanique*, par Canac, directeur scientifique du laboratoire, Service historique de la Marine (SHM), 1 BB⁸ 136.

⁴ Rapport n° 411 du 30 septembre 1927, par Dubois, capitaine de frégate, SHM, MN, 1 BB⁸ 139.

⁵ Le Bureau de recherches scientifiques remplace la section I C de l'état-major général, qui s'occupait des questions de service courant relatives aux mines, aux torpilles remorquées et à la détection sous-marine.

En 1909, la Marine avait créé un corps d'ingénieurs ; avec l'EMGRS, elle officialise surtout ses relations avec le monde des savants et des universitaires. Tel qu'il est défini par l'état-major lors de sa création, ce service est un organe de direction, de liaison et de documentation dont le chef, un officier supérieur, relève directement du vice-amiral, sous-chef de l'état-major général de la Marine. Aidé d'un seul officier, archiviste, il a pour fonctions⁶ :

- les relations, pour ce qui concerne les recherches, avec les centres d'études et les commissions d'études pratiques (le Centre d'études de Toulon, la Commission d'études pratiques de dragage de Brest et la Commission d'études pratiques de détection du littoral de Cherbourg) ;
- l'administration des crédits de recherche : liaison avec la direction de l'intendance, la direction de la comptabilité générale, les services de contrôle des dépenses engagées, le bureau de la Marine à la Chambre des députés et au Sénat ;
- l'examen des inventions présentées à la Marine ;
- la tenue à jour d'une documentation scientifique dirigée du point de vue des recherches ;
- la liaison, pour les recherches, avec les directions et services de la Marine et avec les services et laboratoires extérieurs.

Les laboratoires en liaison avec l'EMGRS sont :

- laboratoires d'État : ceux liés au ministère de la Guerre (Service technique de l'artillerie, Saint-Thomas-d'Aquin ; Direction du génie-inspection générale des commissions ; Laboratoire national de TSF) ; au sous-secrétariat d'État de l'Aéronautique militaire ; à l'Instruction publique (ONRSII à Bellevue, Commission supérieure des inventions, Sorbonne, Collège de France) ; le laboratoire des PTT ;
- laboratoires extérieurs : laboratoire de l'Institut Pasteur ; Laboratoire central d'électricité ; École de physique et chimie de la ville de Paris ; Institut d'optique ; usines Thomson, Schneider, Gramme ; maison Gaumont précision moderne.

⁶ Note EMGRS, chemise 1922, SHM, 1BB² 236.

Le Centre d'études de Toulon

Le principal moyen d'action interne à la Marine dont l'EMGRS dispose durant l'entre-deux-guerres est le Centre d'études de Toulon. Il est créé au début de l'année 1920. Il met sous l'autorité d'un même commandement des commissions d'études pratiques et le laboratoire de guerre sous-marine, qui devient le Laboratoire du Centre d'études (LCET). Cette institution est commandée par le préfet maritime de Toulon et par un officier supérieur, commandant du Centre d'études. En 1922, 280 hommes environ travaillent dans le Centre.

La spécificité du laboratoire réside dans la présence, dans un département de recherche, d'ingénieurs civils et de professeurs d'université. Le schéma mis en place pendant la Première Guerre mondiale se retrouve dans ce laboratoire, et par extension dans le Centre d'études de Toulon. Les collaborateurs scientifiques du laboratoire (c'est le titre donné aux ingénieurs civils et aux professeurs) travaillent avec des officiers de la Marine, des ingénieurs de l'artillerie navale, des professeurs d'hydrographie, des ingénieurs mécaniciens. La direction générale est exercée par un capitaine de frégate, directeur du laboratoire, mais il partage la direction scientifique des études avec un civil, ayant le rang d'officier supérieur, qui porte le titre de directeur scientifique. Le nombre de ces collaborateurs scientifiques varie entre 5 et 7 durant l'entre-deux-guerres.

Ce laboratoire est aussi remarquable pour les études menées avec des collaborateurs extérieurs, tels que Perrin, Langevin, Brillouin, Becquerel. Ces derniers ne travaillent pas dans le LCET, mais dans un laboratoire parisien. Brillouin, par exemple, travaille dans le laboratoire de radiotélégraphie militaire et dans celui du Collège de France. Il ne se déplace à Toulon que pour assister aux essais à la mer de ses appareils, qu'il a envoyés auparavant au CET.

Le LCET est défini par les officiers du centre comme un organe de renseignement scientifique (abonnement aux revues, archivage...); comme un organisme de recherche (salles de travail, de mesures, d'enregistrement, de rayons X, de TSF, de

chimie, appareils de mathématique et de mécanique, salle d'optique, chambre sourde) ; enfin comme un organisme de réalisation, bureau de dessin et atelier de précision (avec une trentaine d'ouvriers).

Le laboratoire travaille en liaison avec les Commissions d'études pratiques. Celles-ci sont principalement chargées de procéder aux essais de tout nouveau matériel et de fournir à l'état-major général les renseignements qui lui sont nécessaires pour donner des directives aux services techniques, afin de préparer la mise en service du matériel.

Ces groupes d'études sont, dans leurs effectifs et dans leurs applications, purement militaires. En 1922, appartiennent au CET : la CEPDSM (détection sous-marine) ; la CEPMG (mines et grenades) ; la CEPOT (optique et télémétrie) ; la CEPAC (artillerie des côtes)⁷ ; enfin, la CEPTSF et la CEPSM (sous-marine) dépendent du CET pour les études et expériences, mais pas pour le commandement⁸.

Retenons qu'au début des années 1920, la Marine française, en créant l'EMGRS et le CET, reconnaît la recherche scientifique. L'intégration de celle-ci dans ses départements n'est néanmoins que partielle, ne concernant qu'une petite dizaine d'individus ; elle est surtout notable par les nombreuses collaborations qu'elle implique avec des laboratoires de recherches extérieurs, souvent parisiens.

⁷ Plus tard viennent s'y ajouter la CEPIN (instruments de navigation) et la CEPZ (gaz de combat).

⁸ D'autres CEP existent, mais ne sont pas rattachées au laboratoire. Certaines, situées sur des bateaux, sont rattachées à la 3^e escadre : CEPAN (à bord du *Gueydon*), CEPSM, CEPTT (à bord du *Thionville*). D'autres appartiennent à d'autres institutions : la CEP aérostation, la CEP aviation, la Commission pratique de dragage de Brest.

LA TÉLÉMÉCANIQUE

Principe de base pour la protection contre les brouillages ennemis

La question de la télémécanique est attribuée au LCET dès sa création. Brillouin et Guéritot reprennent en 1922 leurs recherches avec la Marine, en tant que collaborateurs scientifiques extérieurs. Ils travaillent avec le lieutenant de vaisseau Aicardi, qui appartient à la Commission d'études pratiques de TSF (CEPTSF), mais qui est détaché au laboratoire du Centre.

L'étude de la télémécanique est reprise à ses débuts, le système mis au point par Guéritot et Manescau pendant la guerre étant abandonné, du fait d'un manque de protection contre le brouillage inhérent à son principe même. Au début des années 1920, le problème de la télémécanique, envisagé du point de vue tactique par l'état-major général de la Marine, est de pouvoir construire un bateau ou un avion téléguidés à partir d'un avion. Ces engins sont destinés en premier lieu à exploser sur une cible ennemie.

Du point de vue technique, cela se traduit pour Aicardi par le fait que le rôle de la TSF se borne à transmettre le signal d'ordre. Les organes d'interprétation des signaux reçus (sélecteurs) et les mécanismes d'exécution des commandes n'ont donc rien de spécifique à la télémécanique sans fil. L'inscription temporaire du signal et la mise en jeu du relais correspondant est un problème courant d'électrotechnique. Le problème de l'utilisation de la télémécanique réside dans le brouillage, intentionnel ou non. Le récepteur doit être d'une extrême sensibilité et verrouillé⁹ pour être insensible aux brouillages. « Par leur nature, ces difficultés sont les mêmes que celles qui se présentent en radiotechnique ordinaire, mais par leur intensité elles en diffèrent profondément et exigent des solutions spéciales »¹⁰.

⁹ Au lieu de syntonie, on parle pour la télémécanique de verrouillage.

¹⁰ Conférence du lieutenant de vaisseau Aicardi, le 28 mai 1923 au CET, SHM, série 1 BB⁸ boîte 136.

Ces solutions particulières ne peuvent être apportées par des industriels. Aussi la Marine doit-elle développer seule la mise au point des appareils de télécommande.

Ainsi, nous avons affaire à une technique purement militaire, avec un nombre d'acteurs limité, lesquels demeurent sensiblement les mêmes pendant plus de dix ans : d'où l'existence de principes qui varient peu.

Brillouin, Aicardi, Guéritot et les officiers qui suivent les études tiennent le même discours sur les moyens de protection à employer. En premier lieu, le verrouillage doit être total. Ensuite, il ne peut se situer que dans la partie radioélectrique. Troisièmement, le verrouillage doit être fondé sur une particularité des ondes émises et non sur la perfection du récepteur. Enfin, il est nécessaire de conserver le secret de la particularité conférée aux ondes émises, d'où l'intérêt d'employer des signaux brefs, difficiles à identifier et sur lesquels des mesures sont à peu près impossibles.

Selon eux, la seule façon d'obtenir un verrouillage efficace consiste à conférer aux ondes émises une particularité, naturellement secrète, et à créer un récepteur qui ne se laisse impressionner que par des ondes affectées de cette particularité.

La protection contre le brouillage ennemi

Entre 1918 et 1924, Brillouin, Guéritot et Aicardi utilisent le même principe de modulation. Leur émetteur émet une seule onde, dont l'amplitude ou la fréquence varie périodiquement (c'est ce qu'on appelle une onde modulée), l'appareil récepteur étant alors établi de façon à n'être impressionné que par des ondes de la longueur voulue et modulées sur la même fréquence.

La première différence entre le système de Brillouin-Guéritot et celui d'Aicardi réside dans la fréquence de modulation : il s'agit de fréquence basse pour les premiers et de haute fréquence pour le dernier. La deuxième réside dans le principe électromécanique qui transmet l'information aux relais. Pour la basse fréquence, Guéritot a mis au point des résonateurs élastiques qui remplacent les circuits résonants électriques. Il s'agit de lames vibrantes en

acier, dont le mouvement est entretenu par le courant à sélectionner, traversant un électro-aimant. Une lame vibrante analogue et de même fréquence naturelle montée en sonnerie électrique est placée en série avec le manipulateur de l'émission. Elle découpe l'émission et joue ainsi le rôle de modulateur. Chaque commande est caractérisée par une fréquence de modulation qui lui est propre et qui peut servir en même temps de modulation de verrouillage.

Pour la haute fréquence, le manipulateur transforme automatiquement chaque commande en un petit message formé d'émissions brèves ou longues, séparées par des intervalles qui peuvent aussi avoir une valeur. La résonance est produite par des circuits électriques. Le sélecteur est préparé à recevoir, reconnaître et trier ces messages et provoque automatiquement la commande correspondante. Ce système est appelé « pas à pas ».

Une troisième protection existe, cette fois dans la réception, protection que l'on retrouve dans les deux systèmes ainsi que dans l'industrie. Il s'agit de la conversion de fréquence, qui permet l'utilisation de propriétés physiques des ondes. Un émetteur local superpose à l'onde reçue une onde « pure », non modulée, et d'une longueur peu différente de celle qui est supposée être émise. Il se produit alors un phénomène de battement entre les deux ondes. Après redressement, si l'on prend en compte la valeur moyenne du courant, on obtient un courant qui reproduit exactement la forme du premier, à ceci près que la fréquence est plus petite, donc la longueur d'onde plus grande.

Il est alors plus facile d'amplifier les grandes ondes que les petites : cela évite d'avoir à superposer indéfiniment des étages d'amplificateurs, au risque de les voir réagir les uns sur les autres. Mais surtout, à deux ondes de longueur différente et qu'on ne pourrait discriminer, correspondent, après conversion de fréquence, deux ondes de longueur différente et qu'on peut généralement séparer (la différence des fréquences se conserve en valeur absolue dans la conversion).

Évolution des systèmes de protection

Le laboratoire, sous la direction d'Aicardi et en collaboration avec le mécanicien principal Cordurier, construit en 1921, dans la pinasse, puis en 1923, dans une canonnière, bâtiment dragueur, la *Diligente*, les installations nécessaires pour télécommander les moteurs et la barre. Les deux embarcations sont capables de recevoir les systèmes de télécommandes d'Aicardi et de Brillouin, qui sont installés successivement au fur et à mesure des essais.

L'année 1924 marque un tournant pour les recherches en télémécanique. D'abord, les essais de 1923, avec les deux systèmes, permettent de faire fonctionner les deux embarcations sans problème, ce qui confirme la faisabilité de la technique.

Ensuite, la protection contre le brouillage, bien qu'elle ne soit pas totale, est nettement supérieure à celle obtenue avec les postes construits pendant la guerre. Cela se traduit de deux façons au niveau de l'état-major. D'abord, un projet d'utilisation rapide de la télémécanique est établi pour le cas où un brouillage important n'est pas à craindre (bâtiments cibles ou bien dragueurs, envoi d'une torpille d'un bateau téléguidé...). Ensuite, l'EMG entend pouvoir étendre l'étude des applications aux bombes téléguidées, aux torpilles téléguidées pour la Marine, mais aussi à toutes sortes d'avions. Une seule restriction est émise, qui concerne les sous-marins.

Brillouin est fait chevalier de la Légion d'honneur par le ministre de la Marine pour ses travaux en télémécanique ; Guéritot est, lui, décédé en mai 1923. Aicardi et Cordurier sont surclassés.

En 1924 apparaissent de nouveaux acteurs et, avec eux, de nouveaux principes.

David, ingénieur civil travaillant au Laboratoire de télégraphie militaire, met au point un ensemble de transmissions utilisant des ondes courtes de quelques dizaines de mètres. Brillouin et Aicardi utilisent des ondes d'une centaine de mètres. Le premier avantage des ondes courtes est qu'elles sont encore peu utilisées, ce qui diminue les brouillages parasites. De plus, elles nécessitent une

énergie moindre, diminuant en cela de beaucoup l'encombrement des postes émetteurs.

Aicardi quitte alors le Centre d'études, ne pouvant être détaché du service en mer que pour trois ans. Il semblerait qu'il rejoigne l'industrie, puisqu'il est alors en congé sans solde, hors cadre. Son appareil est repris par un nouvel officier, le lieutenant de vaisseau Blanchard, qui, sans changer le principe, apporte quelques modifications. Pour ce qui est de la conduite d'engin, le système Aicardi est néanmoins abandonné au profit du système Guéritot-Brillouin.

Léon Brillouin, avec son nouveau collaborateur Fromy, ingénieur civil des services aéronautiques, met au point un principe d'émission à deux ondes : « On [Brillouin et Fromy] a envisagé le dispositif suivant : le téléducteur a à sa disposition deux longueurs d'ondes porteuses, capables de produire la commande et il émet alternativement et très rapidement chacune des ondes. Si l'on brouille une des ondes, l'autre passe »¹¹. Les premiers essais en laboratoire sont encourageants. Cependant, lors des essais d'octobre 1924 dans la rade de Toulon, avec un bâtiment brouilleur, le dispositif s'avère sensible aux brouillages¹². Brillouin et Fromy laissent momentanément cette étude de côté et se concentrent sur le système à une seule onde. Ils inventent un nouveau principe pour l'émission, qui permet de supprimer l'utilisation des lames vibrantes, dont le réglage est délicat. Elles sont remplacées par des contacteurs tournants actionnés par un moteur à vitesse constante et réglable par l'intermédiaire d'engrenages appropriés.

Ainsi, la fréquence moyenne est définie par la vitesse de rotation des moteurs. Les rapports entre les différentes fréquences et leurs phases peuvent être définis et établis une fois pour toutes avec précision, en choisissant convenablement les engrenages d'entraînement et les calages des balais. Les durées relatives des

¹¹ Léon BRILLOUIN, « Les circuits poly-ondes », *Onde électrique*, t. 4, 1925, pp. 371, 419, et « Les circuits à deux ondes », *Onde électrique*, t. 6, 1927, p. 561, et t. 7, 1928, p. 33.

¹² Procès-verbal du 18 octobre 1924, directeur du LCET, SHM, série 1 BB⁸ 136.

contacts et des coupures peuvent être obtenues en réglant la longueur des secteurs tournants. Le commutateur tournant évite complètement les mauvais contacts et les rebondissements, et permet d'obtenir une modulation carrée de l'émission. La valeur relative des fréquences, importante pour les lames de réception, s'en trouve améliorée. Le moteur d'entraînement est un moteur à vitesse constante synchrone d'une lame vibrante. La vitesse du moteur est entièrement définie par la fréquence de la lame vibrante, qui joue le rôle de chef d'orchestre. Lors des essais dans la rade de Toulon, le bâtiment télécommandé, jusqu'alors arrêté à quelques centaines de mètres du bâtiment brouilleur, parvient à s'en approcher jusqu'à le toucher.

En 1928, l'état-major général de la Marine détermine la longueur des ondes à utiliser dans le cadre de la télémechanique. Ces longueurs d'ondes doivent être comprises entre 80 et 100 m. Il s'avère, lors des essais avec cette nouvelle longueur d'onde, qu'il ne suffit pas pour Brillouin de modifier les circuits résonants des anciennes boîtes de réception. Il doit mettre au point un nouveau type de réception, qu'il fonde sur la boîte de l'ingénieur David. Il remet son matériel au LCET pour de nouveaux essais en juillet 1929. Le rapport conclut : « Nous avons maintenant des appareils stables, sûrs, peu encombrants tant à l'émission qu'à la réception »¹³.

À partir de cette date, le principe de protection contre le brouillage mis au point par Brillouin et utilisé par la Marine ne varie que peu. Ce principe est également adopté par l'industrie, en l'espèce par la SFR et la Compagnie des compteurs, qui deviennent alors les fournisseurs de la Marine. L'attention de cette dernière se focalise sur les applications pour la conduite de vedettes rapides et d'avions. En 1931, la Commission d'études pratiques de télémechanique est créée, marquant le passage de l'expérimentation à la pratique. Les questions étudiées deviennent essentiellement d'ordre électromécanique, une fois résolus les problèmes radioélectriques relevant de Léon Brillouin et des militaires.

¹³ RP n° 68, août 1929, SHM, série 1 BB⁸ 141.

À PROPOS DU SYSTÈME D'INNOVATION
DE LA MARINE FRANÇAISE ENTRE LES DEUX GUERRES

La question du brouillage

La notion de protection contre le brouillage est définie comme l'impossibilité pour un poste de TSF ordinaire, émettant sur la même longueur d'onde que celle utilisée pour la télécommande, d'interférer avec la manœuvre. Le brouillage est caractérisé par les effets qu'il produit sur la réception, qui sont de deux sortes.

Si l'ennemi peut agir sur la réception en superposant ses signaux à ceux du télédecteur, et provoquer ainsi des commandes indésirables, on parle de brouillage positif. Si l'ennemi peut, par l'intensité de ses signaux, modifier l'état électrique du récepteur au point de le désensibiliser complètement et de le rendre muet, on parle de brouillage négatif. Les méthodes de brouillage semblent implicitement connues : il ne s'agit plus pour Brillouin que de s'en affranchir. Il fournit une étude théorique de la question, publiée dans *l'Onde électrique*, en 1924¹⁴.

Mais ce sont surtout les nombreux essais dans la rade de Toulon qui permettent de juger d'une bonne ou d'une mauvaise protection contre le brouillage. Très souvent, en effet, les appareils de Brillouin se montrent insensibles aux brouillages en laboratoire, mais sensibles aux postes brouilleurs des bâtiments de la Marine utilisés lors des essais en mer. C'est à partir de ces essais que le directeur du laboratoire, le chef de l'EMGRS, fixe les normes d'une protection efficace contre le brouillage. Grâce à elles, Brillouin est en mesure d'identifier les appareils utilisables contre un ennemi, tel qu'il a été imaginé.

¹⁴ Léon BRILLOUIN, « L'influence du brouillage sur les récepteurs à réaction », *Onde Electrique*, t. 3, 1924, pp. 181, 268 et 299.

Comment se fait le développement ?

Soulignons l'influence d'un environnement particulier sur la construction même d'un appareil.

Avec la télémechanique, on peut mettre en évidence la spécificité militaire des appareils mis au point par Brillouin. Il existe des normes militaires, qui influencent la forme et la mécanique des appareils. Ceux-ci sont par exemple conçus en fonction d'une certaine forme de brouillage. En outre, ils doivent résister aux vibrations d'un bateau se déplaçant à très grande vitesse sur une mer houleuse. On a vu que Brillouin fut obligé de modifier ses appareils de réception lorsque l'état-major décida de fixer la longueur d'onde à utiliser. Pourquoi avoir choisi cette gamme ? Chaque étape du développement est ponctuée de choix. Émanent-ils d'individus ou de groupes d'individus ? L'état-major définit l'utilisation tactique en accord avec un autre bureau, qui définit les besoins de la Marine. Le directeur scientifique du laboratoire définit la qualité du matériel ; Brillouin choisit avec son collaborateur la technique à mettre au point.

En analysant le processus de décision qui ponctue le développement d'une technique, on réintègre les facteurs humain et social, qu'un discours purement centralisé sur la technique évacue totalement. En confrontant les discours des différents acteurs et en réintégrant la part sociale et politique, on peut, comme l'écrit Dominique Pestre, comprendre « les évolutions parallèles et mouvantes dans lesquelles les acteurs opèrent et qu'ils contribuent à redéfinir »¹⁵.

¹⁵ Dominique PESTRE, « Le renouveau de la recherche à l'École polytechnique et le laboratoire de Louis Leprince-Ringuet, 1936-1965 », in *La formation polytechnicienne, 1794-1994*, Dunod, 1994, pp. 336-337.

*Comment définir la recherche scientifique
dans la Marine française durant l'entre-deux-guerres ?*

Il ne saurait être question ici de donner une définition définitive. Il est néanmoins possible d'avancer quelques éléments de réponse. Il s'agit tout d'abord de comprendre les pratiques de chacun des acteurs. Celles de Brillouin, par exemple, sont clairement celles d'un ingénieur, lorsqu'il met au point un ensemble de transmissions pour téléguider un engin. Pourtant, avec Louis de Broglie, Léon Brillouin est, jusqu'en 1928, l'unique physicien français à se consacrer à la seule physique théorique¹⁶.

La science que Brillouin met au service de la Marine n'est pas la même que celle qui fait de lui un scientifique aux yeux de ses pairs. C'est d'ailleurs une des raisons pour laquelle la participation d'universitaires à la recherche militaire durant l'entre-deux-guerres est si peu connue et reconnue.

Il est important également de bien définir le cadre institutionnel. L'EMGRS et le CET ont un faible poids budgétaire et décisionnel, face aux directions centrales et à leurs services techniques. Il existe un décalage important entre le rôle qui leur est attribué à leur création et le rôle effectif qu'ils jouent durant l'entre-deux-guerres. L'intégration de civils dans les établissements techniques pose de nombreux problèmes, et donne naissance à des conflits qui ont des répercussions sur le fonctionnement et les pratiques du personnel du LCET. Les directions centrales veulent garder le contrôle de la mise en application et du développement. C'est une des raisons pour lesquelles le rôle du LCET se borne à l'expérimentation de nouveaux matériels et à l'amélioration des anciens. Le développement et la mise en application sont réservés aux directions qui se chargent des liaisons avec l'industrie. Cela explique également en partie pourquoi la Marine ne mit jamais d'engins téléguidés en service, et pourquoi bien d'autres études n'aboutirent pas.

¹⁶ Dominique PESTRE, *Physique et physiciens en France 1918-1940*, Éditions des archives contemporaines, 2^e éd. 1992, p. 119.

L'exemple de la télémécanique permet ainsi de comprendre la recherche scientifique de la Marine pendant l'entre-deux-guerres, la naissance des interfaces entre universitaires, ingénieurs et militaires, et de comprendre en quoi cette collaboration contribue à expliquer le rôle prépondérant que le savant a été amené à jouer pendant le deuxième conflit mondial.

LE DÉVELOPPEMENT DES RADIOGONIOMÈTRES INSTANTANÉS ET DES BROUILLEURS RADARS AVANT ET PENDANT LA DEUXIÈME GUERRE MONDIALE

Gérard LEHMANN

Avant de commencer mon exposé, je voudrais rendre hommage aux ingénieurs qui sont à l'origine, par leurs demandes, des grandes innovations électroniques et militaires dont je vais vous parler. Tout d'abord au général Paul Labat, qui était le directeur des transmissions au ministère des Armées, et qui fut assassiné par les Allemands pour faits de résistance en 1944. Puis à l'ingénieur Champsaur, ingénieur en chef des télécommunications de la Marine française, et aussi au colonel Cazenave, directeur des transmissions au ministère de l'Air.

Une des sociétés les plus actives mondialement dans le domaine des télécommunications était *International Telegraph & Telephone* (ITT), société américaine dont le président-fondateur était le colonel Sosthène Bell, très francophile et particulièrement bon connaisseur des vins français. ITT était l'un des leaders pour la communication automatique des téléphones, et construisit notamment l'un des premiers centraux automatiques à Paris, le central Carnot.

Entre 1937 et 1945, ITT développa la transmission et la commutation électroniques du téléphone, notamment par voie numérique, en prenant les principaux brevets. Ces brevets décrivaient d'une façon précise les avantages du numérique, qui a maintenant envahi tous les domaines des mesures et des

télécommunications. ITT avait créé à Paris un grand laboratoire de recherches, avenue de Breteuil, dont le directeur était Maurice Deloraine¹. Henri Busignies y travaillait : spécialiste de la radiogoniométrie, il a notamment créé un radiogoniomètre automatique de bord pour avions, qui donnait la direction d'un émetteur par lecture d'un indicateur analogue à un compas magnétique.

La Marine française avait constaté, dès l'avant-guerre, que les sous-marins allemands communiquaient par des messages radio dont la durée totale était inférieure à une seconde. Les messages télégraphiques étaient transmis après rétrécissement par enregistrement magnétique. Ils étaient enregistrés avec une clé morse à la vitesse normale, sur une bande magnétique, une des nouveautés de l'époque. Ensuite, la bande magnétique était déroulée à grande vitesse à l'entrée de l'émetteur, et la durée totale du message était ramenée à une seconde. Un relevé radiogoniométrique effectué par rotation d'un cadre ou d'une bobine radiogoniométrique, dans un ensemble lié à des antennes perpendiculaires, nécessitait une durée de trente secondes environ. Il fallait tourner un cadran jusqu'à ce qu'on ait un zéro de chaque côté, puis effectuer le lever de doute. Toute cette opération durant environ trente secondes, les messages allemands, bien qu'enregistrés et décodés, ne pouvaient pas être radiogoniométrés : la position des sous-marins ne pouvait pas être déterminée. Cette situation se confirma lors du débarquement italien en Albanie, en 1939, où des sous-marins allemands étaient présents.

L'ingénieur en chef Champsaur, chef des services des télécommunications de la Marine française, demanda alors à Maurice Deloraine si le laboratoire de l'avenue de Breteuil pouvait réaliser un radiogoniomètre instantané. Ce résultat fut atteint rapidement par Busignies, grâce à un radiogoniomètre dont la bobine tournait à vingt tours par seconde ; le signal à la sortie

¹ Sa photo figure sur la première des cartes téléphoniques éditées par France Télécom, qui fait mention de ses travaux sur l'électronification du téléphone.

de l'amplificateur était affiché sur l'écran circulaire d'un oscillographe cathodique, instrument alors relativement nouveau pour ce qui était des utilisations industrielles. La direction de l'émetteur était lue instantanément sur cet écran.

Un prototype fut construit et testé avec succès en 1940, avant l'armistice. Après l'armistice, ces résultats furent cachés aux Allemands. Maurice Deloraine, accompagné d'Émile Labin, Georges Chevigny, Henri Busignies et de leurs familles, parvint alors à New York, au siège d'ITT, avec les plans des radiogoniomètres. La possibilité de localiser les sous-marins allemands fut indiquée à la Marine militaire américaine, qui montra un certain scepticisme. Néanmoins, elle demanda à ITT de construire et de faire la démonstration de cet appareil français, ce qui fut réalisé en moins de trois mois. Les résultats permirent la localisation des sous-marins d'un bord à l'autre de l'Atlantique.

Quatre mille radiogoniomètres furent alors construits (chacun coûtait un peu plus cher qu'un récepteur radio). Une partie était installée sur la côte américaine et sur la côte anglaise, dirigée vers l'Atlantique, où se trouvaient les sous-marins. Après un grand nombre de difficultés quant à la mise au point des antennes, une grande partie fut installée à bord des navires d'escorte qui accompagnaient les convois de cargos. Avec ces radiogoniomètres, dès qu'un des sous-marins d'une meute communiquait par radio avec les autres sous-marins pour lancer une attaque contre les convois alliés, il était repéré à courte distance et le navire d'escorte, suivant simplement la direction que lui donnait le radiogoniomètre, lui tombait immédiatement dessus et le coulait avec des charges explosives sous-marines.

En 1942, les sous-marins allemands avaient coulé plus de cargos que les chantiers américains ne pouvaient en construire, mettant en péril les livraisons d'armes américaines à l'Angleterre et à l'URSS, et la victoire alliée elle-même. Mais, en 1943, la quasi-totalité des sous-marins allemands furent détruits, la Marine allemande demeurant convaincue, jusqu'à la fin de la guerre, que le repérage de ces sous-marins par leurs émissions était

impossible, et que seuls des espions pouvaient en être responsables².

Mentionnons deux autres développements réalisés de 1938 à 1943 dans mon laboratoire : les dipôles repliés (*folded dipoles*), et l'antenne trombone, qui fut créée en 1938 pour permettre l'implantation d'une antenne à large bande de fréquence au sommet du mât du porte-avions *Béarn*.

Aujourd'hui, le *folded dipole* est très largement répandu, tant dans de nombreux émetteurs que dans les récepteurs. Il constitue l'élément actif de la quasi-totalité des antennes de réception de télévision dans le monde.

En 1943, un générateur d'une puissance continue d'un kilowatt sur 600 MHz, équipé d'une lampe triode, fut développé à New York. À cette époque, on ne savait pas produire sur ces fréquences de puissances supérieures à dix watts environ. Or ce type d'émetteur rendait de grands services pour le brouillage des radars des avions de chasse de nuit allemands. Lorsque les bombardiers anglais avaient bombardé l'Allemagne, ils rentraient à la fin de la nuit en Angleterre, souvent endommagés par la DCA allemande. Les chasseurs allemands poursuivaient les avions anglais, auxquels ils infligeaient d'importants dommages, grâce à leurs radars de poursuite de nuit. Les brouilleurs furent installés en Angleterre, dirigés vers les avions allemands.

Ce type d'émetteur fut aussi utilisé à la fin de la guerre pour la construction des premiers émetteurs de télévision en couleur qui, étant donnée la grande largeur de bande nécessaire, fonctionnent précisément dans le même domaine de longueur d'onde.

² Cette histoire est racontée en détail dans Maurice DELORAINE, *Des ondes et des hommes : jeunesse des communications et de l'ITT*, Flammarion, 1974 et Kathleen BROOME WILLIAMS, *Secret Weapon : US High-Frequency Direction Finding in the Battle of the Atlantic*, Annapolis, Naval Institute Press, 1996. Ce dernier ouvrage met en évidence le rôle majeur des ingénieurs français.

LES ANTENNES CAROLINE ET LES DÉTECTEURS DE RADARS BD1 / ARBR / ARAR / ARUR

Bernard DELAPALME

La grande aventure du siècle passé est sans doute celle de l'électronique : on la rencontre dans la rue avec les téléphones mobiles ou les voitures, dans les maisons avec la télévision et les ordinateurs, dans les loisirs avec le DVD, la télévision numérique, le football pour tous et les *Playstation*, comme dans la guerre avec toutes sortes de mesures et de contre-mesures, et toutes sortes d'armes qui n'existeraient pas sans elle, enfin dans la santé avec les explorations du corps humain qu'elle permet.

Au milieu de tout cela, l'histoire de l'antenne Caroline et du détecteur de radar peut paraître une bien mince affaire. Elle a toutefois l'avantage de mettre en évidence un certain nombre de personnages, plus ou moins connus, mais qui méritent de l'être, car ils ont joué un rôle important dans ce siècle, et aussi de dérouler quelques fils de l'histoire qui, eux aussi, ont eu leur importance dans une période exceptionnelle.

Enfin, cette petite histoire présente l'intérêt de se situer juste au milieu d'un siècle qui a commencé en 1900 par le célèbre brevet de Marconi sur la transmission des ondes électromagnétiques, ainsi que par l'invention du tube à vide à trois électrodes³, et s'est terminé en 2000 avec la véritable explosion d'Internet.

Les années 1950 représentent d'ailleurs un tournant dans cette immense histoire, puisqu'elles voient à la fois l'invention du transistor (en 1948, par l'Américain Shockley), celle du laser (peu

³ Pierre DESCAVES et A.V.J. MARTIN, *Un siècle de radio et de télévision*, ORTF et Productions de Paris, 1965.

d'années après, par Townes, toujours aux États-Unis), et le développement explosif des calculatrices électroniques.

LE CNET MARINE À GRENOBLE (1949-1951)

LES ANTENNES CAROLINE

Lorsque j'arrive au mois d'octobre 1949 à Grenoble, pour prendre la direction de l'annexe du laboratoire radio-radar CNET Marine, ce n'est ni parce que j'ai une vocation maritime, ni parce que je suis passé par l'École polytechnique, mais parce que j'ai, dès ma jeunesse, été saisi par la passion de l'électronique : je m'amusais avec les postes à galène, puis les postes radio amateurs, comme on joue aujourd'hui avec les *Playstation* et les *Pokemon*...

Cette passion m'avait conduit à apprécier suffisamment la physique pour pouvoir être reçu à l'X, et à choisir le génie maritime à la sortie, parce qu'un vieux sénateur visionnaire m'avait assuré que l'armée était l'un des endroits où les passionnés de l'électronique trouveraient le plus vaste champ d'action.

Lors de mon départ de Paris pour Grenoble, l'ingénieur général Sabine, directeur adjoint de la Direction centrale des constructions et armes navales, m'avait dit ne pas avoir d'instructions particulières à me donner, sinon celle d'exploiter au mieux les connaissances de quelques ingénieurs allemands que la Marine avait rassemblés là, et de tirer profit de l'existence d'une brillante université, « voire, si vous avez du temps, d'y passer quelque licence scientifique ». Le directeur du laboratoire de Paris, l'ingénieur Pierre David, n'avait, dans mon souvenir, guère été plus précis.

En arrivant à Grenoble, je trouvais un laboratoire assez rudimentaire, où une demi-douzaine de personnes travaillaient un peu à l'étroit, l'atelier étant situé sur le palier du dernier étage de l'Institut Fourier. Il y avait là deux ingénieurs, un technicien et un ouvrier allemands, deux ouvriers et un « homme à tout faire » français. Les Allemands provenaient d'un laboratoire situé sur le lac de Constance, où Yves Rocard était allé les dénicher. Ces chercheurs allemands travaillaient principalement sur deux

programmes : la recherche de matériaux absorbeurs d'émission radar et l'amélioration d'un détecteur de radar rudimentaire, les deux dispositifs ayant été utilisés à la fin de la guerre par les sous-marins allemands.

Yves Rocard était un ami de Louis Néel, et cela a pu jouer un rôle dans le choix de Grenoble. En effet, dans des locaux voisins des nôtres à l'Institut Fourier travaillait alors le professeur Néel, physicien de 45 ans, déjà largement connu en Europe et spécialiste des problèmes de magnétisme. Il avait, lors de la déclaration de guerre, été requis par la Marine pour réaliser la démagnétisation des navires de guerre, et ses travaux avaient donné d'excellents résultats. Il fut, en 1951, l'un des premiers bénéficiaires du titre de « conseiller scientifique de la Marine nationale »⁴, créé cette même année : il le resta pendant trente ans. Les travaux sur le ferro- et ferrimagnétisme que le professeur Néel menait à l'époque de mon arrivée le conduisirent, en 1972, à recevoir le prix Nobel de physique.

Il était aidé dans la gestion de son laboratoire par le professeur Louis Weil, spécialiste des très basses températures, homme remarquablement dynamique, qui fut à l'origine de l'un des principaux laboratoires de recherche de la société Air Liquide, située à Grenoble. Une rue de la ville porte d'ailleurs son nom, et le site du CENG celui de Louis Néel. Le directeur de l'Institut polytechnique de Grenoble, dont dépendait l'Institut Fourier, Félix Esclangon, était également un homme de grande qualité, qui trouva malheureusement la mort en effectuant une démonstration d'électrostatique avec un parapluie, devant des élèves ébahis.

Quelqu'un m'avait dit dès le début que la Marine n'était pas satisfaite de ses antennes de communication radio : d'origine américaine, elles étaient trop chères et pas assez performantes ; la Marine serait donc heureuse que l'on en produisît qui fussent meilleures et moins coûteuses, « meilleures » signifiant « recevant avec un bon rendement dans la plus large gamme de fréquences possible ». Cette qualité se mesurait par l'impédance, fonction de

⁴ Ce titre était assimilé au grade d'ingénieur général de l'armement de 2^e classe.

la fréquence de l'onde envoyée ou reçue. Dans l'idéal, elle devait être telle que l'onde envoyée par l'émetteur, par exemple, soit entièrement expédiée dans l'espace sans rebondir, même partiellement, en arrivant sur l'antenne.

Or, il se trouvait que « mes » Allemands avaient mis au point un appareil un peu compliqué, un « impédancemètre à ligne à retard », qui permettait de connaître instantanément, par la position d'un point au sein d'un cercle qui apparaissait sur un oscilloscope (cercle appelé diagramme de Smith, cf. figure 1), la valeur de l'impédance d'un objet branché sur l'appareil, et ce pour la fréquence issue d'un générateur d'ondes également branché sur cet appareil. Si le point était au centre du cercle, l'impédance était parfaite. S'il était sur la circonférence, elle était exécrationnelle, et l'objet réfléchissait complètement l'onde reçue au lieu de l'absorber.

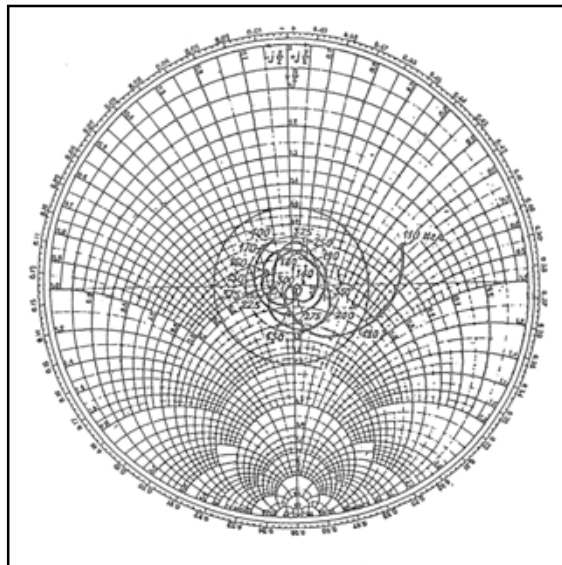


Figure 1

Dans la pratique, c'était à l'utilisateur de dire dans quel petit cercle concentrique du premier il souhaitait que le point se trouvât pour que l'objet (antenne ou absorbeur d'émission radar) fût considéré

comme satisfaisant. Comme l'impédance variait fortement avec la fréquence, la mesure devait être faite pour chaque fréquence de la gamme désirée. Pour les émissions radar, cette gamme était celle, supposée, des fréquences ennemies ; pour la radio, c'était celle des fréquences que l'on souhaitait « émettre ou recevoir » : elle devait être la plus étendue possible. Dans le cas de la Marine, l'idéal fixé était un rapport de 1 à 3, la gamme souhaitée allant de 100 à 300 MHz.

Lorsque je me penchai sur le problème des antennes, je m'aperçus qu'il était apparemment très compliqué. L'antenne élémentaire est un dipôle (fil conducteur en forme de T), de dimension idéale $L/2$, L étant la longueur d'onde correspondant à la fréquence émise. L'impédance pour une longueur d'onde différente doit être calculée. Dès que l'on s'éloigne de la fréquence correspondant à la dimension du dipôle, l'antenne devient de plus en plus mauvaise, et le point du diagramme de Smith s'échappe sur la circonférence extérieure (cf. figure 1). Pour avoir une bonne antenne dans une large gamme de fréquences, il fallait donc imaginer une antenne moins simple qu'un dipôle, mais le calcul devenait alors très compliqué. Quelques mathématiciens de l'université d'Uppsala, en Suède, s'étaient risqués à ce genre de calcul, mais je n'y comprenais rien.

Je fus alors sauvé par la lecture d'un cours d'électronique publié récemment en Europe : *Radio Engineering* de F. E. Terman, doyen de l'Institut de technologie de Stanford⁵.

Dans son livre, un chapitre de près de 100 pages est consacré aux antennes : fort clair et pratique, il explique que pour obtenir des antennes à large bande, il faut des dimensions importantes dans tous les sens, mais aucune indication de calcul n'est donnée. Nous eûmes alors l'idée d'essayer différentes formes, la mesure de l'impédance obtenue dans chaque cas étant facile et rapide avec notre analyseur d'impédances. L'agent technique qui travaillait

⁵ Frederick Emmons TERMAN, *Radio Engineering*, Mc Graw Hill, 1951. Pour la petite histoire, Terman avait eu pour élèves, en 1940, Hewlett et Packard, qu'il avait encouragés et aidés à créer leur entreprise dans un garage de Palo Alto.

sur l'appareil, William Luther, se mit à tailler des plaques de métal dans tous les sens pour que l'on puisse voir comment évoluait l'impédance en fonction des formes, et nous parvînmes finalement, et assez rapidement, à une forme tout à fait originale que j'appelai « Caroline » (cf. figure 2). L'imagerie populaire a voulu que je baptise notre antenne du nom d'une copine ; pourtant, c'est le roman de Jacques Laurent, *Caroline chérie*, qui faisait fureur à l'époque, qui est à l'origine du nom. De plus, l'antenne a une tête, une robe et deux bras.

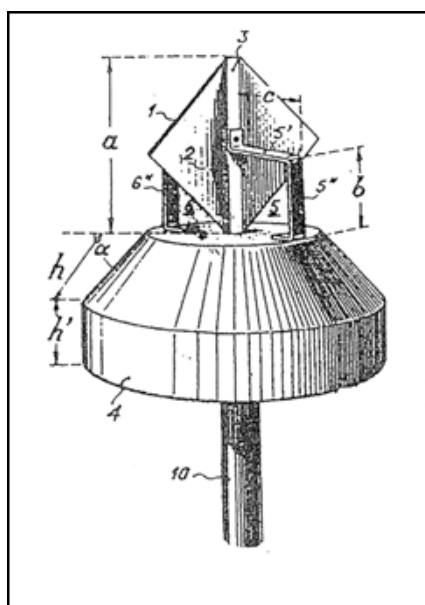


Figure 2

Toujours pour la petite histoire, on notera qu'à peu près à la même époque et à l'autre bout du monde, un ingénieur japonais nommé Yagi, qui travaillait dans un petit laboratoire dénommé Sony, mettait au point un type d'antenne bien différent, destiné au radar et à la télévision, et présentant non pas une large bande, mais une grande directivité, donc un grand gain. L'antenne Yagi, à la différence de Caroline, fut produite par la suite à plusieurs centaines de millions d'exemplaires et orne (ou si l'on préfère

défigure) les toits des maisons du monde entier. Les prémices de l'antenne Yagi se trouvent d'ailleurs également dans le livre de Terman.

1951-1956 : LE CNET MARINE (ISSY-LES-MOULINEAUX) LE DÉTECTEUR DE RADARS BD 1

Nous étions alors en 1951, et l'un des ingénieurs allemands avait décidé de regagner l'Allemagne. La Marine, de son côté, avait besoin de moi à Paris pour remplacer l'ingénieur du génie maritime Jacques Robert, qui donnait le cours d'électronique à l'École du génie maritime et venait d'être détaché au Département des piles du CEA. Il devint par la suite le premier directeur de la Direction des applications militaires, et joua un rôle majeur dans la mise au point de l'armement nucléaire. J'abordais avec quelque crainte cette nouvelle responsabilité, et je me sortis de cette affaire en ayant à nouveau recours à Terman, évitant ainsi tout développement mathématique trop obscur ou encombrant.

Nous fûmes installés à Issy-les-Moulineaux, dans un ancien central téléphonique, où nous étions un peu plus à l'aise qu'à Grenoble. Nous avons perdu le voisinage de scientifiques prestigieux, mais gagné celui des autorités parisiennes, et d'un radar qui fonctionnait à proximité.

Le premier développement que nous abordâmes fut celui des antennes Caroline. Les modèles que nous avons imaginés donnaient toute satisfaction à la Marine : ils avaient environ 1 mètre de haut, fonctionnaient dans une très large bande (de 110 à 400 MHz), et leur coût était peu élevé. Ce n'était en réalité qu'un assemblage un peu subtil de tôles perforées. La Marine en avait peu à peu fait équiper tous ses bâtiments de surface. Ils les utilisent d'ailleurs toujours : cette longévité de cinquante ans peut être considérée comme exceptionnelle pour un équipement « électronique ».

Il était probable que d'autres usages pouvaient être trouvés « une antenne à une autre fréquence centrale et ayant une bande de

même largeur relative pouvant s'obtenir par similitude »⁶. La première extension fut réalisée à Houilles, dans un centre de communication de la Marine, pour des longueurs d'onde moyennes, avec une antenne d'une vingtaine de mètres de haut.

C'est alors que les détecteurs de radars, dont nous ne nous étions guère occupés jusque-là, revinrent sur le tapis. Un de leurs problèmes était en effet que, ne connaissant pas la fréquence du radar que l'on cherchait à détecter, il fallait équiper le détecteur d'une antenne couvrant la plus large bande possible de fréquences, soit autour d'une longueur d'ondes de 3 cm, soit autour de 10 cm, qui étaient les principales bandes utilisées alors par les radars. Et Caroline, convenablement montée dans un guide d'ondes, pouvait répondre facilement à la question, à condition d'être réduite à $L/4$, c'est-à-dire une dimension de l'ordre du centimètre.

En plaçant l'antenne dans un guide d'ondes terminé par un cornet convenablement dessiné (cf. figure 3), on obtenait en plus une antenne ayant un diagramme de directivité convenable, son lobe principal pouvant avoir une forme satisfaisante compte tenu de la directivité et du gain. Ce gain avait une grande importance, le détecteur de radar ayant un désavantage sur le radar lui-même, puisqu'il n'en connaissait pas la fréquence.

Il fut alors décidé de placer un nombre assez grand d'antennes (huit), équidistantes les unes des autres autour d'un cercle, de façon à ce que les diagrammes de directivité de ces antennes se recourent convenablement (cf. figure 4).

C'est ici que prend place ce qui est sans doute l'aspect principal de l'invention : il fallait en effet que les réponses de chacune des antennes fussent amplifiées exactement de la même façon, faute de quoi la goniométrie était largement faussée. Cet inconvénient était d'autant plus grave que le nombre d'antennes était plus grand, pour une goniométrie plus précise. Les Allemands s'étaient heurtés sans succès à cette difficulté, ce qui n'était d'ailleurs pas

⁶ Bernard DELAPALME et William LUTHER, « Antenne à large bande », Brevet d'invention n° 1 068 412, demandé le 18 décembre 1952, délivré le 3 février 1954 et publié le 24 juin 1954.

très gênant pour eux, leur goniométrie étant très rudimentaire. La solution était en fait à notre portée, le même amplificateur pouvant être utilisé pour les huit antennes, en séparant leurs réponses justement à l'aide de la ligne à retard qui avait été utilisée dans l'analyseur d'impédances (et qui en était d'ailleurs la pièce maîtresse).

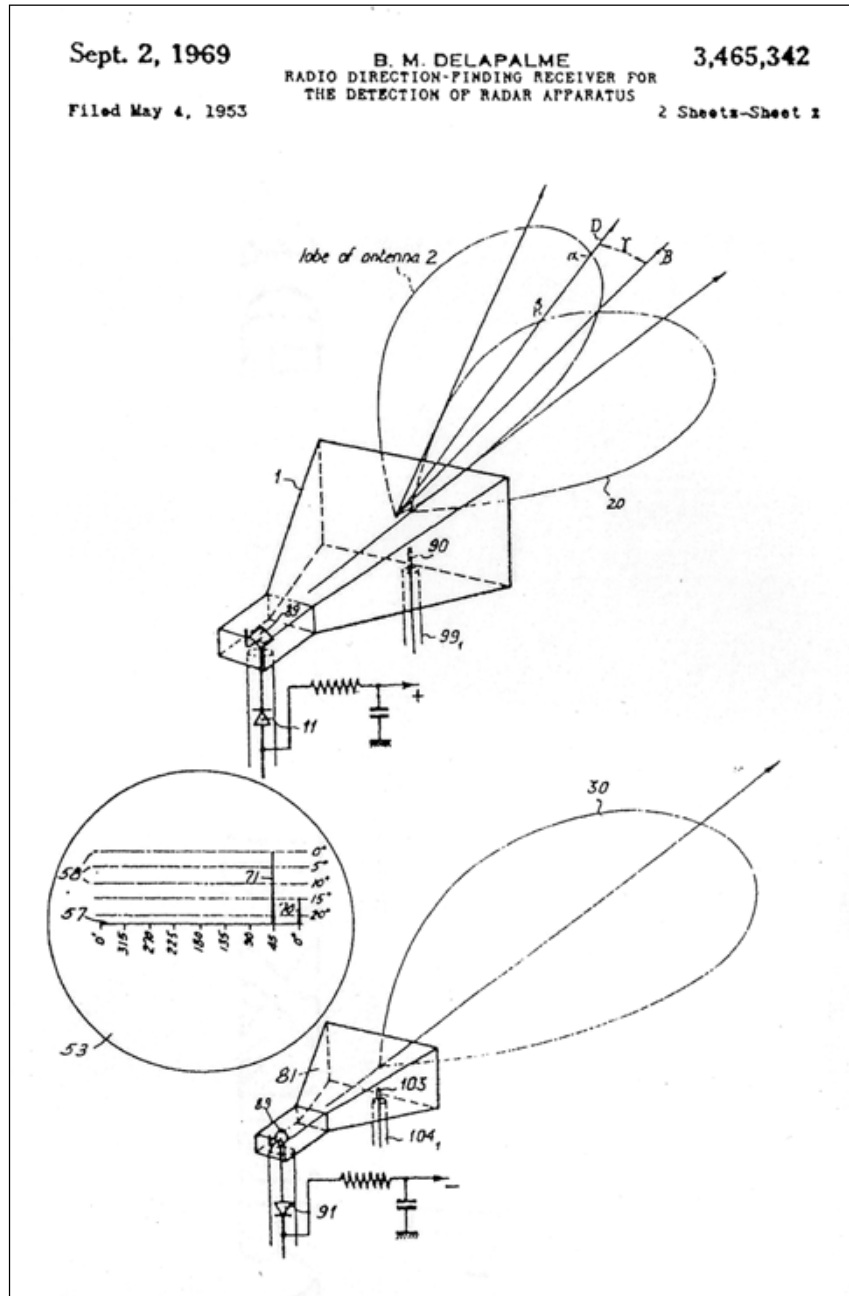


Figure 3

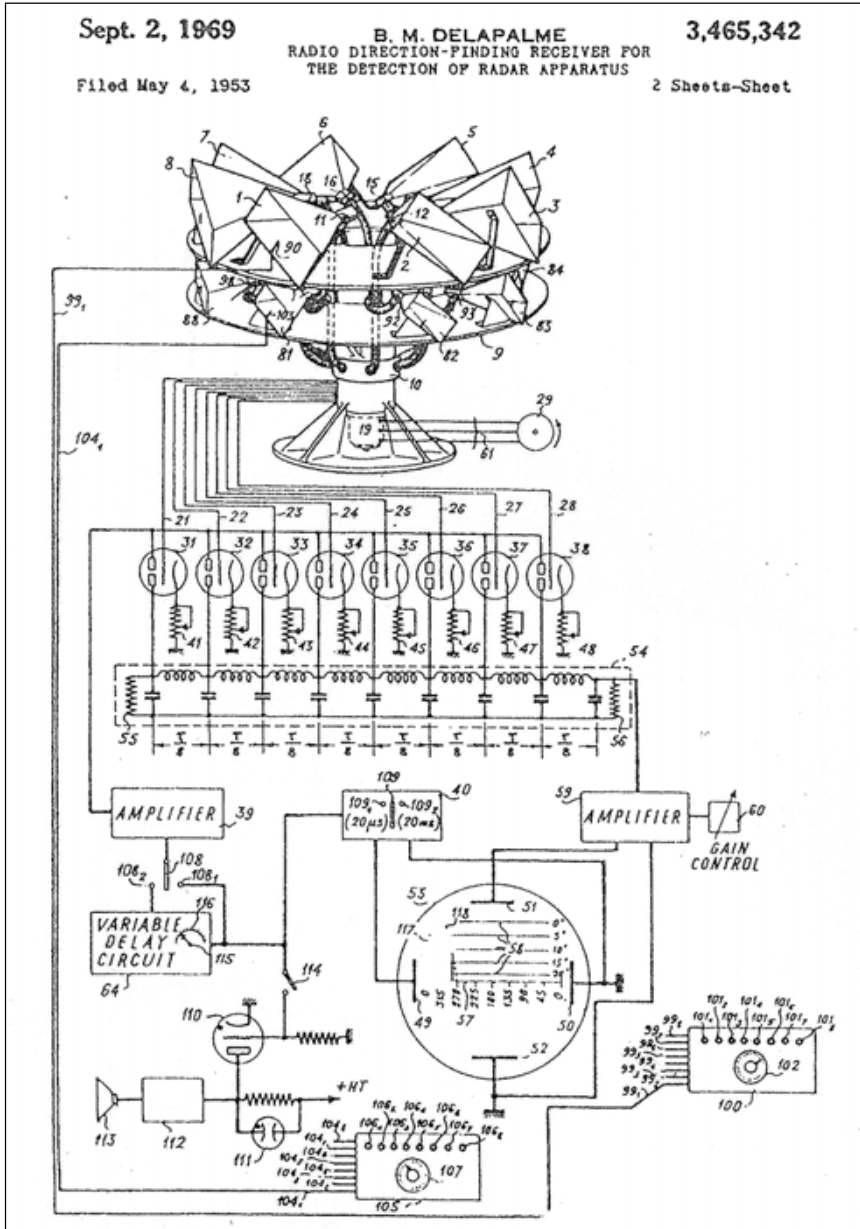


Figure 4

Le laboratoire disposait alors d'un ingénieur allemand habile et compétent, Robert Stasek, à qui je demandai de réaliser un appareil utilisant ces hypothèses, avec huit antennes disposées régulièrement sur une circonférence, ce qui devait permettre une géométrie précise à quelques degrés près (cf. figure 4). Les détails de réalisation de cet appareil peuvent être trouvés dans le brevet qui fut pris à cette occasion⁷.

Ce prototype, que j'appelai BD1, d'après mon nom, fut réalisé assez rapidement au cours de l'année 1952, essayé sur le radar voisin, dont nous suivions ainsi l'activité, puis à Toulon, sur les escorteurs *Somali* et *Sakalave*, ainsi que sur le *Guichen*. Je réalisai ultérieurement des essais sur un sous-marin, et aidai à une occasion à ramener le bâtiment à bon port en le guidant sur les radars de Toulon, pour la plus grande joie de tous. Les appareils réalisés par la suite par la société Sadir Carpentier furent baptisés ARBR pour les bâtiments de surface, ARUR pour les sous-marins, et enfin ARAR lorsque les Bréguet Atlantic en furent équipés.

La phase des essais en mer ne fut pas, et de loin, la plus simple, tant il est vrai que, pour citer Paul Valéry, « le difficile n'est pas de trouver mais de s'ajouter ce que l'on a trouvé ». Parmi les difficultés rencontrées, j'en citerai une, majeure : le risque de brûlage par les radars de bâtiments voisins des cristaux de silicium situés dans les antennes de réception. Je me souviens également d'un essai que j'ai réalisé sur un navire anglais au large de Portsmouth : l'appareil ayant été humidifié au cours d'une tempête, je dus le rendre à la vie à l'aide d'un sèche-cheveux.

Je parle de Portsmouth parce que les spécialistes de l'OTAN s'étaient assez rapidement intéressés à nos appareils, qui leur avaient été présentés au cours de la visite à Toulon d'une délégation emmenée par l'ingénieur général Giboin. Cet intérêt m'amena, outre les expériences sur des bâtiments anglais, à réaliser, avec l'ingénieur du génie maritime Albagli, une mission aux États-Unis, au cours de laquelle nous fûmes véhiculés par un

⁷ Bernard DELAPALME, « Radio direction-finding receiver for the detection of radar apparatus », brevet américain n° 3 465 342.

avion militaire américain, ne montrâmes aucun passeport, et restâmes enfermés pendant une semaine dans le Pentagone.

Tout cela nous conduisit à protéger ces inventions par des brevets. La Marine était habituée à ce genre de problèmes, ayant traité récemment le cas de l'ingénieur de l'armement Bernard Cuny, qui avait mis au point toute une gamme d'appareils d'optique remarquables. Elle disposait d'un agent de brevets compétent, M. Martinet, à qui fut confiée l'affaire, et qui découvrit mille merveilles dans nos réflexions. Un brevet fut déposé en France pour l'antenne Caroline, antenne à large bande, sous le numéro 1 068 412, le 18 décembre 1952 à 16 h 59, aux noms de Bernard Delapalme et William Luther. Il fut délivré le 3 février 1954 et publié le 24 juin 1954.

Le cas du détecteur de radar fut plus compliqué, du fait de son objet et de l'intérêt de l'OTAN, qui amena à protéger l'invention en Grande-Bretagne et aux États-Unis. Le brevet américain fut déposé en mai 1953, sous le numéro 3 465 342, accordé et mis au secret à une date que j'ignore, et rendu public (contrairement au brevet anglais) le 2 septembre 1962. À partir de sa mise au secret, je n'en ai plus entendu parler. Toutes les discussions relatives à cette affaire eurent lieu sous l'autorité remarquable de l'ingénieur général Ragonnet.

Un des aspects les plus intéressants et importants pour moi, dans toute cette affaire, fut constitué par les rapports établis, à cette occasion, avec les officiers de Marine chargés des essais : les lieutenants de vaisseau Emmanuel de Robien, Hubert Dubedout, Michel Cordelle et François Rossillon.

J'aurais pu, et peut-être dû, m'arrêter là dans ma présentation car, au début de l'année 1956, je fus détaché par la Marine auprès du CEA, et les détecteurs de radar furent développés par l'ingénieur du génie maritime Margier, qui résolut en particulier les difficiles et importants problèmes du brûlage des cristaux de détection et de la mesure de la fréquence des radars détectés.

Mais le plus intéressant n'aurait peut-être pas été dit, car il se déclencha alors un processus qui conduisit, plus ou moins directement, à la création de la société européenne

ST Microelectronics, que le marché évaluait, en avril 2000, à 50 milliards d'euros, soit 25 fois Bull, 7 fois Thomson-CSF et 5 fois le groupe Lagardère.

LE CENTRE D'ÉTUDE NUCLÉAIRES DE GRENOBLE
LE PÉRIL BLEU – LES TRAVAUX DU PLAN
LE LABORATOIRE D'ÉLECTRONIQUE (1955-1964)

Peu après mon arrivée à Grenoble en 1949, le professeur Weil m'avait invité à présenter l'analyseur d'impédance mis au point par notre laboratoire, lors d'une réunion de la Société de physique qui se tint à l'Institut Fourier le 17 avril 1950, sous la présidence de Louis Néel. Je fis alors plus ample connaissance avec ce dernier, et ce fut le début d'une longue, agréable et profitable collaboration.

Au cours de l'année 1955, bien après mon retour à Paris, Pierre Guillaumat, alors administrateur général du CEA, et Francis Perrin, haut commissaire, demandèrent à Louis Néel de créer, à Grenoble, un centre de recherches nucléaires destiné à resserrer les liens entre le CEA et l'Université. Ce centre était prévu pour recevoir un ou deux réacteurs de recherche et 200 personnes. Louis Néel disposait d'une très large autonomie, tant en ce qui concernait les programmes que la gestion du centre⁸.

Toutefois, Pierre Guillaumat lui demandait de s'adjoindre un ingénieur afin d'assurer un intérêt suffisant pour les applications de la recherche. Néel me demanda alors, par l'intermédiaire du professeur Weil (lettre du 30 décembre 1955), si je pourrais envisager de remplir ce poste. Je rencontrai le professeur Néel au cours d'un petit-déjeuner, et je lui fis part du doute que j'avais concernant ma capacité à conduire un centre de 200 personnes, alors que, jusqu'à présent, je n'en avais dirigé que moins de 10. Louis Néel me répondit « ça, c'est mon affaire et pas la vôtre : c'est votre opinion et pas la mienne ». L'affaire fut conclue et,

⁸ Louis NÉEL, *Un siècle de physique*, Odile Jacob, 1991.

comme je m'étais marié en mai 1956, je partis avec ma femme au début de l'été pour Grenoble, ayant changé, dans la même année, d'état-civil, de travail, de patron et de résidence.

Le Centre d'études nucléaires de Grenoble avait été doté, dès sa création en 1955, d'un très grand terrain (dit du polygone) situé à l'entrée de Grenoble, et de conseillers scientifiques éminents choisis dans son université par le professeur Néel. Il restait à concevoir et construire les programmes et les bâtiments et, plus important encore, à constituer les équipes de chercheurs et d'ingénieurs.

Je pensais alors à mes amis de la Marine et, événement remarquable, le professeur Néel et le CEA m'autorisèrent à embaucher cinq « poids lourds » pour remplir les principaux postes de direction correspondant à l'organigramme mis au point : Michel Cordelle fut chargé de l'électronique, Emmanuel de Robien de la sécurité et de l'environnement, Hubert Dubedout des relations publiques, François Rossillon de la construction du réacteur de recherche Mélusine, puis de son fonctionnement ; et, *last but not least*, conseillé par ses collègues, je fis venir également Guy Denielou, brillant officier de marine qui, pour devenir commandant d'un sous-marin nucléaire, suivait des cours d'énergie nucléaire au CEA, et qui préféra finalement venir à Grenoble s'occuper du développement des réacteurs de recherche.

Ces cinq personnages, qui constituaient ce que le CEA appelait à l'époque « le péril bleu », s'acquittèrent à merveille de leurs fonctions et eurent tous une carrière exceptionnelle : Michel Cordelle, créateur et pendant longtemps animateur du LÉTI (Laboratoire d'électronique et du traitement de l'information, qui fit partie des prémices de la société ST Microelectronics) ; Emmanuel de Robien, directeur de la stratégie et de la prospective de la société Bull ; Hubert Dubedout, maire de Grenoble puis président des Charbonnages de France ; François Rossillon, directeur du principal centre de recherche de la Direction des applications militaires à Bruyère-le-Chatel ; Guy Denielou enfin, après avoir conçu le grand réacteur de

recherche du CEA, Siloe, dirigea la mise au point du réacteur à neutrons rapides Rhapsodie, puis m'aida à mettre sur pied l'université de Compiègne, en devint le premier directeur et lui donna sa véritable dimension.

J'ajoute en passant que, lors de la construction du premier réacteur de recherche Mélusine, mon correspondant au CEA était Jacques Robert, dont j'avais pris la suite à l'École du génie maritime, et qui était l'adjoint du professeur Yvon, directeur du Département des piles au CEA.

C'est à cette époque que les chercheurs des *Bell Laboratories*, aux États-Unis, avaient découvert le transistor, premier élément de la chaîne immense qui aboutit à toute l'électronique moderne. C'était, comme chacun sait, un mélange de physique du solide et d'électronique, destiné à remplacer les tubes à vide, lampes à électrodes, triodes, pentodes, etc., dont les performances ne suffisaient plus pour satisfaire les créateurs de calculatrices électroniques. Or nous avions au CENG des spécialistes de physique du solide (Louis Néel en tête) et d'électronique (sous la direction de Michel Cordelle).

À la suite d'un entretien dont je me souviens encore, le professeur Néel et moi-même décidâmes de demander à un physicien des équipes Néel (Daniel Dautreppe) et à Michel Cordelle de créer une équipe pour évaluer les possibilités et l'avenir de ces nouvelles techniques. Il en résulta, après la création de la section d'électronique au CENG en 1957, celle du LÉTI en 1967, sous l'autorité de Michel Cordelle⁹, puis du premier *spin off* du LÉTI en 1972 : la société EFCIS. Finalement, Thomson prit dans EFCIS une participation de 30 %, puis de 50 %, puis de 100 % ; le regroupement de l'activité semi-conducteurs de Thomson avec celle de la CSF, puis de la société italienne SGS-Microelettronica, donna naissance, en 1992, à

⁹ Michel Cordelle eut pour successeurs Jacques Lacour, puis l'ingénieur de l'armement Denis Randet, gendre de l'ingénieur général Cuny dont j'ai parlé plus haut.

ST Microelectronics, dont j'ai souligné précédemment l'importance¹⁰.

Nouvel événement : Pierre Guillaumat quittait en 1958 la direction du CEA pour devenir ministre des Armées du général de Gaulle, Michel Debré étant Premier ministre. Pierre Guillaumat était alors très au courant des activités du CENG, et j'avais eu de nombreux contacts avec lui. Il me demanda de réaliser une étude sur « les liaisons de l'industrie électronique française avec la Défense nationale », étude réalisée sous l'autorité de l'ingénieur général des télécommunications Labrousse, dans le courant de l'année 1959. Les conclusions étaient assez sévères et mettaient en évidence un grand déséquilibre entre l'activité de développement de l'industrie électronique à l'étranger (notamment aux États-Unis) et l'intérêt porté par les pouvoirs publics français à ce secteur de l'industrie.

Le ministre informa alors de cette situation le commissaire général au Plan Pierre Massé (qui fut, avec Gaston Berger, un des créateurs de la réflexion prospective en France), et me demanda de lui proposer des remèdes, mon correspondant au Plan étant son directeur financier, Jean-Paul Delcour, qui devint par la suite président de la Société nationale des pétroles d'Aquitaine. De ces discussions naquit la première Commission permanente du Plan (Commission permanente de l'électronique du Plan, ou COPEP), présidée par l'amiral Conge, et animée par une équipe comptant en particulier, outre moi-même, Jean Carteron (qui fonda par la suite le groupe Steria), André Danzin et Robert Lattès.

L'un des premiers travaux réalisés par la COPEP fut une note sur les calculatrices électroniques (n° 63 107, septembre 1963), qui conduisit l'amiral Conge à faire des recommandations très insistantes aux pouvoirs publics, et notamment au ministre des Finances de l'époque, Valéry Giscard d'Estaing, en particulier à l'occasion de « l'affaire Bull ». Dans une communication de 1995

¹⁰ Benoît PLAYOUST, *De l'atome à la puce. Le LÉTI : trente ans de collaboration recherche-industrie*, Libris, 1998.

au sujet de ces affaires¹¹, Jean Saint-Geours écrit : « En 1963, sous la présidence de l'amiral Conge, la COPEP produisit une note confidentielle sur les calculatrices électroniques qui esquissait les premiers linéaments du Plan calcul ». Malheureusement, ce Plan calcul, qui fut fameux à l'époque, ne conduisit pas à grand chose.

Dans ce même colloque, Pierre Mounier-Kuhn s'exprimait ainsi : « Ma courte intervention débouche sur deux questions : dans les archives de la DGRST et de la COPEP se trouvent de multiples rapports, rédigés à partir de 1962 (analyse de conjoncture, études prospectives, recommandations, projets d'association entre les entreprises pour développer l'industrie informatique française). En les relisant aujourd'hui, on ne peut qu'être frappé par la lucidité dont ils témoignent. Or, il semble qu'à partir de 1965, tout ce capital d'expertise est écarté ou mis dans les tiroirs, et que la définition de la stratégie du Plan calcul n'en bénéficie pas ».

Ces événements se terminèrent pour moi par un bref entretien que j'eus avec le général de Gaulle en 1965. Il me demanda quelle idée me paraissait majeure dans la situation française en matière de recherches. Je répondis que c'était la situation de la recherche dans l'industrie électronique et informatique. Je lui suggérai alors, à sa demande, d'accorder plus d'importance qu'on ne l'avait fait jusqu'à présent à ce secteur vital, en lui affectant les moyens en hommes et en crédits qu'il méritait, comme on l'avait fait avec succès pour le secteur de l'atome. Comme nos ingénieurs et nos chercheurs étaient très en retard dans ce domaine sur les Américains, je préconisai d'envoyer le plus vite possible les meilleurs des jeunes Français aux États-Unis pour qu'ils étudient et s'informent. Mais le général, qui aimait le nucléaire et pas les Américains, ne trouva manifestement pas ma remarque judicieuse. J'ai eu cependant la consolation d'apprendre tout récemment que l'administrateur général du CEA, Pascal Colombani, avait déclaré

¹¹ Reproduite dans les actes du colloque *Informatique, politique industrielle, Europe : entre Plan calcul et Unidata*, Institut d'histoire de l'industrie, Éditions Rive droite, 1998.

vouloir donner au Commissariat une vigoureuse impulsion en direction de l'électronique.

APRÈS 1965

LES CENTRES DE PROSPECTIVE ET D'ÉVALUATION

LE GROUPE 1985

Mais les rapports sur l'électronique avaient eu une autre conséquence heureuse. Pierre Massé, le commissaire au Plan, intéressé par cette application de la méthode prospective à un secteur majeur et nouveau de l'économie, avait demandé à Pierre Guillaumat, alors président de l'ERAP, embryon d'Elf-Aquitaine, de présider un groupe de travail consacré à une étude prospective de la France dans 20 ans. Ce fut le Groupe 1985, composé d'une dizaine de personnalités éminentes, parmi lesquelles Jean Bernard, Jean Fourastié, Bertrand de Jouvenel, Eugène Claudius-Petit, Marcel Demonque, Philippe Lamour. Notre correspondant au Plan était Jacques Delors, responsable des affaires sociales, tandis que Pierre Massé assistait lui-même à toutes les séances (il y en eut plusieurs dizaines). Pierre Massé avait suggéré à Pierre Guillaumat de m'utiliser comme rapporteur général, et avait également suggéré de m'adjoindre un jeune auditeur à la Cour des Comptes, qui travaillait alors au cabinet du Premier ministre : Jérôme Monod.

Le rapport *Réflexions pour 1985* fut tiré à plus de 100 000 exemplaires (le projet initial étant de 300, réservés au personnel du Plan) et eut quelque retentissement et quelques conséquences, plus ou moins directes. L'une d'elles, demandée par Pierre Guillaumat en conclusion du rapport, fut la création au sein de deux ministères (Armées et Affaires étrangères) de centres de prospective et d'évaluation. Aux Armées, dont Pierre Messmer était alors le ministre, le poste fut d'abord occupé par l'ingénieur de l'armement Hugues de l'Estoile, qui devint par la suite directeur des affaires internationales du ministère, puis du groupe Dassault ; aux Affaires étrangères, ce fut Thierry de Montbrial, actuellement professeur à l'X, directeur de l'IFRI et membre de l'Institut ; lui succéda Jean-Louis Gergorin, qui devint par la suite

membre du directoire du groupe Lagardère, où il est responsable de la stratégie.

Si je peux donner l'impression de m'être éloigné de mon sujet, j'ai pour excuse d'avoir tenté de dérouler un fil de l'histoire : Caroline, qui engendra BD 1, qui engendra la COPEP, qui engendra le rapport 1985, qui conduisit aux centres de prospective de l'administration, mais qui engendra aussi le Plan calcul qui ne conduisit à rien du tout. Et Caroline qui, dans une autre filiation, conduisit également au CENG, qui engendra le LÉTI, qui conduisit à ST Microelectronics.

Peut-être pourra-t-on tirer de tout cela une morale : à la pensée de Valéry que j'ai déjà citée, on peut adjoindre – plus important peut-être encore – le titre du livre d'Alain Peyrefitte qu'il préférerait, bien qu'il ne fût pas le plus connu : *La société de confiance*. Car, si ce qui se produisit d'intéressant le fut, c'est que Pierre Guillaumat fit confiance à Louis Néel, que Pierre Guillaumat et Louis Néel me firent confiance, que Pierre Massé fit confiance à Pierre Guillaumat et Jérôme Monod, que je fis, pour ma part, confiance à mes amis de la Marine, et qu'ainsi nous travaillâmes tous utilement, dans la liberté et dans la joie.

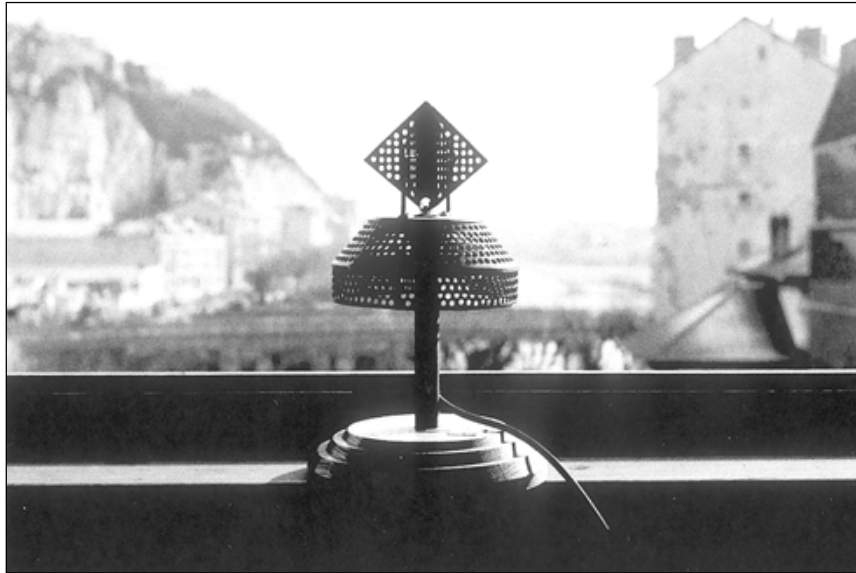
Documents complémentaires¹²



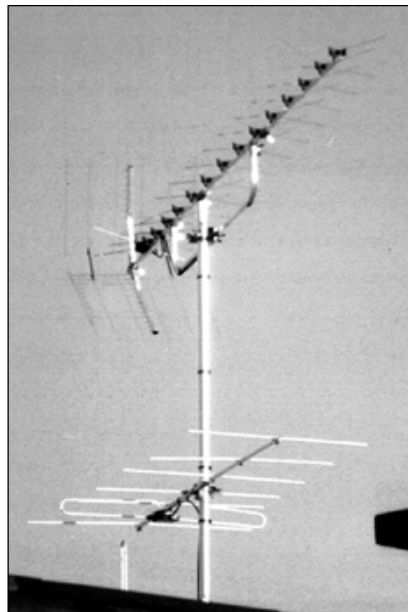
L'atelier du laboratoire CNET Marine à Grenoble, en 1950

¹² Les figures 1 à 4, dans le texte, comme les photographies qui suivent (prises par l'auteur) appartiennent aux collections personnelles de M. Delapalme.

Les antennes Caroline et les détecteurs de radars...



Maquette de l'antenne Caroline. Vue prise de l'Institut Fourier



Une antenne Yagi moderne



Les antennes Caroline pour ondes moyennes à Houilles



Hubert Dubedout et François Rossillon présentent le réacteur nucléaire Mélusine au ministre allemand de l'Énergie nucléaire

LA GUERRE ÉLECTRONIQUE
FACE AUX
NOUVELLES MENACES

La GUERRE ÉLECTRONIQUE DANS LES UNITÉS AÉRIENNES DE COMBAT DE L'ARMÉE DE L'AIR 1950 – 1980

Michel FORGET

Je vais évoquer la façon dont la guerre électronique (GE) a été perçue et conduite au sein des unités aériennes de combat de l'armée de l'Air de 1950 aux années 1980.

Deux dates marquent l'émergence du souci de la GE au sein des ces unités aériennes de combat : 1964 pour les unités des forces aériennes stratégiques (FAS), et 1972 pour les autres.

Jusqu'à ces dates, aucun équipement spécifique de GE n'existait sur les appareils des unités concernées. La GE se limitait, pour les équipages, à appliquer des procédures d'évasion de fréquence en cas de brouillage radio. Cela ne signifie pas que jusque-là, la GE n'était pas un sujet de préoccupation pour l'armée de l'Air. Mais pour celle-ci, en Europe en tout cas, dans le contexte de la guerre froide, il s'agissait beaucoup plus de relever des indices d'alerte, par des écoutes radio-radar à partir de stations au sol, que d'assurer, par un équipement spécifique de contre-mesures, la pénétration des avions d'attaque.

Le fait que ces appareils volent à basse altitude et à grande vitesse était censé leur permettre d'échapper aux défenses adverses : cette conception était acceptable jusqu'aux années 1960, dans la mesure où la menace des missiles sol-air soviétiques était faible, sinon inexistante. Les SA 2, adaptés à la moyenne et haute altitude seulement, sont apparus en 1959. Le SA 3 apparaît pour sa part en 1963. Ensuite, les Soviétiques développent un nouveau système d'armes pratiquement tous les deux ans et demi, du SA 4

au SA 12. Quant aux missiles sol-air adaptés à la basse altitude, les SA 7, ils n'apparaissent qu'en 1968.

Il faut enfin rappeler que l'armée de l'Air a créé ses trois premières stations d'écoute radio-radar sol respectivement en 1954 à Achern, en 1958 à Berlin et en 1962 à Goslar. Le dispositif fut complété ultérieurement en 1967 et en 1968 par la création des Escadrons électroniques sol (EES) de Bad Lauterberg et de Fürth im Walde, sur la frontière tchèque.

1964 est l'année où est créé le premier escadron de Mirage IV, alors composante unique de la Force nucléaire stratégique (FNS). Il s'agit d'assurer la pénétration à haute altitude de ces appareils au-dessus de territoires fortement défendus par des intercepteurs et aussi par des missiles sol-air. Les SA 2 et SA 3 sont déjà déployés en URSS, en attendant la mise en service des SA 4 en 1967, et des SA 6 en 1970 : d'où l'équipement de ces appareils en moyens de contre-mesures électroniques (CME) d'autodéfense, à savoir essentiellement des brouilleurs bande X contre les intercepteurs (Agacette) et des brouilleurs de radars de conduite de tir des missiles sol-air SA 3 et SA 6 (Mygale et Agasol). Ces systèmes furent améliorés tout au long de la vie des Mirage IV, et d'autres furent ajoutés.

Ce souci de la GE se traduit également par la proposition, en 1967-1968, par le chef d'état-major de l'armée de l'Air, du programme RAGEL (avion de reconnaissance, d'attaque et de guerre électronique lointaine), considéré comme un successeur du Mirage IV. La guerre électronique doit alors être aussi bien défensive qu'offensive (surveillance électronique et brouillage à grande capacité).

Ce programme s'est heurté à l'opposition de l'état-major des armées, de la DMA et du ministère de la Défense et a été rapidement abandonné. Le besoin en renseignement électronique n'en demeurait pas moins réel : d'où la décision de l'EMA, à la fin des années 1960, d'acquérir un avion de « renseignement électronique », capable avant tout de satisfaire le besoin des FAS dans ce domaine.

Ce fut le programme du DC 8 SARIGUE (système aéroporté de recueil d'information de guerre électronique), quadriréacteur à grand rayon d'action et volant à très haute altitude. Pour des raisons budgétaires, on passa d'un programme de trois appareils à un seul. L'expérimentation du DC 8 SARIGUE, dont la fiche programme, élaborée par l'EMAA, date de 1972, a commencé en 1973. L'appareil a été déclaré opérationnel en 1977. Un DC 8 SARIGUE de nouvelle génération devrait être mis en service en 2001.

1972 constitue une seconde date clé, qui concerne l'aviation tactique. À cette date, l'armée de l'Air tire en effet les enseignements de la guerre du Vietnam. L'aviation américaine s'y est heurtée à un adversaire dont l'espace aérien était électroniquement bien couvert, et défendu par une artillerie antiaérienne et une artillerie sol-air équipées « à la soviétique », particulièrement redoutables pour les avions tactiques : les approches à très basse altitude et très grande vitesse, avec cabré au dernier moment pour fondre sur la cible, se sont révélées suicidaires.

En 1967, les États-Unis ont perdu 326 appareils au-dessus du Nord-Vietnam, dont 85 % du fait de la défense sol-air : d'où un bouleversement dans les modes d'attaque et les équipements des appareils. La densité de l'artillerie antiaérienne (les premiers ZSU avec radar de conduite de tirs sont apparus en 1965) a conduit à interdire les pénétrations à moins de 4 000 pieds. Il s'agissait en conséquence de s'assurer la maîtrise de la moyenne et haute altitude, grâce à un développement considérable des moyens de recueil du renseignement électronique et des systèmes défensifs et offensifs des contre-mesures électroniques.

Cela explique la généralisation des indicateurs de menace à bord des appareils de l'*US Air Force* et de l'*US Navy* : lanceurs de paillettes et brouilleurs électroniques défensifs ; développement d'appareils spécialisés en CME offensive (brouillage à large bande, lance-paillettes à grande capacité EB66 / B52 /EA6A et B). De même étaient constitués des escadrons spécialisés dans l'attaque des radars *wildweasel*, équipés de missiles anti-radar

(*Shrike*). Il y eut également un changement de tactique : aux patrouilles isolées succédaient des dispositifs complexes où, pour un avion d'attaque, on comptait trois ou quatre appareils d'accompagnement, dont des avions spécialisés en GE offensive. En 1972, au-dessus du Nord-Vietnam, les pertes américaines furent dix fois inférieures à celles de 1967.

À la lueur de ces enseignements, vers la fin de 1972, un comité de GE se réunit à l'EMAA et décida d'équiper les avions de la FATAC en moyens de CME défensive (auto-protection). Il chargea également ce grand commandement de la mission d'aide à la pénétration de ses propres appareils offensifs, par la mise en œuvre de brouilleurs électroniques à large bande et de lance-paquettes à grande capacité, mais également du missile anti-radar Martel AS37.

La FATAC disposait déjà d'une structure de GE : le Bureau de guerre électronique (BGE), au sein de l'état-major. S'y ajoutait une unité spéciale, le Groupe électronique tactique (GET), créée en 1966 et stationnée à Metz, chargée dès cette époque de centraliser l'exploitation des renseignements des EES obtenus par les sept N 2501 équipés en COMINT (*Communication Intelligence*) et ELINT (*Electronics Intelligence*). Les trois premiers appareils de ce type avaient été déployés dès 1964, à Lahr. Ces N 250 IG, à vocation tactique, ont été remplacés en 1989 par des C 160 Transall encore actuellement en service, pour la même mission.

RÉSULTATS

Les premiers systèmes d'autoprotection des appareils tactiques sont apparus à la FATAC dans les toutes premières années de la décennie 1980 : lanceur de paquettes Phimat, brouilleurs électroniques Barax (bande X) et Barracuda (bande Ku) contre radars de bord et radars de conduite de tir des SA 6 / SA 8 / ZSU – en expérimentation. Ces équipements se sont révélés excellents, notamment au cours des exercices *Red Flag* effectués aux États-Unis, dès 1980 et 1982. Ils n'ont cessé d'être développés et

améliorés depuis. Ils ont progressivement équipé tous les appareils de combat français. S'y sont ajoutés les systèmes de contre-mesures contre les missiles infrarouges, dont l'aviation de transport a également bénéficié. Dans ces domaines d'autodéfense, nous avons désormais acquis une maîtrise remarquable.

S'agissant des systèmes CME « offensifs », nous avons en revanche connu des échecs. C'est l'escadron 2 / 11, équipé de Jaguar à Toul, qui a reçu la mission de brouillage offensif en 1977. Les équipements correspondants se sont révélés trop lourds par rapport aux performances du Jaguar, dont le rayon d'action ne dépassait pas 200 milles nautiques. La puissance de brouillage s'est révélée trop faible pour être efficace, les brouilleurs à bruit ne disposant pas d'antennes directrices. Les gammes de fréquence étaient insuffisantes.

Nous citerons à ce propos les brouilleurs à bruit CALMAR et BOA, le premier étant destiné à brouiller les radars de veille et ceux du SA 2, et le deuxième étant adapté aux radars de veille et aux radars des SA 2, SA 3, SA 4 et SA 6. Ces brouilleurs étaient installés dans un conteneur, le CT 51, d'un poids de 450 kg. Le Jaguar emportait deux CT 51, en plus d'un réservoir supplémentaire de carburant de 1 900 litres, d'où un rayon d'action et une vitesse limités de l'appareil. Le même inconvénient se retrouvait avec le manque de puissance de l'avion porteur pour le lance-palettes à grande capacité, pourtant excellent, qu'était le BOZ (arrivé en 1982).

Une exception parmi ces échecs : l'expérience intéressante acquise par la FATAC avec la mise en œuvre du missile anti-radar AS 37 Martel, qui a équipé la 3^e escadre de chasse de Nancy de 1973 à 1987, la mission AS 37 ayant été reprise à partir de cette date par l'EC 2 / 11 jusqu'en 1995. Ce missile fut retiré définitivement de l'armée de l'Air en 1999.

Dès le début des années 1960, les Mirage III C étaient dotés de missiles AS 20, puis AS 30, missiles à charge classique explosive téléguidés, dont l'inconvénient majeur était d'obliger le pilote à se rapprocher dangereusement de l'objectif. L'AS 30 prit toute sa

valeur dès lors qu'il fut doté d'un système de guidage *stand off* par laser (AS 30 L). En 1965, l'EMAA décida de développer un missile dérivé des précédents, missile anti-radar à autodirecteur électromagnétique. Le programme était conduit avec les Britanniques qui, eux, produisaient un missile guidé par télévision : d'où le nom d'AS 37 Martel (missile anti-radar / télévision). Le marché fut passé en France en 1966, les essais effectués au début des années 1970, et la mise en service opérationnelle date de 1973.

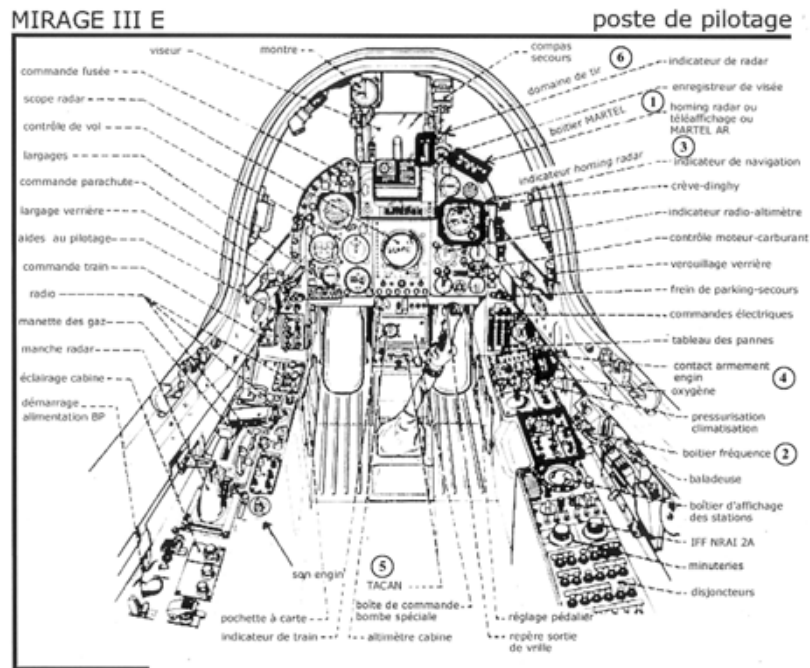
Les performances du missile (poids : 530 kg, charge explosive : 120 kg) étaient considérables. L'autodirecteur pouvait être adapté à l'une des trois bandes de fréquence suivantes : L pour les radars de veille de défense aérienne, S ou C pour les radars d'acquisition des missiles sol-air SA 3 et SA 6. En vol, il n'était pas possible de modifier le choix de la bande, qui devait intervenir avant la mission. À basse altitude, l'autodirecteur pouvait accrocher vers 20 ou 25 milles nautiques. Le tir était possible à partir de 8 ou 9 milles nautiques.

AS 37 /MIRAGE III E

La mission Martel sur Mirage III E, à basse altitude et dans des conditions « tous temps » (nuit et / ou nuages), a été celle où la charge imposée à un pilote de monoplace a été la plus lourde.

Le missile AS 37 a été réellement utilisé en 1987 pour détruire le radar de surveillance du terrain de Ouadi-Doum (Tchad), alors occupé par les Lybiens.

Deux cas de figure étaient possibles pour l'utilisation de l'AS 37. Dans le cas le plus simple, on connaissait au départ la position du radar visé, sa bande de fréquence, mais pas sa fréquence (mode 2). Dans les cas plus complexes, on connaissait la fréquence du radar, mais pas sa position (mode 1).



Collection Michel Forget, DR

Pour se représenter un briefing pour mode 2, on peut d'abord observer le spectacle qui s'offrait au pilote montant dans l'avion : une cabine surchargée. Les instruments spécifiques de la mise en œuvre de l'AS 37 sont harmonieusement répartis dans la cabine (à gauche, à droite, devant...). En 1, le boîtier Martel affichait « mode 2 ». En 2, le boîtier de fréquence affichait sur un cadran deux curseurs correspondant aux butées haute et basse des fréquences possibles du radar dans la bande choisie ; entre les deux butées, une aiguille devait se stabiliser, en vol, quand l'autodirecteur accrochait sa cible.

Après la mise en route, le décollage à la vitesse confortable de 185 nœuds (350 km/h), on s'installe sur sa route (1 000 pieds / 450 nœuds) dans les nuages ou de nuit. Cela implique surveillance du cap, de l'altitude, de l'indicateur de navigation... et du scope radar, où il faut comparer l'image reçue avec celle qui est prévue, et qui figure sur un dépliant (*déplinav*), que le pilote a sur son genou gauche...

On approche de l'objectif vers 30 milles nautiques : on s'intéresse alors au potentiomètre, qui est à gauche (5), et à l'indicateur de *homing radar* (3), qui doit être confondu avec l'indicateur de cap. Sinon, il faut effectuer une correction de cap.

Le potentiomètre commence à lancer un « tu-tu-tu-tu » discontinu. L'autodirecteur s'excite. Un coup d'œil à droite sur le boîtier de fréquence (2) permet de vérifier que l'aiguille est bien entre les butées. Il faut obtenir un sifflement continu. Pour cela, avec la main droite, on tourne délicatement un tout petit potentiomètre sur le boîtier Martel (1) jusqu'à obtenir le résultat souhaité. Sans négliger coup d'œil sur l'altitude, le cap, et l'image radar...

On attend maintenant d'entrer dans le domaine de tir : pour cela, il faut surveiller le voyant correspondant (6). Voyant clignotant vert : on approche ; coup d'œil à l'indicateur de navigation, pour la distance. Voyant vert : tir du missile. On dégage !

On peut penser que cela n'était pas si difficile, grâce au pilote automatique. Malheureusement, le Mirage III E ne disposait pas de pilote automatique, mais de deux systèmes d'aide au pilotage : un stabilisateur de roulis (commande sur le manche), ailes stabilisées à l'horizontale ; et, à gauche, deux plongeurs, l'un pour l'auto-commande (lien entre manche et commande réalisé au travers de simples boîtes noires), et l'autre pour la surveillance d'altitude, qui imposait que l'autocommande (A/C) soit branchée. Pour aller tout droit, c'était encore aisé. Pour changer de cap, il « suffisait » de débrancher le stabilisateur de roulis et de passer aux instruments pour le contrôle de l'assiette en roulis de l'appareil ; ce faisant, une fois sur deux, le plongeur A/C sautait et, avec lui, le plongeur de surveillance d'altitude. Alarme : on passait alors complètement en manuel. Une fois sur le nouveau cap, il suffisait de tout rebrancher, de surveiller cap, altitude, distance, radar, engin, etc.

Je passe sur le mode 1, impraticable à basse altitude par mauvais temps. Il fallait être à une altitude de sécurité. En effet, la fréquence du radar étant connue, elle était affichée sur le boîtier de fréquence (2). Une fois le son continu obtenu par les mêmes

manœuvres que précédemment, il fallait entrer dans le domaine de tir.

Pour cela, on faisait une sorte de triangulation, en ouvrant de 30 degrés par rapport au cap indiqué par l'aiguille de *homing* radar ; on attendait une déviation de 12 degrés du gisement et on revenait sur le cap indiqué : lumière verte ou non. En absence de lumière verte, il fallait une nouvelle triangulation, etc.

CONCLUSION

Il reste des efforts à entreprendre dans le domaine des CME offensives, pour neutraliser les défenses sol-air par brouillage, de préférence à la destruction des antennes par missiles anti-radar.

L'expérience Martel a montré la nécessité du biplace et celle de disposer d'aides au pilotage performantes sur les avions de combat. L'expérience acquise sur Mirage III E / Martel a été tout de même enthousiasmante pour les pilotes les plus confirmés, même si la mission était particulièrement éprouvante par mauvais temps ou à très basse altitude.

LA MISE EN SERVICE ET
LA PRISE EN COMPTE
DES CONTRE-MESURES
AYANT ÉQUIPÉ LES FORCES DE COMBAT
DE L'ARMÉE DE L'AIR,
1976 – 1993

André CARBON

BILAN DE L'EXISTANT

En 1976, date de mon arrivée dans la FATAC 1^{re} RA, la flotte d'environ 300 avions de combat était composée principalement de Mirage III (C, R, RD, E, V), de Mirage F 1 et de Jaguar. La 11^e EC, basée à Toul, achevait son apprentissage sur Jaguar et possédait encore quelques F 100, que les anciens nostalgiques avaient qualifiés « d'avions d'homme », par opposition au Jaguar, dont la spécialisation pour la basse altitude étonnait, et surtout donnait matière à de virulentes critiques. Cet avion semblait une régression par rapport à son prédécesseur, et ne pouvait en aucun cas devenir un « bon » avion : mais les trente années à venir allaient donner tort à ses nombreux détracteurs.

Hormis les Forces aériennes stratégiques (FAS), que la mission nucléaire de dissuasion avait obligées à se doter d'équipements GE, la guerre électronique était très méconnue au sein des forces et restait réservée à quelques très rares initiés.

Malgré tout, l'armée de l'Air était dotée de quelques équipements spécialisés :

- Détecteur de menace :
 - Jaguar : DRAX, détection avant sur 120° avec deux modes : CW et TWS ;
 - F1 C : BF, détection sur 360° avec sectorisation, modes CW et TWS, bande capable Cyrano IV et Crotale ;
 - Mirage III : rien ou presque ;
- Contre-mesure aéroportée d'autoprotection :
 - rien, mais pour Mirage IV : BOZ, Agacette et Agasol à partir de bidons CT 51 ;
- Moyens offensifs :
 - Martel pour antiradar ;
 - rien en matière de brouilleurs offensifs ;
- Autres :
 - Crotale : rien ;
 - Radar de type ARES : rattrapage automatique de gain et *on / off*.

CHRONOLOGIE

L'année 1976 a, en fait, marqué les grands débuts de la GE dans les forces de combat, même si le Martel était opérationnel à la 3^e EC, et même s'il a fallu attendre l'arrivée des premiers équipements pendant un an. En effet, 1976 correspond au passage de l'EC 2 / 11 Vosges sur Jaguar, et à l'attribution de la mission de protection électromagnétique des forces comme mission principale pour cet escadron de combat. Cette mission pouvait s'effectuer en accompagnement de raids (y compris nucléaires, ce qui impliquait l'obligation d'effectuer des itinéraires réservés basses altitudes R 45), ou en dehors des lignes, c'est-à-dire en brouillage *stand off*.

C'est au titre de cette mission de protection électronique qu'arrivent, en 1977, les premiers BOA (brouilleurs offensifs aéroportés), installés dans des bidons CT 51, le tout ayant une masse de 400 kg. Compte tenu de leur prix et d'une possible erreur

d'un pilote qui aurait amené leur largage intempestif, il avait été décidé de neutraliser le dispositif de largage.

On connaît les performances du Jaguar, dues à une sous-motorisation universellement reconnue : il a quand même fallu plus d'un an pour convaincre que, lors d'une panne moteur au décollage, une telle décision entraînait la perte obligatoire des bidons CT 51, mais aussi de l'avion, voire du pilote.

En terme d'objectifs, les CT 51 étaient capables de brouiller les radars de veille de 10 et 23 cm, mais possédaient des performances qui, plus tard, s'avérèrent insuffisantes. Si l'idée d'équiper des avions de combat de brouilleurs offensifs était bonne, la technologie n'a pas permis d'en tirer les résultats escomptés. Le BOA manquait de puissance, et l'obligation de le programmer avant le vol ne permettait pas la souplesse d'emploi qui aurait peut-être permis de pallier cette insuffisance. À la fin des années 1980, ces matériels ont été déclassés en équipements d'exercice, et sont restés très utiles en termes d'entraînement, de démonstration et d'expérimentation. Si on analyse le parcours des BOA, il n'y a guère de surprise lorsqu'on se souvient que ces bidons servaient d'autoprotection au Mirage IV, et que le fait de les placer sur Jaguar revenait à transformer une contre-mesure d'autoprotection en moyen offensif, sans amélioration technique notoire.

D'un point de vue général et avec le recul des années, il s'avère que l'armée de l'Air s'est engagée dans le domaine de la GE à l'envers. La logique (quoique discutable) aurait voulu que l'on commençât par la prévention (détecteur de menace), que l'on continuât par l'autoprotection, et qu'au vu des connaissances acquises en termes de tactique ou de technique, on terminât par l'offensif.

Parallèlement, l'année 1977 coïncide avec le début des opérations en Afrique avec, à la fin de l'année, le déclenchement de l'opération Lamentin (en Mauritanie), suivie de Tacaud (au Tchad) en 1979, Manta en 1983, Silure en 1985 et Épervier en 1986, toujours en cours. Du point de vue de la GE, ces opérations ont

mis en exergue la vulnérabilité des avions d'armes lors des attaques à très basses altitudes (deux avions abattus par de l'artillerie antiaérienne ou de petit calibre), ainsi que la menace des missiles infrarouges. Les attaques basse altitude, associées à la vitesse élevée des avions, donnaient aux opérateurs un temps de préavis très court, minimisant le risque que représentaient ces missiles, sans toutefois l'annuler.

Il fallait de toute façon le prendre en compte, mais le problème était de savoir de quelle manière, puisqu'aucun équipement en service ne pouvait contrer cette menace. Une première réponse a été fournie par l'utilisation de la troisième dimension, en effectuant des attaques haute altitude. Il a fallu attendre 1984 pour voir arriver le lance-leurre de queue sur Jaguar.

Cela rappelle, entre autres, que la guerre électronique n'est pas limitée au spectre électromagnétique, et doit prendre aussi en compte la partie du spectre correspondant à l'infrarouge ou au visible (laser).

Avec l'année 1978, on assiste à la mise en service des Phimat, premiers équipements d'autoprotection « universels », c'est-à-dire accessibles à tous. En effet, la GE pouvait être ainsi présente dans tous les escadrons et sortait de son microcosme, même si cette sortie était de portée relativement limitée. Pour l'anecdote et pour montrer que la GE était une affaire très sensible, il faut se souvenir que lors de sa mise en service, le Phimat était classé « secret-défense » et qu'à l'issue de chaque vol, conformément à la réglementation en vigueur, il fallait que ses équipements soient enfermés dans un local adéquat.

Les premiers largages de paillettes ont fait apparaître une difficulté qui s'est avérée coûteuse et bien embarrassante à régler : celle de la capacité des vaches à digérer les paillettes. En effet, les vaches de cette époque ne digéraient pas les paillettes en fibre de verre (plus performantes et moins coûteuses), alors qu'elles ne ressentaient aucun trouble avec les paillettes en nylon.

Le Phimat a permis d'obtenir des résultats intéressants face aux systèmes d'armes de type Crotale, qui, à l'époque, ne possédaient pas de CCME (contre contre-mesure électronique) de type

« poursuite sur front avant » et qui, de ce fait, se trouvaient très vulnérables face à un largage de paillettes.

Parallèlement, l'armée de l'Air avait mis en service les BOZ (brouilleurs offensifs de zone), qui étaient des diffuseurs de paillettes grande capacité. On reprenait ainsi une tactique utilisée pendant la Deuxième Guerre mondiale, qui consistait à créer des couloirs ou des zones de paillettes dans lesquels il devenait impossible de distinguer les avions d'armes ; cette tactique se révéla assez peu efficace et était très difficile à mettre en œuvre car, lors de l'épandage, les avions largueurs étaient très vulnérables.

Avec l'année 1980, apparaissent les premiers brouilleurs d'autoprotection Barax et Barracuda, qui protégeaient les bandes I et J, dans lesquelles se trouvaient notamment les conduites de tir air-air. Avec la mise en service de ces brouilleurs, il a fallu résoudre, au niveau de la programmation des équipements, les problèmes de fréquences amies à ne pas brouiller, de priorité de systèmes d'armes à contrer (car ces contre-mesures électroniques ne traitaient qu'un nombre limité de fréquences) et d'ambiguïtés. L'ambiguïté est le fait de ne pas pouvoir faire la discrimination entre deux radars, car les paramètres interceptés sont, soit identiques, soit insuffisamment nombreux. Dans un premier temps, ces programmations étaient effectuées au sein des escadrons par les spécialistes « du coin », dont les compétences allaient de moyennes à presque nulles. Peu à peu, l'affaire s'est organisée autour de bibliothèques standards, élaborées par les personnels du 2 / 11 et mises à disposition de l'ensemble des escadrons.

En 1981, comme seul avion d'attaque au sol ravitaillable en vol, le Jaguar effectuait la quasi-totalité des missions outre-mer. C'est ainsi que la 11^e escadre participa, en 1981, au premier *Red Flag* à Nellis, aux États-Unis. Cet exercice était destiné à recréer les conditions d'une mission de guerre au Vietnam, guerre au cours de laquelle les Américains s'étaient aperçus que la majorité des avions perdus en mission l'avaient été au cours des dix premières

missions. Compte tenu aussi de l'importance grandissante de la GE dans les opérations, l'exercice *Red Flag* pouvait se transformer en *Green Flag*, la différence venant de l'importance accordée à la GE dans l'exercice. Et c'est en fait à un *Green Flag* que la France a participé, lorsqu'elle a envoyé aux États-Unis des Jaguar équipés de BOA. Devant les performances décevantes du BOA, il fut ensuite décidé de ne plus renouveler l'expérience avec des brouilleurs offensifs, et les participations suivantes ne furent que des *Red Flag*.

Cette première participation fut globalement positive : elle avait montré la capacité de la France à déployer des avions d'armes à des milliers de kilomètres de la métropole, et à tenir sa place dans un exercice complexe en milieu international. L'enseignement majeur qui en a été tiré fut relatif à la guerre électronique, mais pas de la manière attendue. Alors que l'on pensait mettre en relief le caractère indispensable des équipements de guerre électronique offensive, on revint avec une manœuvre d'autoprotection, appelée *Jink*. Cette manœuvre consiste à faire varier la trajectoire de l'avion dans l'espace, pour déjouer l'artillerie sol-air de petit calibre. Elle fut imposée dans toute la force aérienne tactique pendant presque une année, et fut abandonnée ensuite (bien que n'ayant pas fait partie de l'équipe participante, je fus en charge de transmettre la bonne parole aux autres escadrons, et fus immédiatement intronisé « moniteur *Jink* »).

En 1982 et 1983, les opérations continuaient en Afrique et la France participa à d'autres *Red Flag*. L'escadron 2 / 11, toujours en charge de la guerre électronique dans les forces de combat, continuait la mise en service opérationnelle des équipements de GE, mais était aussi responsable de leurs évolutions et chargé de définir leur utilisation opérationnelle. C'est à ce titre que furent mis au point la tactique dite « de la double manivelle » et le lanceur infrarouge de queue du Jaguar.

La « double manivelle » reprenait l'idée du *Jink* et consistait, lors d'une attaque à basse altitude, cap sur l'objectif, à effectuer en larguant des *schaffs* un virage d'environ 40 degrés, à faire 30 secondes de ligne droite, puis à refermer avec un virage à

l'opposé du premier vers l'objectif. Le nom de « double manivelle » provenait du fait que les deux patrouilles légères composant une patrouille simple effectuaient cette manœuvre en sens opposé en se croisant au départ ; cela gênait énormément les conduites de tir du type Crotale. Cette manœuvre, conçue et mise au point principalement par le commandant Amarger (qui se retira avec le grade de général), fut utilisée lors de l'attaque de la base d'Ouadi-Doum ; le commandant Amarger fut aussi à l'origine du lance-leurre infrarouge de queue du Jaguar.

Les interventions en Afrique avaient mis en exergue le danger des missiles infrarouge, et rien n'était prévu pour contrer cette menace, car la seule qui avait été prise en compte était l'électromagnétique. Amarger eut l'idée d'enlever le parachute frein qui servait lors de l'atterrissage (en fait, à la différence du F 100, il ne servait jamais, car le Jaguar avait une vitesse en finale relativement basse, et surtout un train d'atterrissage de tracteur qui lui permettait de s'arrêter très court), et de le remplacer par un conteneur, dans lequel il avait demandé aux mécaniciens de l'escadron de placer des cartouches infrarouges de 40 mm. Compte tenu de ce qui se passa autour de cette affaire, cet épisode vaudrait à lui tout seul un exposé. Plus tard, l'idée fut reprise sur le Mirage 2000, et les personnels en charge de cette modification, largement inspirée du lance-leurre de queue, eurent la satisfaction de voir leurs mérites récompensés, alors que leurs homologues sur Jaguar furent royalement ignorés.

Il faudra sûrement un jour évoquer ce manque global de reconnaissance pour cet avion et les personnels qui l'ont servi ; par exemple, et à titre d'anecdote, cela fait deux années de suite, et malgré son rôle au Kosovo, que le Jaguar est le seul avion en service opérationnel dans l'armée de l'Air qui ne figure pas dans le calendrier officiel du SIRPA Air.

Dans les années 1980, les équipements « support » tels que les conduites de tir, les radars et les autres équipements dédiés (Germa CME, centre de programmation, polygone GE) évoluèrent ou se développèrent. En effet, on vit apparaître des contre-mesures électroniques (CCME) qui donnaient

l'avantage aux conduites de tir sur les équipements d'autoprotection, puis de nouvelles CME aéroportées inversant la tendance, et ainsi de suite. La guerre électronique commença à prendre la dimension qu'on lui connaît actuellement : celle d'une affaire complexe, qui nécessite la mobilisation de nombreux moyens et compétences. Bien sûr, il y eut quelques ratés à l'allumage, car il était très difficile de mener ces avancées avec toute la cohérence voulue ; les acteurs étaient nombreux (opérationnels, DGA, industriels) et les intérêts n'étaient pas forcément identiques.

L'exemple du Crotale peut à lui seul illustrer ce problème ; pour apprécier l'efficacité des techniques ou tactiques de brouillage, il fallait disposer de moyens de restitution. Le Crotale avait été conçu sans ce type de moyens – la raison est difficile à identifier : commandement différent, mentalité et but non identiques, services DGA différents, même industriel mais pas dans la même branche... –, et les résultats des attaques face à ce type de système d'armes dépendaient du bon vouloir et de l'honnêteté des personnels qui le mettaient en œuvre.

Bien évidemment, les points de vue et les bilans variaient suivant les personnes concernées : les pilotes avaient tiré l'objectif, mais les Crotale avaient abattu les avions avant. Cet imbroglio dura jusqu'à ce que l'on découvre l'existence du SDE (système de dépannage et d'évaluation), un appareil de maintenance à partir duquel il était possible de restituer les attaques, donc de faire évoluer CME et système sol-air. Malgré les demandes orales et écrites répétées pour un système opérationnel offrant ces fonctionnalités, il ne fut jamais possible d'avoir gain de cause, et, à ma connaissance, le Crotale, en 1993, n'était toujours pas doté de moyens de restitution. C'est d'autant plus regrettable qu'un tel dispositif aurait permis de réaliser ce qui se faisait pendant les essais MACE (ces essais étaient organisés par l'OTAN et permettaient à chaque nation participante de confronter ses contre-mesures avec les systèmes d'armes des autres nations).

L'année 1986 et la fin des années 1980 marquent un tournant dans l'histoire de la GE, avec notamment l'arrivée des premiers

Mirage 2000 C et des premiers détecteurs de menace. Ces années virent aussi la mise en service de systèmes tels que les C 160 Gabriel et la nacelle Astac.

Avec la mise en service du Mirage 2000, les CME étaient intégrées à l'avion, ce qui signifiait que ces équipements étaient à demeure dans l'appareil et que, par conséquent, la GE devenait partie intégrante de la mission opérationnelle. Cette prise en compte ne s'est pas effectuée du jour au lendemain, car cela a bousculé quelques habitudes et a nécessité une adaptation parfois difficile. Par exemple, compte tenu des possibilités et des capacités de la technique de cette époque, le SERVAL (qui est le détecteur de menace du Mirage 2000) était (et est toujours) un instrument qu'il fallait interpréter et non plus lire, à la différence d'un altimètre ou d'un variomètre. De plus, la programmation du SERVAL posait beaucoup de problèmes en ce qui concerne les levées d'ambiguïté, et les distances des menaces détectées et présentées au pilote ne représentaient que des ordres de grandeur de la valeur réelle (en effet, ces distances ne sont pas élaborées en fonction d'informations de goniométrie, mais sont calculées en fonction de la puissance avec laquelle elles sont détectées).

Il fallait donc former les pilotes, les convaincre et leur apprendre à se servir de ce type d'instruments. Ce n'était pas chose facile, car il faut se souvenir que pendant cette période, les seuls spécialistes de guerre électronique volaient sur Jaguar et que la mission du Mirage 2000 était avant tout une mission de défense aérienne ! De plus, ces équipements ne permettaient plus une programmation similaire à celle du Barax ou du Barracuda, car elle nécessitait des outils informatiques spécifiques et d'importantes compétences humaines. Pendant cette période, il a aussi fallu créer un organisme en charge de ces problèmes de programmation ; c'est la mission qui fut attribuée à l'équipe de marque de guerre électronique, qui devint par la suite le CPIGE, organisme important de nos jours par sa taille et par la diversité de ses compétences.

C'est à cette époque que la guerre électronique prit la dimension qui est la sienne aujourd'hui.

1987 est une année importante pour l'histoire de la guerre électronique, puisque c'est l'année du tir d'un missile Martel sur Ouadi-Doum. La piste de Ouadi-Doum avait été attaquée et détruite l'année précédente par un raid de onze Jaguar de l'escadron 1 / 11 (cousin de l'EC 2 / 11). En tant que commandant en second de l'escadron 1 / 11, j'ai eu la responsabilité de la conception de la mission. Au cours de cette première attaque, la GE avait représenté une composante importante, puisque sur la base se trouvaient des systèmes sol-air SA 6, SA 9, de l'artillerie antiaérienne et les radars associés *Flat Face*. Concrètement, cela s'était traduit par :

- la prise en compte du volume de détection des *Flat Face*, déterminé par un ATL 2 qui avait été utilisé comme PC volant le jour de l'attaque ;
- l'utilisation de la « double manivelle » dans sa version simple ;
- une programmation des CME optimisée face aux SA 6 et ZSU 23 / 4, une attaque à très basse altitude groupée (les onze avions en moins de 30 secondes), soleil dans le dos.

En 1987, en dépit d'une piste inutilisable, Ouadi-Doum représentait une menace pour le Tchad, pays avec lequel la France avait des accords de défense.

À cette époque, la présence de Jaguar au Tchad et en République centrafricaine était importante (douze Jaguar). En février 1987, après une série d'incidents avec la Libye, les hommes politiques prirent la décision d'affirmer la détermination de la France dans cette crise, en déclenchant une opération aérienne.

Deux options avaient été retenues : l'attaque d'un aéroport près de la bande d'Aouzou, que je devais diriger en tant que chef de détachement Jaguar, ou bien un tir Martel sur Ouadi-Doum. Le sort et les événements penchèrent en faveur du Martel, qui fut tiré avec succès dans des conditions nominales à très basse altitude. Le radar de Ouadi-Doum s'éteignit juste après le tir, suivi aussitôt par celui de Faya Largeau. Les commentaires allèrent bon train ensuite pour savoir si le missile n'avait pas plutôt touché le groupe électrogène qui alimentait le radar, ou le câble électrique qui le reliait à ce groupe. Peu importe : l'objectif était atteint, et cette

attaque annonçait déjà l'efficacité de la guerre électronique offensive.

En 1988, l'EC 2 / 11 récupéra la mission Martel, après le passage de l'EC 3 / 3 de Nancy sur Mirage III. Mais le remplacement du missile n'était toujours pas d'actualité. Le polygone de guerre électronique continuait sa montée en puissance, avec l'acquisition du simulateur SA 6. Ce polygone commençait à prendre sa vitesse de croisière, et était surtout de plus en plus utilisé par les avions d'arme de type Mirage 2000 N, qui possèdent un détecteur de menace. Avant l'arrivée du Mirage 2000, il était en effet difficile de motiver des pilotes qui, lors de leur survol, ne voyaient s'allumer que la flèche avant ou arrière de leur CME, sans pouvoir savoir quelle était la menace qui les prenait en compte.

En 1989, la France devient leader des essais MACE, démontrant ainsi sa capacité à assumer sa place de nation leader dans le domaine de la GE. L'année est surtout marquée par la chute du mur de Berlin, sans conséquence immédiate toutefois sur la GE, puisque la menace soviétique doit toujours être prise en compte. Celle-ci est d'ailleurs mieux connue, grâce à la récupération de systèmes sol-air au Tchad (SA 6, SA 9 et ZSU 23 / 4) et de matériels provenant de l'ex-RDA.

La période 1990-1991 est marquée par la guerre du Golfe. Le sort des Jaguar n'est pas des plus réjouissants : cet avion constitue l'ossature de la composante air française, mais son équipement semble bien léger face à l'armada antiaérienne irakienne. Même s'il est équipé d'un missile air-air Magic en lieu et place du Phimat (lui-même remplacé par l'Alkan 5020, qui donne enfin satisfaction), il ne possède toujours pas de détecteur de menace, et ses performances en configuration d'attaque n'ont pas évolué depuis sa mise en service. Malgré tout, son rôle est déterminant, mais tous les pilotes reconnaissent que sans l'appui de la GE offensive des Américains, le taux d'attrition aurait été très élevé. L'utilisation et l'efficacité de la GE offensive est l'enseignement principal de cet engagement ; pourtant, le Martel ne voit pas son remplaçant poindre à l'horizon. Cet état de fait a suscité de

nombreuses critiques : mais que penser de l'*US Air Force*, qui ne donna pas de successeur à ses EF 111, laissant cette mission aux seuls EA6B ?

En 1992, devant la démonstration incontestable de l'efficacité de la guerre électronique au cours des opérations, les mentalités ont évolué et la GE a acquis ses lettres de noblesse.

LES ENSEIGNEMENTS

Le bilan de l'évolution de la guerre électronique dans l'armée de l'Air française est très bon, voire excellent. Certes, il est toujours possible de faire mieux, mais force est de constater que la France se situe aujourd'hui dans le peloton de tête. Certes, l'EC 2 / 11 a joué un rôle important dans cette progression, mais il est surtout rassurant de constater que la guerre électronique a largement dépassé les frontières de ce simple escadron de chasse, pour s'étendre à l'ensemble de l'armée de l'Air, voire des autres armées. Les industriels français ont aussi largement participé à ces résultats puisque, sans eux, il aurait fallu aller s'équiper à l'étranger, sans espoir d'atteindre le niveau qui est le nôtre actuellement. Lorsqu'on analyse l'importance de la GE dans les crises récentes, on peut se dire qu'il en allait de notre crédibilité vis-à-vis des autres nations.

Mais il faudrait se garder de tout triomphalisme. En effet, nous ne possédons pas de capacité SEAD (*Suppression of Enemy Air Defense*), qui est une des clés dans l'acquisition de la supériorité aérienne, ainsi que dans la préservation du potentiel ami. Le général Short, de l'*US Air Force*, commandant des éléments américains dans la crise du Kosovo, déclarait ainsi que l'armée de l'Air française était une armée cohérente et efficace, mais qui manquait de capacités SEAD. Venant d'un haut responsable américain, ce jugement est plutôt flatteur, mais doit nous conforter dans notre volonté de combler au plus vite cette importante lacune.

Ce bilan plus que satisfaisant ne doit pas non plus nous inciter à une certaine facilité, à nous reposer sur des points forts qui

doivent être pondérés et relativisés. Il en va ainsi des systèmes d'autoprotection, qui sont parmi les meilleurs au monde. Sans contester cet état de fait, il faut souligner que dans un engagement avec un dispositif anti-aérien conséquent, l'autoprotection ne participe que pour environ 10 % aux chances de survie d'un avion, alors que l'emploi de GE offensive augmente ses chances de 80 %. Pour un avion, les équipements d'autoprotection peuvent être comparés au pistolet d'un fantassin sur un champ de bataille : il l'utilise en cas d'absolue nécessité.

Enfin, le monde dans lequel nous vivons est en perpétuelle évolution, et les progrès technologiques constants nous obligent à nous remettre en cause en permanence, sous peine d'être rapidement dépassés. La crise du Golfe a marqué la démonstration éclatante de l'efficacité de la guerre électronique face à des systèmes d'armes de type SA 6. En revanche, la récente crise du Kosovo a montré qu'une utilisation différente, non conventionnelle et intelligente, de ces systèmes pouvait poser beaucoup de problèmes ; malgré l'emploi intensif de la GE offensive, les systèmes sol-air serbes ont fait peser une menace sur nos avions jusqu'à la fin de la crise. Cela signifie certainement qu'il est nécessaire de redéfinir un concept SEAD mettant en œuvre d'autres équipements, d'autres tactiques et qui devra impérativement prendre en compte la menace de demain de type SA 10, malheureusement déjà en service dans d'autres pays que ceux de l'ex-URSS.

LA RECHERCHE EN GUERRE ÉLECTRONIQUE DEPUIS 1960 ET SES RETOMBÉES

Pierre BARATAULT¹

J'avais initialement songé à intituler cette contribution « La guerre électronique, moteur de l'évolution technologique ». C'est bien en effet cette idée que je veux faire valoir : la guerre électronique, du fait de ses exigences techniques propres, a nécessité des efforts de recherche et de développement particulièrement poussés en France du côté de la DGA et de l'industrie, des années 1960 aux années 1990. Ces efforts permettent aujourd'hui à notre pays d'occuper une place de premier plan dans le secteur ; cela se mesure en particulier à l'exportation. Mais ils ont eu aussi des retombées dans le domaine civil.

Dans mes réflexions préliminaires, j'ajoutais même que le coup de frein donné à ces recherches aujourd'hui par la Défense, et aussi par l'industrie, pourrait bien constituer une erreur historique, en particulier quand on observe ce qui se passe aux États-Unis. Mais il s'agirait là de projections sur l'avenir, qui n'ont pas leur place dans le cadre de cette journée consacrée à l'histoire.

Je m'en tiendrai donc, plus sagement, à relater ce que j'ai pu observer au cours de près de quarante années consacrées à la guerre électronique, en insistant sur les points qui, me semble-t-il, mériteraient une analyse historique plus poussée.

Je vous propose donc tout d'abord de rappeler, en termes que je voudrais aussi simples que possible, quelles sont les principales

¹ Toutes les planches illustrant cet article ont été fournies par M. Baratault, © Thomson-CSF Detexis.

exigences techniques propres à la guerre électronique. Dans un deuxième temps, je chercherai à montrer, à partir d'exemples, quel type d'efforts de recherche ces exigences ont entraîné. Enfin, et toujours au moyen d'exemples, je chercherai à dégager les retombées de ces efforts qui paraissent, avec le recul, les plus significatives.

LA GUERRE ÉLECTRONIQUE : DES EXIGENCES TECHNIQUES PROPRES

Le message que je voudrais faire passer ici est le suivant : la guerre électronique doit être en mesure de traiter toutes les sources de rayonnement électromagnétique amies ou ennemies : amies pour éviter de les perturber, ennemies pour s'en protéger. De ce fait, elle doit en quelque sorte cumuler les capacités propres de chacune de ces sources. Il en résulte des exigences de performances de plusieurs ordres de grandeurs, c'est-à-dire 10, 100 ou 1 000 fois supérieures à celles que peuvent requérir chacune des sources prises séparément.

Trois exemples peuvent illustrer ce propos. Je les prendrai dans le domaine des radars, mais on pourrait en trouver d'autres dans le domaine des télécommunications.

Le premier exemple est celui de la bande de fréquences hertziennes, ou gamme de longueur d'ondes, qu'un système de guerre électronique doit couvrir.

On trouve aujourd'hui un très grand nombre de types de radars, occupant tout le spectre des fréquences, depuis les ondes métriques² ou décimétriques, pour les grands radars de détection lointaine, jusqu'aux ondes millimétriques, pour les petits radars de guidage terminal de missiles.

² Ces radars en ondes métriques, qui ont été les premiers accessibles technologiquement, connaissent aujourd'hui un regain d'intérêt face à des cibles furtives. Il faut également signaler l'emploi des ondes décimétriques pour la vision trans-horizon.

Ces radars ont une caractéristique commune. S'ils peuvent être répartis sur un très large spectre de fréquences, chacun d'entre eux, pris isolément, n'occupe qu'une très faible portion de ce spectre : quelques pour cent autour de la valeur nominale. Et ces radars ne regardent en général, à un instant donné, que dans une seule direction, celle que définit le pinceau directif de leur antenne³. Au contraire, les dispositifs de guerre électronique doivent pouvoir détecter et brouiller tous les types de radars, quelle que soit leur direction.

Dans un cas, celui du radar, on a donc une fenêtre en fréquence et en espace très étroite, taillée sur mesure et adaptée à la fonction à réaliser. Dans l'autre cas, on a au contraire une large ouverture sur le monde extérieur. Cela implique un rapport de l'ordre de 1 à 100 entre les couvertures, en fréquence et spatiale, d'un radar et d'un système de guerre électronique.

Mon deuxième exemple résulte de l'observation précédente. Il concerne le traitement du signal, c'est-à-dire ce qu'il faut faire pour extraire des signaux électromagnétiques présents dans l'atmosphère les informations utiles, généralement, de nos jours, sous forme de données numériques.

Contrairement aux radars, qui savent ce qu'ils doivent s'attendre à recevoir – c'est la réplique de ce qu'ils ont émis – et qui par conséquent peuvent sélectionner très tôt ce qui les intéresse, en plaçant une fenêtre exactement adaptée au signal émis, les systèmes de guerre électronique, largement ouverts sur le monde extérieur, reçoivent à un instant donné toutes sortes de signaux, au

³ Il s'agit là des radars courants aujourd'hui. Des contre-exemples peuvent être donnés. Il s'agit tout d'abord des radars à très large bande de fréquence instantanée (dans la durée de l'impulsion émise), utilisés notamment pour l'imagerie radar sous couvert végétal. Il faut citer d'autre part les radars à formation de faisceau par le calcul, permettant l'observation simultanée d'un grand nombre de secteurs de l'espace. Ces radars, initialement développés pour la détection de missiles balistiques, devraient connaître, avec l'arrivée des antennes actives, un intérêt croissant dans tous les domaines militaires.

milieu desquels il faut trouver ce qui est intéressant. Il faut trier ces signaux, les séparer les uns des autres.

Il faut donc disposer de l'équivalent de dizaines de milliers de petits récepteurs accordés chacun à une fréquence donnée, pour sélectionner l'émission possible à cette fréquence, tout comme le fait un récepteur de radiodiffusion. Si l'on veut savoir d'où vient l'émission, il faut encore multiplier le nombre de ces récepteurs, pour regarder simultanément dans différentes directions.

Sur le plan technique, cela se traduit par l'expression d'un besoin dit en BT : produit de la bande de fréquences que l'on veut analyser par le temps que l'on accepte de consacrer à cette analyse⁴. Des abaques permettent de caractériser cela. Ils font apparaître visuellement la différence de besoins entre radars et dispositifs de guerre électronique⁵.

⁴ Typiquement, la bande de fréquences que l'on veut analyser correspond à la plage à l'intérieur de laquelle une catégorie de radars est susceptible de se trouver : par exemple 2 GHz centrés autour de 10 GHz pour la plupart des radars de conduite de tir d'avions d'armes. Le temps d'analyse est l'inverse de la résolution fréquentielle visée : par exemple 1 μ s pour une résolution de 1 MHz. Mais il doit rester voisin de la largeur des impulsions reçues, sous peine de dégradation de sensibilité. Il est à situer, en ELINT, entre 0,1 et 1 μ s.

⁵ Il faut remarquer que les exigences en puissance de calcul pour le traitement de signaux de communications se situent deux à trois ordres de grandeur au-dessous des besoins anti-radars. Cela explique que les développements importants d'EGIDE et d'ENIGME aient pu être lancés dès les années 1970, avec les technologies numériques alors disponibles (cf. intervention du général Moller) et que le domaine anti-radars n'ait pu être abordé qu'à la fin des années 1990.

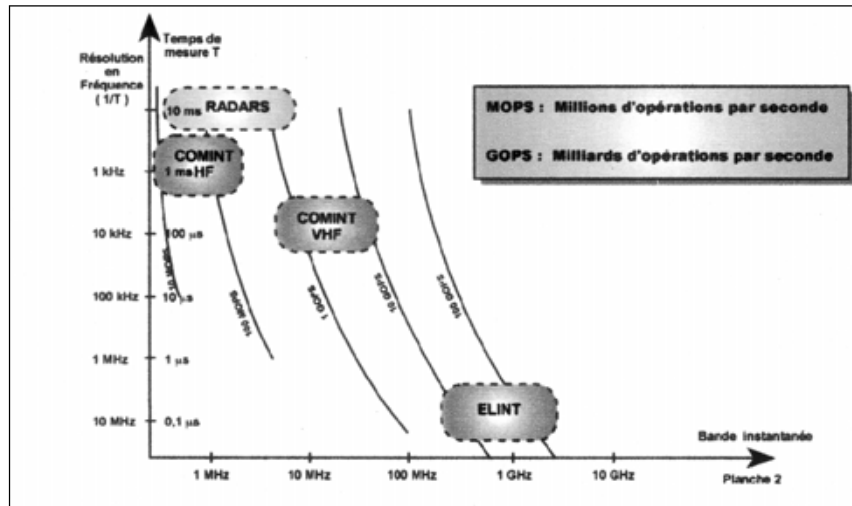


Figure 1 : Besoins comparés en traitement de signal

Mon troisième exemple porte sur les traitements de données. Ces signaux que l'on a isolés et codés sous forme binaire, il faut les analyser, les associer entre eux pour savoir s'ils constituent bien une piste intéressante. Si c'est le cas, il faut localiser les sources d'émissions à partir des différentes mesures de direction, ou relevés goniométriques, que l'on a pu faire au cours du temps. Il faut identifier ces sources en comparant les mesures que l'on a pu faire à des « signatures » caractéristiques de systèmes amis ou ennemis.

Ce sont rapidement des gigaoctets de données que l'on manipule, et dont il faut extraire l'information utile en des temps qui se comptent en secondes, voire moins s'il s'agit d'alerter un pilote ou un commandant de bord.

Ces exigences techniques propres à la guerre électronique avaient été bien comprises dès la Seconde Guerre mondiale et avaient donné lieu, dans les années 1950, à des développements propres, tels que les systèmes d'écoute au sol Sphinx, dans un cadre OTAN, ou Smyrne, ou bien encore les détecteurs d'alerte pour bateaux des familles ARBR.

Mais c'est dans les années 1960, avec la mise en place de la Force aérienne stratégique (FAS) et lorsque sont tirées les premières leçons de la guerre du Vietnam, que la recherche et le développement sont structurés par la DMA, suite aux demandes des états-majors. Les relais nécessaires sont alors trouvés dans l'industrie : c'est à cette époque qu'elle a pris conscience du changement d'échelle qui avait affecté le marché de la guerre électronique.

LES EFFORTS DE RECHERCHE DES ANNÉES 1960 AUX ANNÉES 1990

Il est certainement encore possible de conduire une analyse exhaustive de ce qu'ont été les recherches conduites au profit de la guerre électronique des années 1960 aux années 1990, à partir des marchés d'État engagés par la Direction de recherches et moyens d'essais (DRME), la Direction des recherches, études et techniques d'armement (DRET), le STEI et les grands services de la DGA, ou bien encore à partir des plans d'investissements internes des sociétés. Des archives existent encore – on peut se demander pour combien de temps –, et, surtout, les principaux acteurs de cette période sont encore là pour les commenter. Ce travail est à faire, et je me contenterai de vous donner quelques exemples illustratifs, en espérant susciter l'intérêt de véritables historiens.

Les outils de modélisation d'antennes

On connaît toute l'importance qu'ont acquis, aujourd'hui, les outils de modélisation sur calculateurs du comportement d'objets physiques, qui permettent d'atteindre ce que l'on appelle le prototypage virtuel. Il existait, dans les années 1960, des formules analytiques, des abaques permettant de calculer une antenne, et il a été facile de les porter sur des calculateurs numériques. Mais cela ne fonctionnait bien que pour les antennes à bande de fréquences étroite, telles que celles des radars.

Une des lois de la physique veut en effet que l'ouverture angulaire d'une antenne – la portion du monde extérieur que cette antenne permet d'examiner – dépende de la fréquence et de la surface de cette antenne. Or, une antenne de guerre électronique doit fonctionner sur de très larges bandes de fréquences. On imaginerait mal que la portion d'espace surveillée dépende de la fréquence de ce que l'on veut détecter.

Il faut donc ruser avec la physique. Cela se faisait, dans le passé, avec beaucoup de métier et un certain nombre de tâtonnements et d'expérimentations. Et cela a été à l'origine de tout un ensemble de développements mathématiques et informatiques.

On peut citer par exemple deux études conduites avec le soutien du laboratoire de mathématiques appliquées de l'X, ou avec de petites sociétés spécialisées⁶ :

- le calcul d'antennes par la méthode dite des éléments finis. On décompose cette antenne en éléments géométriques qui sont petits devant la longueur d'onde, et on additionne les contributions au rayonnement de chacun de ces éléments. Le procédé a été par exemple appliqué à des antennes du Rafale (figure 2) ;
- le calcul des effets d'une structure avion sur le rayonnement d'antenne, par une méthode dite asymptotique – de type optique physique. On peut citer une application sur Mirage 2000 (figure 3).

⁶ Les mêmes formulations sont applicables au domaine de la furtivité, qui ne sera pas abordé dans cet exposé « ouvert ».

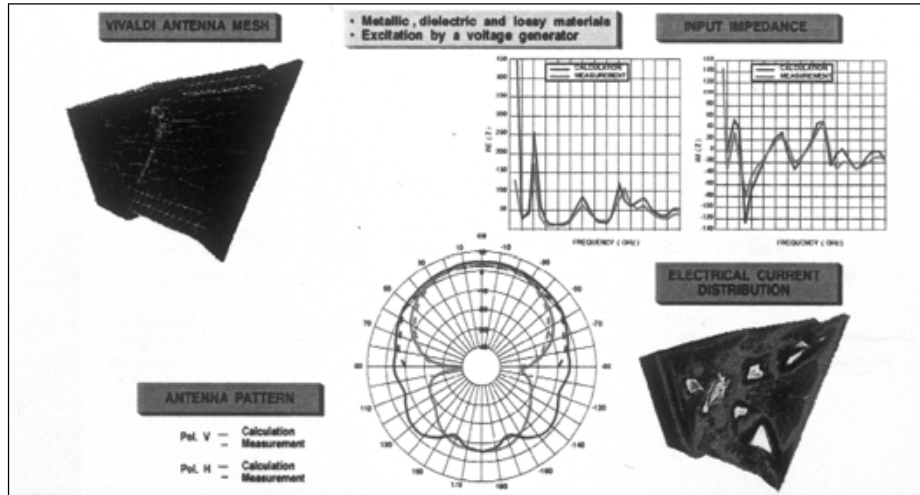


Figure 2

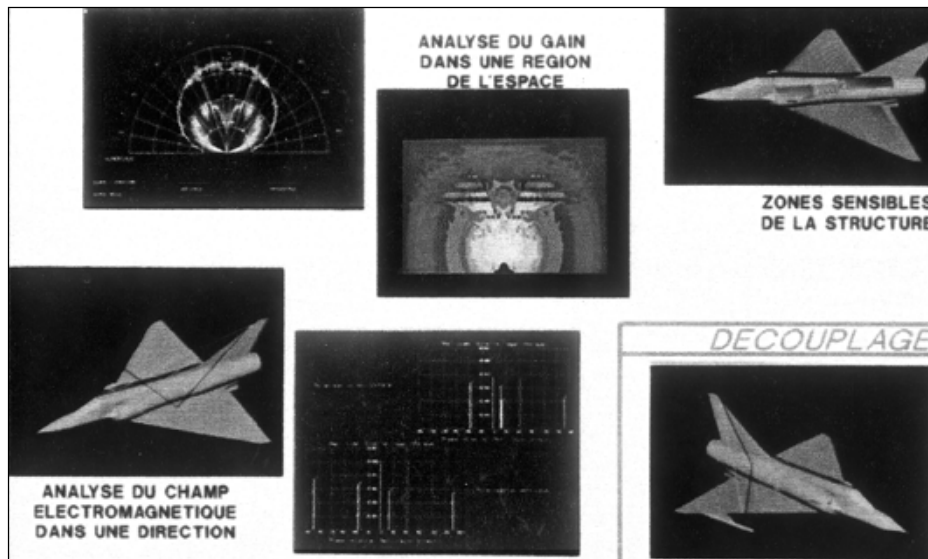


Figure 3

Les tubes à ondes progressives

Il y avait, dans le domaine des tubes à vide hyperfréquence, une longue tradition française. L'invention du carcinotron⁷ en est une bonne illustration. Mais la bande de fréquence de ces tubes restait limitée (de l'ordre de 30 %), et l'on avait besoin d'amplificateurs, pour amplifier les très faibles signaux reçus de sources lointaines ou bien pour amplifier des signaux complexes de brouillage.

Tout cela a conduit au développement de toute une famille de tubes nouveaux : les tubes à ondes progressives large bande, appliqués d'abord, dans les années 1960, aux détecteurs d'alerte marine puis, dans les années 1970, aux brouilleurs. On peut citer ainsi le mini TOP⁸ pour brouilleur, équipant les avions Mirage 2000 et les bâtiments de surface de la Marine nationale (figure 4), ou encore un module hyperfréquence de puissance, intégrant tube, alimentations et préamplificateur état solide, actuellement en phase de développement (figure 5).

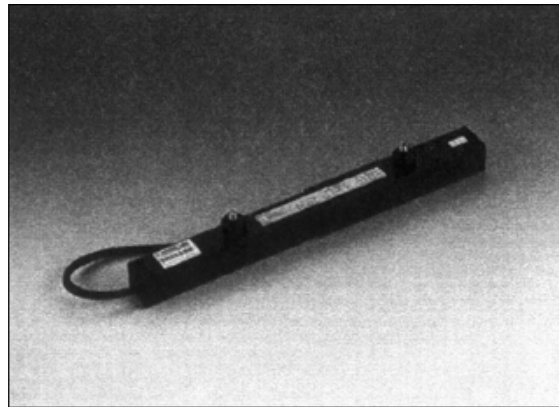


Figure 4

⁷ Tube générateur d'ondes utilisé pour accorder en fréquence un récepteur ou, à plus forte puissance, pour du brouillage.

⁸ Tube à ondes progressives : tube réalisant l'amplification des signaux hyperfréquences par interaction d'un flux d'électrons avec une onde se propageant le long d'une ligne.

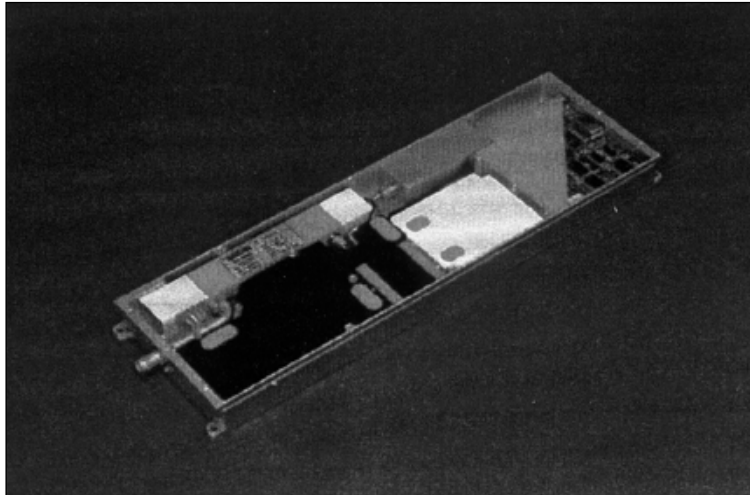


Figure 5

L'arséniure de gallium

Sans trop entrer dans le détail, disons que l'arséniure de gallium, ou AsGa, est un matériau composé qui permet de faire fonctionner en hyperfréquences des transistors, et d'obtenir dans le domaine des ondes radar ce que l'on obtient avec le silicium dans le domaine de la radio.

On peut ainsi amplifier les ondes reçues, les sélectionner, changer leur fréquence. Et on a, comme avec le silicium, la possibilité d'intégrer sur une même puce – petit morceau d'AsGa de quelques millimètres de côté – des fonctions complètes. C'est particulièrement intéressant pour les très larges bandes de fréquences, où se posent de redoutables problèmes d'interconnexions et de câblage. Les procédés de photogravure propres à ces circuits intégrés assurent alors la nécessaire reproductibilité.

C'est dans les années 1970 qu'ont été réalisées les premières applications à des détecteurs. Puis, au début des années 1980, ont été entrevues les possibilités d'amplification de puissance à large bande, qui ont conduit au brouilleur à antennes actives du Rafale (figures 6 et 7).

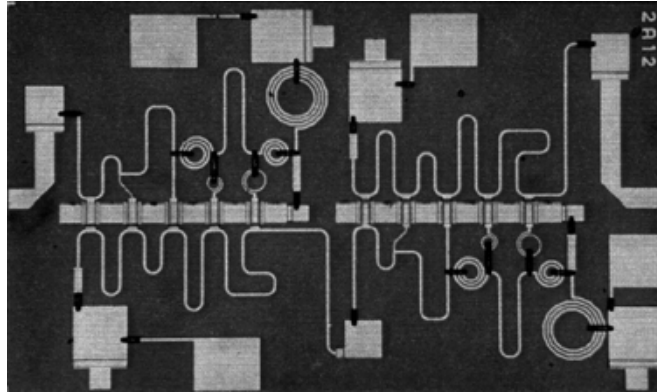


Figure 6 : Circuit intégré. Ici, un amplificateur large bande

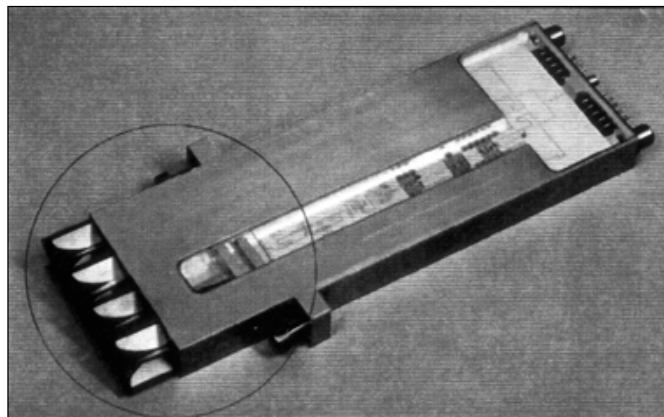


Figure 7 : Module pour antenne active de brouillage

Les dispositifs à ondes acoustiques de surface

Il faut, dans le domaine du traitement du signal, réaliser des fonctions de filtrage, c'est-à-dire isoler le signal utile et le séparer du bruit et des autres signaux perturbateurs qui l'accompagnent. De nos jours, cela se fait couramment sur un radar, par traitement numérique. Encore faut-il disposer du codeur qui permet de transformer les signaux analogiques en données numériques (suites de 0 et de 1), à une cadence qui doit être d'autant plus élevée que la bande de fréquences à traiter est plus large, et avec

une précision (nombre de bits) d'autant plus élevée que la dynamique des signaux reçus (écart entre les plus faibles et les plus forts) est plus grande. Il faut aussi disposer, comme nous l'avons vu, de puissances de calcul considérables. On y arrive maintenant, mais dans les années qui nous intéressent, ce n'était pas le cas. Il fallait rester dans le domaine analogique.

La voie choisie en France a été celle des dispositifs à ondes acoustiques de surface. La théorie de ces dispositifs est assez complexe. Disons, pour simplifier, que l'on transforme, à l'aide de transducteurs, les ondes radio que l'on reçoit en ondes acoustiques qui se propagent à la surface d'un cristal soigneusement choisi. On peut faire en sorte que ces ondes se propagent plus ou moins vite suivant leur fréquence. On peut ainsi remplacer la mesure de fréquence par une mesure de temps, bien connue. On peut surtout, en modulant les signaux radio de façon appropriée, les comprimer, c'est-à-dire les rendre plus fins et améliorer ainsi le pouvoir séparateur. C'est la technique des récepteurs dits à compression.

Les premiers travaux sur les ondes de surface ont commencé dans les années 1960. C'est vers 1975 que le STEI a lancé les premières études d'applications à la guerre électronique. Les résultats de ces études constituent aujourd'hui la base des systèmes français d'écoute radar (figure 8).

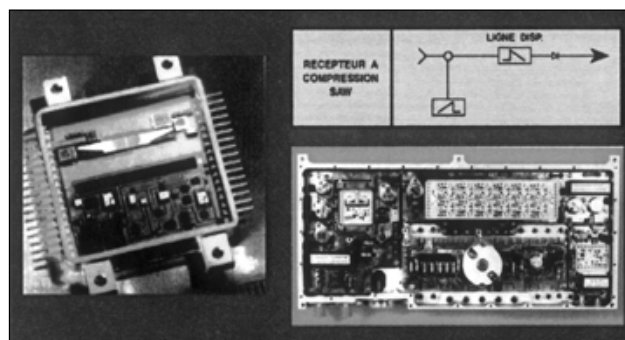


Figure 8 : Récepteur à compression

Le traitement intensif des données

La manipulation de gigaoctets de données – c'est-à-dire de milliards de mots – n'est pas chose simple, surtout quand on vise à obtenir des résultats immédiats. Dans ce domaine, le calculateur numérique est roi. Encore faut-il trouver la bonne algorithmie, applicable aux machines très puissantes dont on dispose.

Deux grands axes ont été suivis depuis les années 1980 :

- le traitement intensif des données, c'est-à-dire leur classification par familles, applicable par exemple à la localisation d'émetteurs multiples enchevêtrés. Ce sont des algorithmes de type neuronal qui sont utilisés ;
- l'intelligence artificielle, appliquée notamment à l'identification de radars.

Les travaux correspondants ont été initiés par la DRET dès les années 1980 et ont trouvé rapidement leurs applications. Même s'ils ne mettent pas en œuvre des moyens industriels aussi complexes que ceux nécessaires dans les exemples précédemment cités, ils ne doivent pas être oubliés. Ce sont en effet bien souvent ces algorithmes qui font qu'un utilisateur est satisfait ou non des technologies « dures » les plus poussées qu'on lui propose.

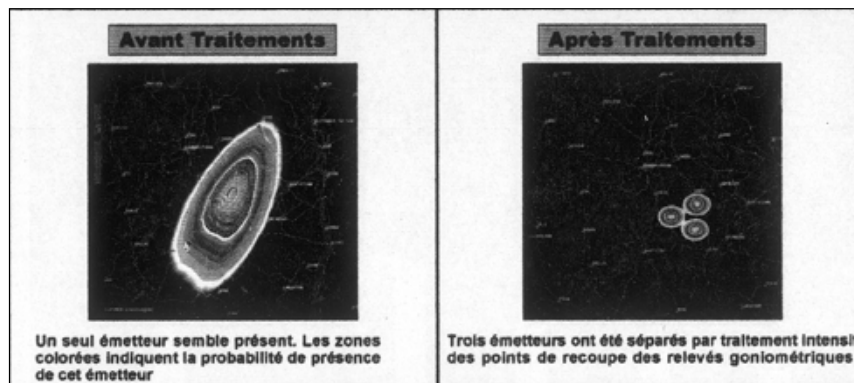


Figure 9 : Localisation d'émetteurs multiples à partir de relevés goniométriques

LES RETOMBÉES DES EFFORTS DE RECHERCHE EN GUERRE ÉLECTRONIQUE

Bien entendu, dans les exemples cités, la guerre électronique n'a pas été le seul moteur conduisant au progrès. Les besoins radar ou les besoins en communications poussaient en général dans le même sens, et la plupart des grands programmes technologiques lancés en France par la DGA et l'industrie avaient cette triple motivation. Les plans AsGa en sont une bonne illustration. Mais la guerre électronique a été le plus souvent le fer de lance dans ces domaines et l'on peut, sans exagération, lui attribuer une bonne partie des retombées des actions qui y ont été conduites.

Retombées dans le domaine de la guerre électronique nationale

Ces technologies, dont je viens de donner quelques exemples, ont d'abord été étudiées et développées pour que la France soit en mesure de disposer, en toute indépendance, des équipements militaires dont les états-majors estimaient avoir besoin. Et l'on a vu de nombreux exemples où les technologies évoluées américaines ne devenaient accessibles que lorsqu'on avait su prouver qu'on était en mesure de les maîtriser.

Elles ont permis d'équiper nos armées de tout un ensemble de moyens qui n'a sans doute pas d'équivalent en dehors des États-Unis. Il ne m'appartient pas de juger de l'efficacité de ces moyens. D'autres dans cette assemblée ont autorité pour le faire.

Retombées à l'exportation

Peut-être suis-je mieux placé pour parler de l'apport de ces technologies à l'exportation. Dans ce domaine de la guerre électronique, où dans bien des compétitions notre pays peut se targuer d'avoir fait jeu égal avec les États-Unis, je peux attester qu'à l'origine de tout grand marché à l'export, il y a toujours eu une visite et une enquête des scientifiques du pays client, pour

s'assurer que nous disposions bien en propre des technologies clés des équipements que nous proposons. Et nous avons toujours pu convaincre.

Pour ne citer qu'un exemple de matériel proposé à la vente dans la période qui nous intéresse, on peut évoquer le DR 2000, détecteur de radar installé sur bâtiments de surface, sous-marins et avions de patrouille maritime, produit à près de 300 exemplaires et vendu dans 25 pays différents (figure 12).

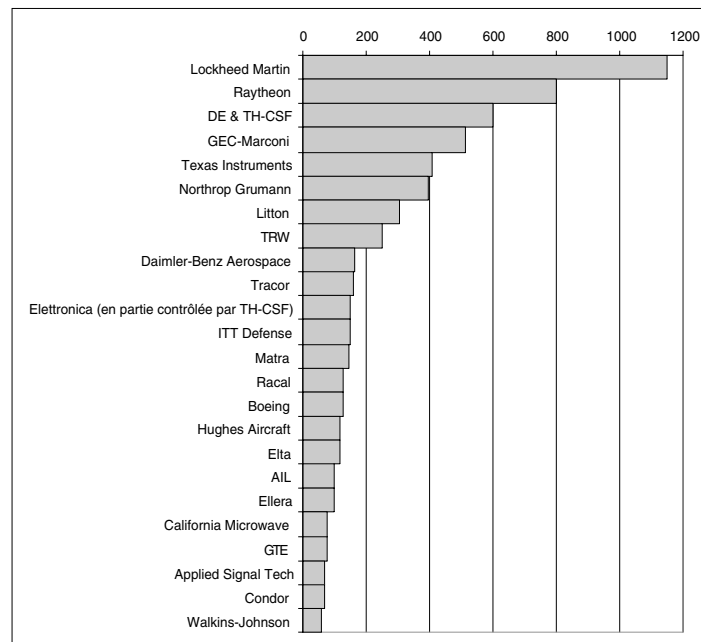


Figure 10 : La position de l'industrie française de guerre électronique en 1996, selon *Electronic Defense* (bénéfices en millions de \$)



Figure 11 : La présence de la France dans le monde pour la GE Marine à la fin de 1998 (ventes réalisées depuis les origines)

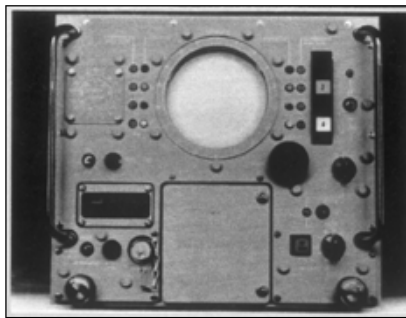


Figure 12 : DR 2000

Retombées dans les domaines civils

C'est sur ce troisième point, peut-être moins connu, que je voudrais insister.

Ainsi, les outils de modélisation d'antennes sont aujourd'hui largement utilisés dans le domaine spatial. D'une façon générale, l'expertise acquise dans la maîtrise des hyperfréquences est un apport précieux quand on aborde des secteurs nouveaux. Je vous renvoie à ce sujet aux déclarations de M. Tchuruk, président d'Alcatel⁹. Je ne peux m'empêcher de citer cet extrait, à propos du

⁹ *Le Monde* du 8 novembre 1999.

rapprochement entre Alcatel et Thomson-CSF : « Pour Alcatel par exemple, il s'agit d'exploiter la formidable avance de Thomson-CSF dans le domaine des hyperfréquences, utilisées par les militaires, pour les appliquer à la radio fixe à large bande dans les télécommunications civiles ». Aujourd'hui, Thomson-CSF (avec Thomson tubes électroniques, ou TTE) a le rang de numéro un mondial dans le domaine des tubes à ondes progressives (cf. figure 13).

Bien sûr, les tubes pour applications spatiales, qui constituent une bonne part du marché, ont des caractéristiques qui leur sont propres. Mais les technologies de base, les outils de calcul, les procédés de fabrication, bénéficient très largement des développements conduits dans le domaine militaire. Surtout, les hommes formés sur ces applications militaires sont ceux qui, aujourd'hui, conduisent avec succès les développements civils.

Il me plaît à cette occasion de souligner le rôle joué par Georges Fleury, responsable, dans les années 1970, du développement des tubes pour les brouilleurs Barracuda, aujourd'hui en charge des tubes spatiaux et partageant son temps entre la France et l'Allemagne.

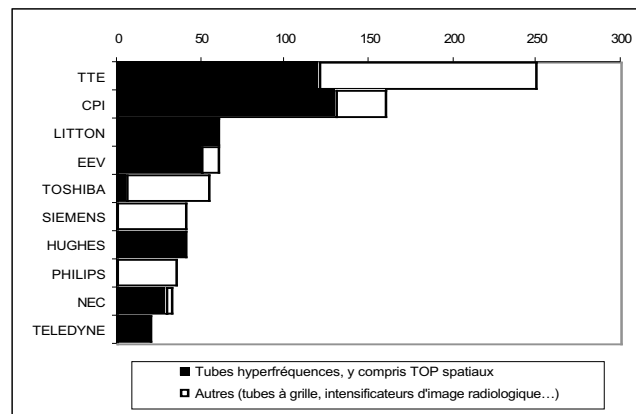


Figure 13 : Chiffre d'affaires tubes 1999 des sociétés réalisant des tubes électroniques professionnels (millions d'euros)

Dans le domaine des dispositifs à ondes de surface, le scénario est identique. Là aussi, le rang de numéro un mondial est atteint dans le domaine des filtres pour téléphones mobiles. On retrouve les mêmes outils, les mêmes procédés, les mêmes hommes que dans le domaine militaire. Là aussi, je veux souligner le rôle joué par Charles Maerfeld, en charge en son temps du développement des lignes dispersives des récepteurs Astac, Transall, Gabriel, SARIGUE et aujourd'hui patron de l'activité Thomson Microsonics, tournée essentiellement vers le civil mais répondant encore – pour combien de temps ? – aux besoins militaires.

L'arséniure de gallium a lui aussi trouvé plus de débouchés dans le civil que dans le domaine militaire. Pour prendre un exemple simple, ce sont les besoins de la guerre électronique dans les fréquences millimétriques qui ont favorisé les recherches initiales dans ces gammes de fréquence, avec des retombées aujourd'hui sur les radars pour automobiles (figure 14). Et c'est le besoin de puissance à large bande qui, aujourd'hui, pousse à la recherche de nouvelles structures de transistors qui, elles-mêmes, se retrouveront peut-être demain dans nos téléphones mobiles.

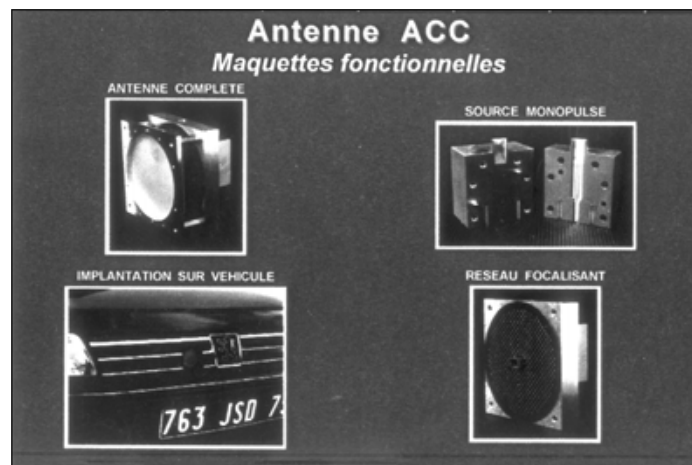


Figure 14

Pour sortir un peu du grand groupe Thomson-CSF, dans lequel j'ai situé mes exemples jusqu'ici, je tiens à citer la PME Picogiga : elle fait aujourd'hui partie des premiers producteurs mondiaux de substrats arséniure de gallium et son fondateur, M. Linh, avait largement contribué aux recherches dans ce domaine, sur contrats DGA du LCR¹⁰.

CONCLUSION

Je n'ai pu que survoler ce domaine de la recherche dans le passé de la guerre électronique. Bien des aspects évoqués mériteraient approfondissement. Bien d'autres ont été omis.

Mais c'est le passé. Il y aurait moins à dire sur le présent. Cela tient en partie à un effet de mode, généré entre autres par les déclarations du secrétaire d'État à la Défense américain, M. William Perry, dont on ne cite en général que les premières phrases (la suite est fort instructive)¹¹ ; en partie aussi au fait que

¹⁰ Laboratoire central de recherches de Thomson-CSF, installé sur le site de Corbeville, à Orsay.

¹¹ On cite volontiers les déclarations de William Perry relatives à l'emploi de composants commerciaux sur les équipements militaires (« *For an increasing number of technologies, commercial demand, not defense demand, will drive technical progress [...] DoD can both benefit from and contribute to a stronger US industrial base* »). Outre la lenteur du passage aux actes – la France ayant par exemple largement devancé les États-Unis dans l'instruction du dossier, puis dans l'emploi de composants enrobés plastique – on oublie trop souvent de citer le second volet des déclarations de M. W. Perry : « *At the same time, we must continue to identify and support a well defined set of defense unique, defense funded capabilities. We must invest in the next « Technological superiority » generation of defense technologies* ». Cette volonté de suprématie se manifeste au travers d'un plan très structuré, tenu à jour par une organisation également très structurée et s'appuie sur un effort budgétaire qui ne faiblira pas (cf. *Le Monde* du 17 novembre 1999, p. 28 : « Les chiffres montrent que les États-Unis tirent largement profit des crédits alloués à la recherche militaire. En

l'industrie doit dégager des résultats à court terme. En tout cas, la recherche en guerre électronique n'est plus ce qu'elle a été. Pourtant, les besoins ne manquent pas.

Il y a donc là, à mon sens, un véritable travail historique à accomplir, à la fois pour que soit conservée la mémoire d'une période particulièrement riche, alors que ses acteurs sont encore là pour en témoigner, et surtout pour éclairer la réflexion politique présente sur le sujet.

Certes, ce sujet peut paraître rébarbatif, du fait de sa technicité et du mystère qui l'a longtemps entouré. Mais la plupart de ceux qui s'y sont consacrés seraient, je n'en doute pas, tout disposés à apporter leur concours à l'historien qui s'attellerait à cette tâche. C'est bien sûr mon cas, car tous ceux qui ont approché la guerre électronique savent qu'il s'agit là d'un virus dont on ne se défait pas. Rassurez-vous : il n'est pas mortel.

1996, cette dernière représentait 0,51 % du PIB contre 0,32 en France »). Cette année-là, selon le spécialiste d'Internet Michel Alberganti, « le DoA a engagé le financement de la recherche de base entrant dans le développement de six technologies clés ouvrant peut-être la voie à une nouvelle rupture comme l'a été Internet ».

LES ACTIVITÉS DE GUERRE ÉLECTRONIQUE DANS L'ARMEMENT TERRESTRE DANS LES ANNÉES 1960

Paul ASSENS¹

LES DIFFÉRENCES ENTRE LES ACTIONS DE GUERRE ÉLECTRONIQUE SPÉCIFIQUES DES DOMAINES DES TÉLÉCOMMUNICATIONS ET DE LA DÉTECTION

Les orientations d'une politique générale en matière de guerre électronique adoptées par l'OTAN (symposium de Washington, janvier 1956) couvrent à l'époque l'utilisation par l'ennemi et par les forces amies des radiations électromagnétiques, excluant dans un premier temps les rayonnements infrarouges, le son et tous les rayonnements à caractère radioactif.

La guerre électronique s'étend donc dans les deux dimensions de la menace et de la parade :

- d'une part, à toutes les mesures prises pour assurer aux forces amies l'utilisation efficace de leurs émissions électromagnétiques, en présence d'actions hostiles de l'ennemi ;
- d'autre part, à toutes les mesures prises pour interdire, réduire ou tourner à notre avantage l'utilisation par l'ennemi de ses propres émissions électromagnétiques.

Il en résulte un certain nombre de définitions de base, dont l'expression désormais courante en langue anglo-saxonne peut quelquefois manquer de clarté. C'est ainsi que, pour avoir voulu

¹ Les photographies illustrant l'article appartiennent à la collection personnelle de l'auteur (DR).

conserver l'agressivité du mot *counter*, les Anglo-saxons sont amenés à désigner la parade par le vocable *counter-countermeasures*, dissection chronologique certes, mais à notre avis peu commode, et dont le prolongement naturel et récurrent en *counter-counter-countermeasures*... sera pour le moins malsonnant.

Quoi qu'il en soit, il nous paraît utile de rappeler ici, *in extenso*, les propositions qui ont été adoptées, du fait de leur emploi généralisé, dans la majorité des publications étrangères (et, hélas !, françaises) sur ce sujet.

Électronic countermeasures - *Contre-mesures électroniques*

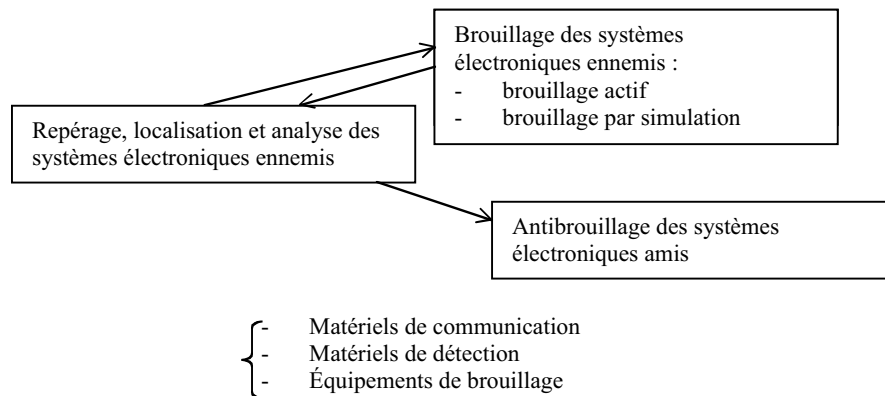
Cette partie importante de la guerre électronique englobe toutes les mesures prises pour réduire l'efficacité des moyens ennemis mettant en jeu des émissions électroniques, à savoir :

- *Active electronic countermeasures* - Contre-mesures électroniques actives :
 - *Electronic jamming* – Brouillage électronique : émission, réémission ou réflexion intentionnelles de signaux électromagnétiques, dans le but de perturber l'usage par l'ennemi de ses systèmes électroniques ;
 - *Electronic deception* – Simulation électronique : émission, réémission, altération, absorption ou réflexion intentionnelles de rayonnements électroniques, soit pour troubler l'ennemi sur l'interprétation des informations reçues par ses équipements électroniques, soit pour créer de fausses indications au sein de ses équipements.
- *Passive electronic countermeasures* – Contre-mesures électroniques passives : repérage d'émissions électromagnétiques, afin de déterminer l'origine et les caractéristiques des émissions ennemies et la nature des missions correspondantes, pour exercer à leur rencontre des contre-mesures actives.

Électronic counter-countermeasures – *Antibrouillage électronique*

Il s'agit de toutes les mesures prises pour assurer aux forces armées le libre et efficace usage de leurs émissions électromagnétiques en présence de contre-mesures ennemies.

Cet exposé didactique, sans doute fastidieux, est néanmoins nécessaire pour éviter à nos historiens de vaines querelles sémantiques sur des sigles maintenant banalisés. On peut le résumer par la figure suivante.

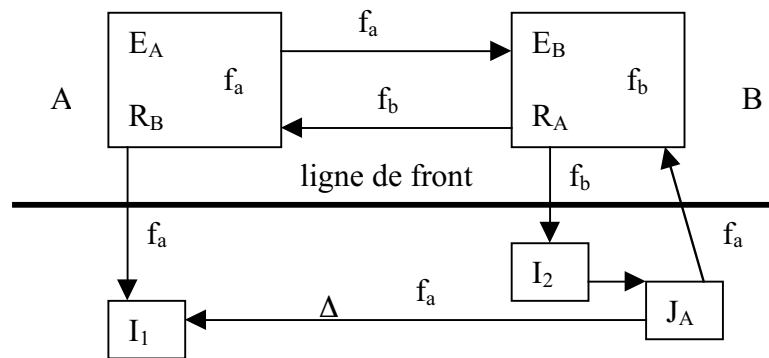


Actions spécifiques comparées de guerre électronique dans le domaine des télécommunications et dans le domaine de la détection

Les réflexions ci-après sont de nature à démystifier le caractère ésotérique du vocable de guerre électronique, par des considérations de bon sens, qui limitent la généralisation abusive de son emploi.

Brouillage d'un système de télécommunications

Une liaison de télécommunications ennemies, entre un point A et un point B, comprend essentiellement, en A et en B, les émetteurs E_A et E_B , respectivement liés en général par deux fréquences f_a et f_b à des récepteurs R_A et R_B correspondants, selon le schéma ci-après. Une ligne de front, plus ou moins fixe, sépare les zones amie et ennemie.



Pour détruire l'efficacité d'une telle liaison, qui peut être le support d'une voie de commandement tactique entre deux PC, PC_A et PC_B , fixes ou semi-mobiles, il convient donc, si l'on s'attaque au récepteur R_A du poste B (le raisonnement réciproque s'applique pour le poste A, selon l'importance donnée à l'accès de l'infrastructure ennemie) :

- de localiser d'abord l'émetteur E_A , pour déterminer sa fréquence de travail f_a avec le récepteur R_A – tâche de l'intercepteur I_1 ;
- de localiser (à partir de l'émission E_B , grâce à l'intercepteur I_2) le récepteur R_A ;
- de disposer d'un brouilleur J_A , proche, pour des raisons opérationnelles d'orientation et de pilotage, de la fréquence f_a ;
- d'établir une liaison permanente I_1 - J_A , assurant le pilotage de la fréquence à brouiller.

Il faut donc disposer d'un ensemble de quatre équipements interdépendants.

En outre, si l'on admet que les puissances rayonnées à partir de l'émetteur E_A , ou d'un brouilleur J_A , reçues au niveau du récepteur R_A , sont toutes deux inversement² proportionnelles aux distances A-B et J_A-R_A , on a intérêt, compte tenu de la puissance, de l'encombrement (antennes) et de la discrétion exigée de l'opérateur de brouillage J_A , à privilégier la plus courte distance possible opérationnellement entre le brouilleur J_A et le récepteur R_A , ce qui peut être difficilement compatible avec l'implantation sur le terrain.

Cet exemple, sommairement décrit, d'une action de brouillage d'une simple liaison bilatérale de télécommunication, montre que les contre-mesures actives peuvent exiger une structure technique assez complexe et coûteuse, dont la mise en œuvre pose parfois des problèmes d'exploitation opérationnels compliqués, l'efficacité et le coût des équipements de contre-mesures étant des paramètres majeurs face à l'enjeu que représente la liaison ennemie.

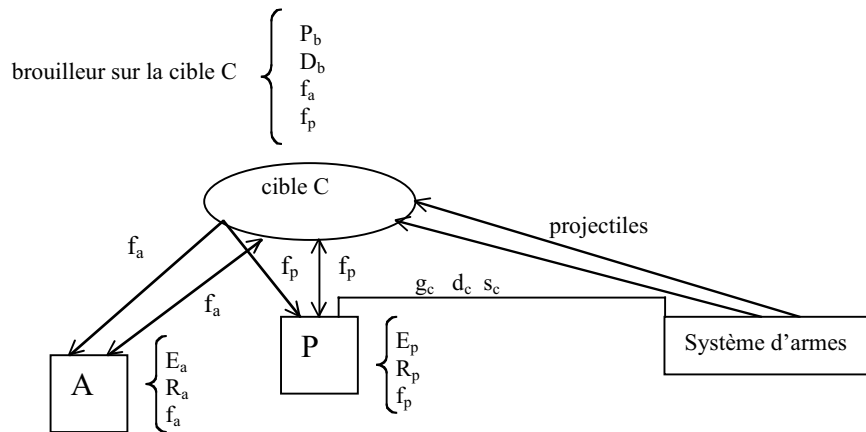
Brouillage d'un système de détection de cibles aériennes

Un système de détection de cibles aériennes comprend en général :

- un radar d'acquisition A, émettant des signaux sur une fréquence f_a , et recevant les signaux reçus par la cible ainsi illuminée sur cette même fréquence, dont la mission est de fournir un préavis sur la route suivie par un avion, assaillant éventuel ;
- un radar de poursuite P voisin, émettant et recevant de même les signaux de la cible sur une fréquence f_p , qui prend en charge la cible réellement menaçante pour le point sensible et transmet continuellement ses coordonnées au système d'arme (canon, missile), selon le schéma ci-dessous.

² La puissance reçue à partir d'une émission isotrope, en un point donné d'une sphère de rayon r , est de la forme kxP/r^2 .

L'autoprotection de la cible peut être envisagée sous la forme d'un brouilleur embarqué B, de puissance P_b , associé à un détecteur passif de radar D_b , qui détecte, localise et analyse les émissions des radars E_a et E_p .



Par rapport à une opération de contre-mesures actives contre un système de communications, il faut noter deux faits marquants :

- la présence en un même site des émetteurs et des récepteurs du radar d'acquisition et du radar de poursuite, ce qui explique la facilité de détection à bord de la cible de ces émissions puissantes, donc la localisation aisée des récepteurs à brouiller, bien avant la limite de détection de la cible porteuse ;
- le rapport des puissances utiles reçues, au niveau de ces récepteurs, en provenance d'une part de la cible, d'autre part du brouilleur, est nettement en faveur du brouilleur.

En effet, les puissances des signaux radars réémis par la cible sont inversement proportionnelles au carré des distances k/r_a^2 à l'émission sur la cible $\times k'/r_a^2$ à la réémission du rayonnement de la cible, frappée par l'émission du radar, et rediffusée dans l'espace. Soit

$$S_{\text{utile}} = kk' / r_a^4.$$

Au contraire, comme dans le cas d'une émission directe, la puissance reçue du brouilleur est en $1/r_a^2$, d'où :

$$S_{\text{brouillage}} / S_{\text{utile}} = K'' \times r_a^2.$$

Cela permet la protection de la cible porteuse, jusqu'à une distance relativement proche du point sensible, et de son système de défense, paralysé par le brouillage.

Comme les puissances mises en jeu par le brouilleur sont importantes, malgré des encombrements réduits des aériens et des équipements largement compatibles avec leur caractère aéroporté, le brouillage total d'un système de défense antiaérienne à base de radars classiques (radars de la période 1945-1965) est *a priori* une opération très rentable.

LES MISSIONS DE GUERRE ÉLECTRONIQUE DES FORCES TERRESTRES

En accord avec les directives générales de l'OTAN – et du *Supreme Headquarters of Allied Powers in Europe* (SHAPE) en particulier –, les missions des forces terrestres des pays membres ont été précisées comme suit.

Repérage des systèmes électroniques ennemis

- matériels de communication : identification des systèmes de communications ennemis (fréquence, type de polarisation, type de modulation, localisation, analyse des modes opératoires, du cryptage des messages) en vue du pilotage des brouilleurs ;
- contrôle des émissions amies : surveillance et contrôle des émissions radio amies (programmation des silences radio), pour en empêcher l'utilisation par l'ennemi à son profit ;
- systèmes de détection et autres : brouilleurs, systèmes de guidage ou de télécommandes de missiles sol-sol courte portée utilisés par l'ennemi (fréquence, polarisation, balayage, lois de modulation, localisation, identification des missions et des fonctions particulières), dans le but de brouiller ou de se protéger contre les brouillages.

Brouillages

Les forces terrestres ont la charge de brouiller les équipements utilisés par l'ennemi :

- Brouillage actif à l'encontre des communications des liaisons tactiques :
 - des aides à la navigation (à l'usage du combat au sol) ;
 - des radars de surveillance du sol ;
 - des systèmes de localisation de l'artillerie et des mortiers ;
 - des radars de conduite de tir et d'acquisition des systèmes de défense antiaérienne à courte portée ;
 - des équipements aéroportés utilisés par l'ennemi pour le bombardement aveugle des forces terrestres ;
 - des systèmes de guidage et de télécommande des missiles à courte portée (antichars en particulier) ;
 - des systèmes de mise à feu des fusées de proximité et des missiles antichars ;
- Brouillage par simulation : systèmes de leurres de déception, dans les domaines des communications et de la détection.

Antibrouillage des systèmes électroniques amis

Il peut être donné une liste non exhaustive des mesures d'antibrouillage, telles que :

- les matériels conçus dès l'origine comme difficilement brouillables (radars à fréquences aléatoires, radars à compression d'impulsion, radars continus à bande étroite, radars *pulse-doppler*) ;
- les techniques des « boîtes noires » de procédés d'antibrouillage associés aux matériels (corrélation des signaux, cryptage sophistiqué des communications) ;
- plus généralement, l'entraînement systématique des opérateurs en présence de brouillages actifs ennemis, de simulations ou d'intrusions.

ACTIVITÉS DE LA SEFT A LA DIRECTION TECHNIQUE
DES ARMEMENTS TERRESTRES EN ÉLECTRONIQUE
DANS LES ANNÉES 1960

Il ressort de ce qui précède que tout programme d'étude et de recherche dans ce domaine, sur chaque système électronique, doit comprendre :

- une étude théorique systématique des menaces les plus prévisibles ;
- des expérimentations de confirmation des effets de menaces réelles sur les systèmes ;
- des travaux de réflexion sur la parade, conduisant au développement de matériels protégés, plus ou moins difficilement brouillables, et à leur expérimentation face aux mêmes conditions de menace, par comparaison avec les matériels classiques.

Nous donnerons, dans cet exposé :

- un tableau des principales réalisations de matériels de guerre électronique touchant aux systèmes de communication (de 1960 à 1975) ;
- des résumés de travaux radars dans le domaine de la détection, touchant plus particulièrement les radars de défense antiaérienne et les radars de surveillance au sol ;
- des programmes d'étude et de fabrication de matériels de détection et de localisation des radars ennemis, d'usage tactique dans le combat terrestre.

Le matériel de guerre électronique»communications»

Type d'action		HF 1,5-30 MHz		VHF – FM 20-80 MHz Poste de l'avant	Faisceaux 50-4 000 MHz
Passif	Interception Écoute Identification Localisation	Station d'écoute Goniomètre <i>Plath</i>	Système ELEBORE	Système ELODEE	Système ELFE
Actif	Brouillage Intrusion	BINOC	Système ELEBORE	BROMURE	

Études»détection»

À propos de la menace offensive aéroportée sur les radars classiques de défense (anti-aérienne), on peut prendre l'exemple des radars ACAL et COTAL, associés au canon de 90 mm.

De 1954 à 1962 ont été conduits des travaux de guerre électronique en vue de réaliser des brouilleurs aéroportés de « caractéristiques maximales », équipés de tubes carcinotrons, présentant une grande facilité de modulation alliée à une puissance continue notable (supérieure à 250 watts, ou 2 x 500 watts dans sa version lourde), et pouvant être implantés pour expérimentation à bord d'avions du type SO 25, ou Nord 2 500.

Le brouilleur « lourd »(cf. fig. 1) a un tube carcinotron de 2 500-3 500 MHz. Sa bande de brouillage est de 200 MHz et sa puissance est de 2 x 500 W. Pour l'aérien, le gain est de l'ordre de 30 et l'ouverture de 40 °. Les modulations sont faites par générateur de bruit, en dents de scie, ou par générateur sinusoïdal.

Des expérimentations de brouillage des radars cités ont eu lieu, en 1955, en Afrique du Nord (le Kreider) : elles ont confirmé la vulnérabilité de ces radars. Ces campagnes d'essais ont permis d'orienter les études de protection de ces radars, dont l'efficacité a été établie lors des expérimentations ultérieures au camp du Larzac, en 1956-1957 (cf. fig. 2).

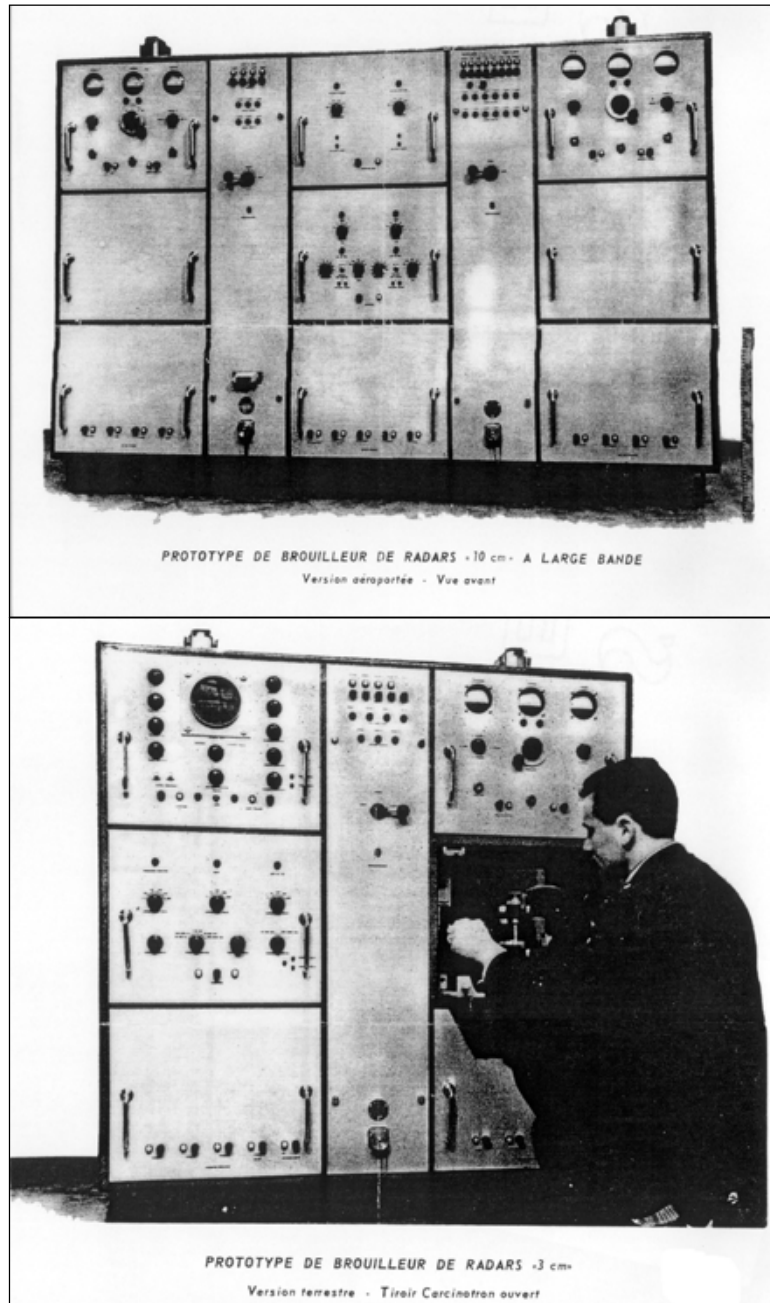
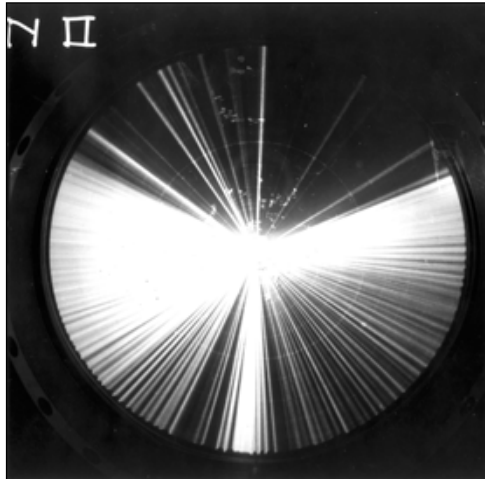
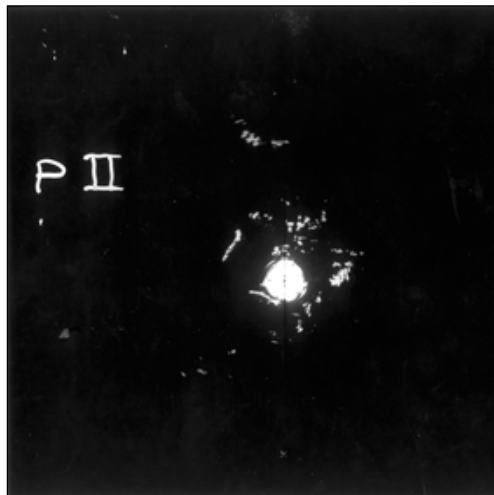


Figure 1

Figure 2 : essais au Larzac (1956-1957)
Brouillage à modulation de fréquence
Distance brouilleur-radar : 72 km



Écran de radar non protégé (récepteur ACAL normal)



Récepteur ACAL protégé contre les brouillages

Études de contre-mesures applicables aux radars de surveillance du sol

Une étude³ a été consacrée à la vulnérabilité au brouillage des radars de surveillance du sol en service dans les forces terrestres : radars SDS, DRMT-IA et RASURA, dont les principales caractéristiques sont :

- Radar DRMT-IA : Puissance de 40 kW, longueur d'onde $\lambda = 3$ cm, portée sur véhicule de 30 km, et sur piéton de 15 km ;
- Radar RASURA d'infanterie : puissance de 2 kW, longueur d'onde $\lambda = 3$ cm, portée sur véhicule de 5 km, et sur piéton de 3 km.

Face à des brouilleurs puissants à carcinotron (2 kW ; cf. figure 1b) dans la gamme des 3 cm de longueur d'onde, il se confirmait, par des essais réels sur le terrain, que si l'on tient compte :

- des servitudes de moyens et du prix de revient d'un tel brouilleur, nécessairement associé à un récepteur d'analyse de la fréquence de l'un ou de l'autre radar (radar doppler à bande étroite) ;
- de l'indiscrétion d'une telle source de brouillage continue, à aérien fixe, dans la zone de combat ;
- du danger de localisation polystatique du brouilleur, à partir des radars de surveillance eux-mêmes ;

l'emploi d'une contre-mesure de brouillage actif, au sol, à l'encontre des radars de surveillance ne paraît pas rentable.

Il a paru préférable de faire porter tout l'effort, dans le domaine de la guerre électronique, sur l'élaboration d'un système de déception à leurres (balises), ou d'un système de repérage mobile, précis, rapide et à grande capacité du trafic d'écoute, en laissant aux projectiles (artillerie) ou aux petits missiles le souci de neutraliser l'émission gênante pour les mouvements des troupes.

³ ASSENS, Paul (ingénieur principal), *Rapport d'études sur le brouillage des radars de surveillance au sol*, SEFT, octobre 1960.

Des études ont été conduites dans ce domaine, dans le but d'obtenir des maquettes expérimentales pour alimenter une base d'investigations quant à la rentabilité de disposer sur le champ de bataille d'une densité « économique » de faux objectifs simulés dans une zone de déploiement d'une division (30 x 40 km), tels que :

- concentration de chars et de véhicules, ou mouvements de patrouille ;
- manœuvres limitées d'hélicoptères au voisinage du sol ;
- activités de terrassement ou de ravitaillement ;
- évolution de plates-formes aériennes en vol stationnaire basse altitude.

Contre-mesures passives à usage tactique, contre les radars de surveillance au sol

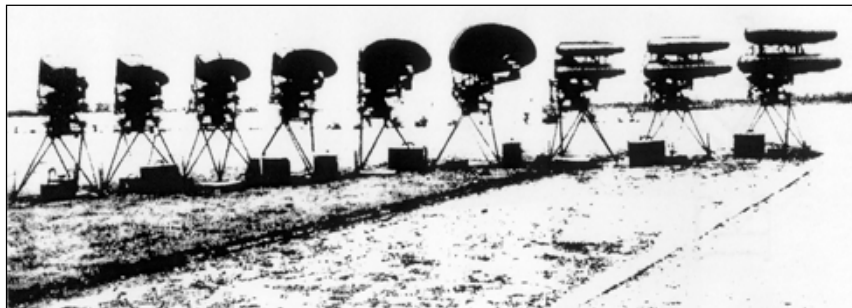
En vue d'une mise en service dans les unités, dans la période 1970-1975, deux types de matériels ont été développés, après étude des réalisations préliminaires d'équipement de première génération.

Le premier est le détecteur léger de radars TAPIRON. Cet appareil est destiné aux patrouilles d'infanterie, pour les informer, par un signal audio, de l'illumination d'un radar de surveillance du sol, et pour leur permettre un cheminement discret, hors de la portée d'un tel radar ou du déclenchement d'une action destructrice, ou encore d'un brouillage éventuel.

Ces matériels couvrent, en deux sous-gammes, la gamme de fréquences de 8 000 à 40 000 MHz, et détectent les radars continus comme les radars à impulsions. Ils ont fait l'objet d'une homologation OTAN et de nombreuses demandes étrangères.

L'autre type de matériels est constitué par les localisateurs de radars (système SITERE, cf. fig. 3). Le système constitue une base tristatique de localisateurs portables pour un relèvement précis (de l'ordre du millième) des radars de surveillance du sol ou des radars anti-mortiers ennemis, dans une gamme très large de fréquences (de 1 000 à 40 000 MHz) avec identification, à partir des mesures de fréquence HF et des fréquences de récurrence.

Figure 3



Les informations sont transmises par des moyens de codage et de décodage à un centre d'exploitation, qui élabore la localisation univoque et la mise en mémoire des données reçues.

Le système doit concilier :

- une haute sensibilité et une probabilité d'interception élevée, pour la localisation approchée des émissions furtives ;
- une sensibilité moindre, à faible probabilité d'interception, pour la localisation précise des émissions à caractère plus permanent.

Une expérimentation bipartite en Angleterre a même permis de vérifier qu'un tel ensemble tristatique, embarqué sur des navires, était capable d'assurer une localisation suffisamment indépendante des mouvements des navires pour constituer un moyen valable de localisation passive d'une formation aérienne assillante.

Enfin, dans une large gamme d'écoute (de 1 000 à 40 000 MHz) a été lancé un programme de stations d'analyse à caractère technique et scientifique, à l'usage des services techniques. Ces stations d'écoute et d'analyse des émissions ennemies d'usage stratégique en temps de paix (Sphinx) étaient destinées à renseigner le commandement dès le temps de paix sur la structure des radars et des brouilleurs ennemis, en vue :

- de l'étude, de la préparation et de la mise en œuvre des brouilleurs amis appropriés ;
- de l'adaptation des équipements à l'évolution de la guerre électronique.

Ces stations devaient être implantées dans les sites privilégiés, dans un rayon d'écoute dépassant largement les zones d'opérations conflictuelles prévisibles. La République fédérale d'Allemagne s'est vivement intéressée à ces équipements, commandés en 1962.

COOPÉRATION INTERNATIONALE

En dépit du caractère très confidentiel des informations dans le domaine de la guerre électronique, de nombreuses conventions de coopération ont été établies, tant bipartites (franco-britannique, franco-allemande, franco-américaine⁴) que tripartites (franco-germano-italiennes).

Dans la même perspective d'échanges, des cycles de conférences ont été organisés à l'École de contre-mesures de l'OTAN à Anzio (Italie), et à l'Institut Leonardo Torres Quevedo de Madrid.

Il nous semble essentiel de souligner que, dans toute approche d'échanges de renseignements sur des sujets aussi protégés que ceux de la guerre électronique, au-delà des relations de confiance et de naturelle sympathie entre des experts compétents, confrontés aux mêmes difficultés, l'importance et la qualité des travaux français, dans de nombreux domaines (comme le carcinotron), devraient toujours constituer nos meilleures lettres de créances.

⁴ cf. l'expérimentation à Colomb-Béchar sur la vulnérabilité au brouillage des récepteurs du missile sol-sol 4200.

CONCLUSION

J'adopterai comme conclusion celle d'un cours de l'*US Army School* sur l'*Introduction à la guerre électronique* (appelée par Churchill « guerre de sorcellerie ») :

« Cette guerre est une joute, ressemblant plus à l'escrime qu'à une course : par sa nature, elle consiste à alléger les bottes et les parades ; la trempe de l'acier, l'adresse et l'agilité des adversaires ont une importance capitale dans la lutte. »

Un « guerrier électronique » ne connaît pas le repos... Il doit en permanence se passionner pour imaginer toutes les perspectives d'évolution (coût / efficacité, innovation technique, découverte de nouvelles technologies) de l'arme et de la cuirasse.

BIBLIOGRAPHIE

- Brevet n° 681854 (Rombout, Assens, juin 1955) : système de pointage applicable à la poursuite automatique par radar d'un avion porteur d'un brouilleur anti-radar.
- *Historique de la guerre électronique (de la Deuxième Guerre mondiale à la guerre froide)*, cours de l'*US Army School*, Fort Monmouth, NJ.
- SHAPE, *Symposium de contre-mesures*, La Haye, 1960.
- ASSENS, Paul, *Conférence sur les possibilités offertes au commandement par les progrès scientifiques et techniques appliqués aux matériels de guerre électronique*, Centre des hautes études militaires, octobre 1964.
- ASSENS, Paul, *Rapport de mission guerre électronique aux États-Unis*, janvier 1956.
- ASSENS, Paul, *Rapport sur les brouillages des radars classiques*, SEFT, juin 1956 et septembre 1957.
- ASSENS, Paul, *Rapport d'études sur le brouillage des radars de surveillance au sol*, SEFT, octobre 1960.
- COMBAUX (ingénieur général), *La guerre électronique*, École supérieure de guerre, 1959.

HISTORIQUE DU PROJET EGIDE : BILAN DES ÉTUDES PRÉPARATOIRES

Jean-Pierre MOLLER

Vers le milieu des années 1960, les marins et les laboratoires du Centre d'études de Pipady, à Toulon, éprouvent, face à la menace du déploiement de la flotte soviétique en Méditerranée, le besoin de surveiller et de maîtriser le spectre HF. Les tout premiers travaux de laboratoire, sur paillasse, sont très prometteurs et mettent en évidence l'emploi, par les forces maritimes soviétiques, de transmissions HF glissant en fréquences par vobulation.

En 1969, des officiers de la Marine américaine, tout d'abord incroyables, sont convaincus par la démonstration qui leur est faite à Toulon. En 1970, l'état-major de la Marine (EMM) exprime un besoin d'interception et de goniométrie des émissions très brèves susceptibles d'être émises par des sous-marins du bloc soviétique.

Les études menées, tant par la DRET que par la DCN / STCAN, avec la participation de la DCAN Toulon (centre d'études CAPCA) et de plusieurs industriels (parmi lesquels Thomson-CSF), débouchent successivement sur deux maquettes :

- maquette ALB (analyseur large bande) en 1971-1973 ;
- maquette ALBG (analyseur large bande et goniométrie) en 1975-1978.

Elles permettent de valider un nouveau concept, autorisant l'interception et la goniométrie simultanées des émissions, condition indispensable dans le cas des émissions très brèves.

En 1978, le développement exploratoire d'EGIDE est lancé sur financement par la section commune. Ce développement exploratoire devait se concrétiser par une maquette permettant une

évaluation technique et opérationnelle. Celle-ci avait été jugée indispensable pour :

- confirmer ou recadrer les choix techniques adaptés ;
- apprécier l'impact d'un tel concept vis-à-vis des stations d'écoute classiques et des chaînes de radiogoniométrie ;
- étayer l'expression des besoins militaires.

Cette maquette conduisait à franchir, par rapport à l'ALBG, qui n'était qu'un « capteur », un saut technique très ambitieux, concernant en particulier l'extracteur et l'ensemble informatique multiprocesseurs associés.

L'expérience acquise par le CAPCA avec l'ALBG et sa compétence en matière de systèmes informatiques avancés ont conduit la DCN à lui confier la maîtrise d'œuvre industrielle du projet, Thomson-CSF / DTC étant le principal sous-traitant.

Au début de 1982, en phase d'intégration du sous-ensemble extraction (sous responsabilité CAPCA), de nombreuses difficultés techniques apparaissent. L'évaluation technique, prévue à l'automne 1982, eut finalement lieu à l'automne 1985, et fut suivie d'une évaluation opérationnelle pilotée par la Section technique de l'armée de Terre (STAT), au cours du premier semestre 1986. Un complément d'évaluation technique s'est terminé en janvier 1987.

Une revue de projet a été lancée en 1985 auprès de Thomson-CSF, avec l'aide des états-majors, de la Direction générale de la sécurité extérieure (DGSE) et du CAPCA, dans le but :

- de recenser les besoins potentiels des armées et services concernés (y compris l'évaluation des menaces futures) ;
- d'identifier des besoins communs susceptibles de conduire à un matériel interarmées (série accrue, interopérabilité, etc.) ;
- de prendre en compte les possibilités techniques et technologiques actuelles ;
- de tirer parti des évaluations technique et opérationnelle de la maquette EGIDE ;
- de prendre en compte l'aspect « mise en réseau » ;
- d'estimer le processus de développement et de production (calendrier, planification financière, etc.).

Cette revue de projet s'est achevée au début de 1987, et a conduit à la définition d'un produit au rapport prix-performance satisfaisant. Le développement a été lancé en 1987 par l'état-major des armées (EMA). Il fut confié à la SEFT par la DPA, sur proposition de la CREI.

Un groupe technico-opérationnel constitué par des responsables de l'EMA, l'EMAT, l'EMAA, l'EMM, la STAT, la DGSE et la SEFT était chargé du suivi du projet.

CADRE GÉNÉRAL DU BESOIN

L'utilisation des transmissions dans la gamme haute fréquence (HF) connaît un regain important, lié aux qualités intrinsèques qu'elles possèdent :

- équipements au système de complexité moyenne, voire faible ;
- sûreté du canal de transmission ;
- coût d'acquisition et d'utilisation modeste.

Ce regain se traduit par différents effets :

- un accroissement du nombre d'émissions, donc de l'encombrement spectral ;
- l'application à ces transmissions des nouvelles techniques de protection du canal et de l'information que sont :
 - les émissions brèves ou rafalées,
 - les émissions par recherche du canal libre,
 - les émissions en évasion de fréquence,
 - les émissions à étalement de spectre,
 - les émissions chiffrées.

Ces émissions sont dites « exotiques ».

Les équipements de guerre électronique actuellement en service permettent d'assurer la surveillance des émissions classiques dans le spectre HF. Afin de faire face à l'évolution des moyens de transmission HF et de maintenir les capacités de recherche du renseignement d'origine électromagnétique, il est nécessaire de prévoir la mise en place de moyens d'interception des émissions « exotiques », en raison de leur arrivée progressive sur les théâtres d'opérations : les taux d'utilisation, estimés à moins de 5 %

en 1990, pour des réseaux importants, devraient être de 25 à 30 % en l'an 2000 et se généraliser à l'ensemble des réseaux après cette date. Cette évolution de la menace concerne l'ensemble des organismes utilisant le renseignement d'origine électromagnétique, et la mise en place des moyens de type EGIDE permettant de la suivre intéresse tous les états-majors, ainsi que la DGSE.

BESOIN OPÉRATIONNEL

Organe de recherche du renseignement d'origine électromagnétique, l'ensemble de goniométrie et d'interception des ondes décimétriques (EGIDE) a pour but de recueillir et de traiter les émissions radio-électriques de tous types de la gamme haute fréquence (0,5 à 30 MHz), afin d'en extraire des informations permettant d'acquérir et de maintenir la connaissance du dispositif adverse. Il peut éventuellement, après un traitement simplifié, traduire en renseignement tactique, assimilable par les états-majors, les interceptions brutes recueillies.

Cet ensemble spécifique est plus particulièrement chargé de l'interception et du stockage, de la localisation et de l'identification des nouveaux types d'émissions, mais il doit être intégré dans les chaînes existantes ou en cours d'étude, qui devaient entrer en service vers les années 1993-1995, de façon à assurer un système global de recherche du renseignement d'origine électromagnétique. Il est confirmé que la localisation est un impératif du système, qu'elle soit effectuée par mise en réseau ou par sitométrie.

L'ensemble doit être apte à remplir sa mission de recherche du renseignement d'origine électromagnétique en temps de paix, de crise et de guerre, en Europe et dans les zones d'intervention possibles de nos forces ou services pour les systèmes mobiles ; dans ces cas, grâce à un traitement simplifié, il doit fournir des informations exploitables sur le plan tactique.

BESOINS OPÉRATIONNELS PARTICULIERS

Grâce à des dispositifs complémentaires, EGIDE doit pouvoir remplir des fonctions d'alerte, de surveillance, dans des secteurs et des gammes de fréquences sélectionnées, et d'analyse technique.

Dans le cadre de l'analyse, les paramètres devant permettre l'identification sont (liste non exhaustive) :

- plage de fréquence (f min, f max) ;
- largeur de la bande ;
- durée des paliers ;
- heure et durée de l'émission ;
- azimuth et site moyens (éventuellement degré de confiance) ;
- niveau du signal ;
- nouveau signal, ou bien déjà identifié, ou bien recueilli.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Le système EGIDE est un système de goniométrie et d'interception d'émissions radioélectriques dans la gamme HF 0,5 à 30 MHz. Son architecture s'articule ainsi :

- une partie « capteur », comprenant les modules : antenne, récepteur, analyseur, extracteur ;
- une partie « exploitation – visualisation ».

Le « capteur »

Le réseau antennaire comporte de sept à onze cadres croisés, placés sur un triangle équilatéral de 50 à 300 mètres de côté. La goniométrie, utilisant le principe d'interférométrie à analyse parallèle, est effectuée à partir des informations de phase des signaux reçus au niveau de cinq des antennes du réseau, choisies en fonction de la gamme de fréquence analysée. La précision de goniométrie est de 1° VQM onde de sol et 3° VQM onde ionosphérique.

La bande veillée peut être de 1,4, de 2 ou de 3,6 MHz, suivant la résolution spectrale souhaitée. Pour chacune des voies de réception, on effectue une analyse numérique large bande ($B = 200$ kHz). Elle permet d'évaluer la répartition spectrale (amplitude, phase) des signaux reçus avec une résolution spectrale allant de 500 Hz à 2 kHz. On extrait donc, comme information brute, l'amplitude et la direction des signaux reçus dans chaque canal fréquentiel de la bande analysée.

Ces informations étant datées, elles permettent d'effectuer un tri concernant le type d'émission reçue :

- émission à fréquence fixe ;
- émission de type « rafale » ;
- émission à évasion de fréquence.

La partie « exploitation – visualisation » traite ces différents types d'émissions de la manière suivante :

- mode 1 : envoi des données relatives aux émissions à fréquence fixe vers des systèmes d'écoute classique ;
- mode 2 : visualisation des émissions brèves et à évasion de fréquence ;
- mode 3 : localisation des différents émetteurs à partir d'une mise en réseau de systèmes EGIDE.

L'exploitation doit permettre le suivi théorique de 500 pistes rafale, ou 300 pistes rafale et 200 pistes EVF, dans la bande veillée.

CONCLUSION

Les premières études d'EGIDE ont démarré en 1965. Trente-cinq ans plus tard, seul un prototype d'industrialisation est réalisé et fonctionne, et la suite du programme ne sera pas achevée avant 2005. Quarante années auront été nécessaires pour le développement d'un intercepteur HF qui reste révolutionnaire encore aujourd'hui et qui, avant tout développement, en est à son troisième âge technologique au moins, démarrant avec des tubes à vide et se situant au plus haut niveau des circuits intégrés d'aujourd'hui.

Cette durée anormalement longue résulte de deux éléments :

- la complexité technique du processus d'élaboration du renseignement d'origine électromagnétique, qui rend difficile la présentation des choix à des décideurs non techniciens ;
- la lourdeur administrative des décisions programmatiques et de leur suivi.

Cependant, il reste remarquable qu'après quarante années de maturation, ce programme reste au plus haut niveau de la technologie, et qu'après sa mise en œuvre opérationnelle, il ait entraîné des changements profonds dans l'organisation du renseignement d'origine électromagnétique dans le domaine HF.

LA GUERRE ÉLECTRONIQUE DANS LA MARINE FRANÇAISE, 1960-1976

Gilbert MARGIER

Aux alentours de 1962, une menace nouvelle contre les bâtiments de surface a fait son apparition dans l'arsenal soviétique : celle des missiles anti-navires. Il est très vite devenu évident pour l'état-major de la Marine qu'il ne disposait d'aucune protection contre cette menace. Au terme d'un inventaire des solutions possibles, appuyé par quelques essais techniques, une seule solution réaliste s'est imposée : celle qui reposait sur l'emploi des émissions électromagnétiques pour contrer les émissions de guidage des missiles. La guerre électronique active, avec ses différents types de brouilleurs et de leurres, est ainsi devenue l'arme essentielle de protection des bâtiments de surface, et leur a permis de regagner l'avantage qu'ils avaient perdu.

C'est cet aspect de l'histoire de la Marine française, entre 1962 et 1976, qui sera présenté.

SITUATION EN 1962

La journée d'études *Les ingénieurs militaires et l'émergence d'une nouvelle industrie française de l'armement, 1945–1960*, organisée par le Comité pour l'histoire de l'armement, le 20 mai 1999¹, m'avait déjà donné l'occasion de présenter une communication intitulée : « Les débuts des matériels de guerre électronique de la Marine en France ».

Si je récidive aujourd'hui, mon intention n'est pas de compléter devant vous l'histoire de ma carrière dans ce domaine, mais de

¹ Ses actes sont disponibles sur simple demande auprès du Département d'histoire de l'armement.

vous exposer pour quelles raisons et comment une évolution majeure a été décidée par l'état-major à un moment crucial de la guerre froide, aux alentours de 1962.

On peut rappeler ici les conclusions de cette communication, qui couvrait la période 1945-1962 :

- les bâtiments de surface ont à faire face aux menaces sous-marines (torpilles), aériennes (torpilles, bombes, roquettes, canons), et à celle des mines. Les sous-marins sont soumis aux menaces sous-marines (torpilles, grenades) et aériennes ;
- les moyens de guerre électronique passive (détecteurs de radars) ont pour rôle de renseigner la situation surface tenue à l'aide des radars de veille du bord. Tous les bâtiments en sont équipés ;
- les moyens actifs (brouilleurs à bruit) ont pour rôle de rendre illisibles les écrans des radars de veille adverses. La doctrine d'emploi en est encore incertaine ; seuls quelques bâtiments en sont équipés. Ces moyens sont commandés depuis le central opérations ; ils ne sont pas organisés, à proprement parler, en système ;
- une industrie très compétente s'est développée en France.

NOUVEAUX BESOINS OPÉRATIONNELS

Apparition des missiles anti-navires

Aux alentours de 1962, une nouvelle menace contre les bâtiments de surface a fait son apparition : celle des missiles (subsoniques) anti-navires. La menace soviétique commence à se préciser avec des missiles air-mer (lancés depuis un bombardier volant à haute altitude), et mer-mer (lancés depuis un bâtiment de surface ou un sous-marin).

Les milieux de la Marine française avaient de bonnes raisons de s'inquiéter d'une telle menace, puisque le développement de tels missiles avait été lancé en France : mer-mer 38, Exocet français, autodirecteur de l'Otomat allemand.

Les caractéristiques principales des missiles soviétiques étaient les suivantes :

- vol : ces missiles sont tirés à grande distance (30 à 50 NM). Leur profil de vol peut être à haute altitude, lorsqu'ils sont lancés par un bombardier, ou à très basse altitude, dans le cas d'un lancement depuis la surface ;
- méthode de lancement : le bombardier détecte la flotte avec son radar de veille, choisit son objectif (évidemment plutôt un bâtiment majeur qu'un auxiliaire) et concentre sa recherche sur cet objectif. Le balayage de son antenne, circulaire au début (première phase de l'approche), se réduit alors à l'exploration d'un secteur centré sur l'objectif choisi (deuxième phase). Les données de repérage de ce dernier sont communiquées au missile. Celui-ci, une fois lancé, exécute la première partie de son vol en navigation programmée pour atteindre l'objectif. Dans le cas où le missile est lancé depuis la surface (au-delà de l'horizon), un avion relais à haute altitude lui communique les éléments de désignation d'objectif par liaison radio ;
- acquisition de la cible et accrochage de l'autodirecteur : le missile est équipé d'un autodirecteur électromagnétique, sorte de radar de conduite de tir embarqué. Lorsque le missile parvient à portée de détection de la cible qui lui a été désignée, ce radar est mis en route et entame une procédure de recherche (troisième phase). Dès qu'il reçoit un écho répondant à des critères de sélection préétablis, il cesse sa recherche, ne considère plus que cet écho et le poursuit (quatrième phase) jusqu'à l'atteindre.

À chacune de ces quatre phases successives correspondent des émissions électromagnétiques spécifiques qui, si elles sont interceptées, permettent de les identifier.

Parades possibles à l'époque

Au niveau d'une flotte, cette menace a accéléré l'évolution vers des dispositifs dispersés jusqu'à l'horizon. En contrepartie, chaque bâtiment a dû être en mesure de se défendre individuellement. Les moyens de défense individuelle existants étaient les suivants :

- des radars de veille lointaine : ils concourent à détecter les bombardiers lointains, et peut-être le missile ;
- des moyens de guerre électronique, efficaces pour l'interception des signaux à condition d'être exploités par des opérateurs très bien entraînés ;
- des missiles sol-air et leur conduite de tir, inefficaces contre les missiles et à trop courte portée contre les bombardiers ;
- de l'artillerie antiaérienne, avec sa conduite de tir : elle est valable seulement comme moyen ultime, dans les dernières secondes de vol du missile et à condition d'avoir une cadence de tir très élevée ;
- des facultés de manœuvre du bâtiment, inefficaces, puisque l'autodirecteur poursuit sa cible avec bien plus d'agilité que celle-ci ;
- un camouflage électromagnétique, dont l'efficacité est limitée à la réduction des points brillants de la surface apparente radar.

Nouvelle expression du besoin de l'état-major

Au terme de cet inventaire, une conclusion s'est imposée : pour parer à une menace de nature électromagnétique (le radar de l'autodirecteur du missile), il fallait recourir à des moyens électromagnétiques (des contre-mesures actives, telles que brouilleurs et leurres), à la condition d'être certain de leur efficacité. La guerre électronique passait ainsi du statut d'accessoire utile à la connaissance de la situation à celui de composant essentiel des systèmes de défense.

La nouvelle expression du besoin devenait à peu près la suivante : assurer la protection des bâtiments de surface contre les missiles à l'aide d'un système automatique, à réaction rapide, permettant de mettre en œuvre, de manière adaptée à chaque type de missile et à

chaque phase successive de son vol, tous les moyens de contre-mesures passives et actives du bord, en conjonction avec les autres moyens de défense du bord et en évitant leurs interférences réciproques.

LE SYSTÈME DE GUERRE ÉLECTRONIQUE : SOLUTIONS TECHNIQUES

Principe du système

Chaque système de missile adverse peut être caractérisé par les signaux électromagnétiques qu'il émet. Ceux-ci constituent sa signature. À l'époque, un fonctionnement purement passif (sur émission infrarouge) ne paraissait pas concevable. Il s'agit donc de reconnaître le plus rapidement possible cette signature, pour identifier le type de système et la phase de la séquence de tir engagée. Cette connaissance, une fois acquise, doit permettre de mettre en route des contre-mesures actives efficaces. Tel est le principe adopté.

Établissement d'un catalogue de signatures électromagnétiques

Un des éléments essentiels du système de guerre électronique était la constitution d'un catalogue des signatures électromagnétiques des signaux en cause : ceux du radar de veille du bombardier, ceux de l'autodirecteur du missile, ceux de la liaison radio entre bombardier et bâtiment de surface adverse. Ce rôle est dévolu au renseignement électromagnétique : de sa qualité dépend, dans une large mesure, l'efficacité de la protection. Cependant, les choix des techniques de contre-mesures actives se sont portés sur des procédés capables de conserver une efficacité certaine, au prix d'une dégradation, dans le cas de lacunes dans le renseignement ou d'apparition d'un système adverse inconnu.

La confrontation des paramètres des signaux interceptés avec les valeurs consignées dans le catalogue permettait d'identifier le système adverse, sans ambiguïté dans la majorité des cas.

Le processus de confrontation, pour aboutir rapidement (un radar est caractérisé par cinq paramètres au moins), devait être exécuté sous forme numérique dans les calculateurs du système de combat du bord (SENIT).

ORGANISATION LOGIQUE DU SYSTÈME DE GUERRE ÉLECTRONIQUE

L'organisation logique du système de guerre électronique fait partie du système de combat du bord. Outre les catalogues de signatures électromagnétiques, ses calculateurs ont en mémoire des séquences préétablies de réactions spécifiques à chaque système de missile adverse. Le système de combat est programmé pour assurer successivement les fonctions suivantes :

- détecter et identifier le système adverse ;
- repérer la phase de lancement du missile ;
- initialiser la séquence de protection appropriée ;
- déclencher les actions adéquates et les stopper au bon moment.

Contre-mesures passives

Le détecteur de radar doit être capable de fournir instantanément, sous forme numérique, la mesure des paramètres essentiels de chaque impulsion radar reçue : azimut, fréquence, niveau, largeur d'impulsion. À l'aide d'une logique de tri fondée sur la corrélation avec les signaux reçus ultérieurement, d'autres paramètres du même radar peuvent être déterminés : niveau maximum au moment du passage de l'antenne sur son objectif, caractéristiques du balayage d'antenne, fréquence de répétition des impulsions. Toutes ces mesures sont transférées aux calculateurs de bord.

Contre-mesures actives

Celles-ci seront présentées, dans la suite de l'exposé, selon l'ordre chronologique de leur mise en œuvre au cours des phases successives d'engagement du tir du missile adverse.

Les leurres de dilution (ou de confusion) sont constitués de nuages de paillettes réfléchissantes (en anglais : *schaffs*, en américain : *windows*) mis en place à basse altitude par des roquettes à longue portée. Dans la mesure où ces nuages donnent, dans le radar de veille du bombardier adverse, des échos semblables à ceux de bâtiments de surface, ils concourent à compliquer et retarder sa désignation de l'objectif (phase un), voire à lui faire lancer un missile sur un leurre.

Si la précédente parade n'a pas réussi, le radar de veille a sélectionné le bâtiment, et ses signaux correspondent à ceux de la phase deux. Dans ces conditions, le brouilleur à bruit peut être mis en route sans risque supplémentaire. Pour être efficace, le bruit émis doit être d'un niveau très supérieur à l'écho propre du bâtiment, afin de faire perdre au radar adverse la mesure de la distance de son objectif. Cependant, il peut continuer à en connaître la direction, par réception passive des signaux de brouillage.

Si le degré de sophistication du récepteur du radar de veille adverse, ou bien l'habileté de son opérateur, sont tels que la précédente contre-mesure n'a pas réussi, l'émission de l'autodirecteur est détectée dans la phase trois de recherche de son objectif. L'arrêt du brouilleur à bruit, qui jouerait autrement le rôle de balise de ralliement pour le missile, devient impératif : le brouilleur-répondeur est alors mis en route. Le principe de ce brouilleur consiste à « décevoir » l'autodirecteur du missile en lui renvoyant l'impulsion reçue par le bâtiment, suffisamment amplifiée pour que son niveau soit supérieur à son écho propre et le masque en totalité. Si l'on retarde progressivement ce signal amplifié dans le temps, le missile se met à poursuivre un bâtiment fictif, situé dans la même direction que le bâtiment réel mais de plus en plus éloigné. Quand ce brouillage cesse, le missile a perdu son objectif et ne peut passer à la phase quatre (d'acquisition). Il recommence alors une phase de recherche et perd ainsi une part précieuse de son temps de vol (quelques minutes).

L'autodirecteur du missile risquant d'acquiescer à nouveau son objectif, l'action du brouilleur-répondeur est conjuguée avec une tactique de mise en œuvre de leurres de déception et de manœuvres du bâtiment.

Ces leurres donnent des échos radars analogues à celui du bâtiment, mais, contrairement aux leurres de dilution, ils sont disposés à courte distance de celui-ci, selon une géométrie soigneusement combinée avec ses manœuvres.

Dans ces conditions, après décrochage du missile obtenu à la fin du processus du brouilleur-répondeur, le missile se trouve en présence de plusieurs bâtiments simulés et d'un bâtiment réel situé dans une position différente. Si la géométrie est judicieusement choisie, il y a toutes chances pour qu'il poursuive l'un de ces leurres.

Ressource ultime, le missile peut être engagé par l'artillerie antiaérienne du bord, dans la mesure où elle a été conçue à cet effet.

RÉALISATION

Le premier système de guerre électronique de ce genre a été développé et installé sur les frégates lance-engins *Suffren* et *Duquesne* entre 1965 et 1969. La mise au point s'est avérée délicate, en raison, en particulier, de la saturation du détecteur de radars et de sa logique de tri par des signaux parasites créant des fausses alarmes. Une fois ces difficultés de jeunesse surmontées, les occasions d'évaluer l'efficacité du système en vraie grandeur ne se sont pas présentées, du moins à ma connaissance. Cependant, en bonne logique de guerre froide, de nombreux essais à la mer, nationaux et internationaux, ont été organisés en simulant l'attaque du missile à l'aide d'un autodirecteur de missile mer-mer (en particulier l'un de ceux qui avaient été développés en France) embarqué sur un avion de combat volant selon des trajectoires analogues à celles des missiles soviétiques. Seuls les bâtiments de surface, considérés comme majeurs par l'état-major de l'époque, en ont été équipés.

GUERRE DE L'INFORMATION

Jean-Paul GILLYBŒUF

Mon propos n'est pas de dresser ici un panorama historique complet de la guerre électronique – les interventions retranscrites plus haut y contribuent largement –, mais plutôt d'évoquer quelques réflexions sur la guerre de l'information, dont la guerre électronique fait partie.

Tout au long de l'histoire, la manière dont les hommes et les femmes ont fait la guerre a été à l'image de leur façon de vivre et de travailler.

Depuis quelques années, nous entrons progressivement dans la « société de la troisième vague », comme l'appellent Alvin et Heidi Toffler, société où la connaissance est la ressource centrale de l'économie, valeur intangible et inépuisable.

Ce type de société, qui se caractérise par une démassification de la production, une nouvelle répartition entre le travail direct et le travail indirect, l'importance de l'innovation, la complexification des projets et des structures, de nouveaux modes d'organisation, l'intégration des systèmes, le développement des infrastructures d'échange de données et l'accélération des échanges, fait émerger une nouvelle forme de guerre.

La guerre du Golfe, en 1991, en a été une démonstration. Ce fut en fait une application concrète de la doctrine *Air-Land Battle* et de ses mises à jour, aboutissement des réflexions issues de la guerre du Vietnam et de celle du Kippour.

Les objectifs étaient :

- de détruire les centres de commandement de l'ennemi ;
- de mettre hors service les systèmes de communications, pour empêcher l'information de circuler dans la hiérarchie militaire ;
- de prendre l'initiative ;
- de frapper en profondeur ;
- d'empêcher les échelons arrières de l'ennemi de passer à l'action ;
- d'intégrer les opérations aériennes, au sol et en mer ;
- de synchroniser les opérations combinées ;
- d'éviter les attaques frontales contre les points forts de l'adversaire ;
- et, par-dessus tout, de savoir ce que faisait l'ennemi et de l'empêcher de savoir ce que nous faisons.

Alan D. Campen, dans *The First Information War*, a écrit « La guerre du Golfe fut une guerre où une once de silicium dans un ordinateur a pu avoir plus d'effet qu'une tonne d'uranium ».

Dans le domaine militaire, l'importance de l'information n'est pas une découverte contemporaine : dans son *Art de la guerre*, Sun Tzu proclame que « La guerre, c'est l'art de duper ». Ce qui est nouveau, c'est le développement des technologies électroniques, l'explosion de l'informatique, les progrès des techniques de traitement du signal, enfin la conquête de l'espace. Tout cela offre des moyens considérables pour recueillir, traiter, modifier, diffuser l'information : c'est pourquoi on parle de « guerre de l'information ».

La guerre de l'information peut être décomposée comme suit :

- le renseignement ;
- la cryptologie ;
- la guerre électronique, qui permet de dégrader, modifier, détourner les signaux et informations utilisés et transmis par les moyens de communication et les moyens de détection (radars, autodirecteur) ;

- le piratage des moyens informatiques, qui, au travers d'accès illicites aux ordinateurs, permet de dégrader, de modifier leur fonctionnement, voire de les neutraliser ;
- la destruction physique des centres de commandement et des moyens de liaison sur le terrain ;
- les opérations psychologiques, facilitées par l'utilisation des médias, qui permettent d'influencer les populations : elles ont toujours existé pour décourager, pacifier ou perturber les forces adverses.

Je ne développerai pas ici l'aspect renseignement, pas plus que les deux derniers points évoqués.

LA CRYPTOLOGIE

De tout temps, les codes secrets ont décidé du sort des hommes, des peuples et des nations. Grâce à eux, les militaires ont pu mener leurs guerres dans l'ombre, les puissants et les bandits protéger leurs trésors, les amants camoufler leur passion. Les codes sauvèrent ainsi les Grecs des Perses, accompagnèrent César dans ses conquêtes, firent arrêter et décapiter Marie Stuart, scellèrent l'énigme du Masque de fer, décidèrent Wilson à rejoindre les Alliés, et permirent d'épargner des milliers de vies pendant la Seconde Guerre mondiale.

C'est justement au cours de cette guerre que fut franchi un pas décisif dans ce domaine. En effet, les Allemands avaient réussi, après la Première Guerre mondiale, à mécaniser le chiffrement, avec la machine Enigma d'Arthur Scherbius. Les Polonais, qui se sentaient très menacés, avaient beaucoup travaillé la cryptanalyse et réussi, avec Marian Rejewski, à « casser » le code d'Enigma, grâce aux informations transmises par un Allemand, Hans-Thilo Schmidt. Néanmoins, les améliorations apportées successivement à la machine bloquèrent l'avance des Polonais en 1939. Ils firent connaître aux Anglais et aux Français l'état de leurs travaux. À partir de là, le centre de Bletchley Park, au Royaume-Uni, avec le concours d'esprits extrêmement brillants comme Alan Turing, réussit à nouveau à « casser » les codes allemands. La course entre les cryptanalystes et les cryptographes

fit naître le premier ordinateur programmable. En effet, Max Newman, un mathématicien de Bletchley, en s'appuyant sur le concept de machine universelle de Turing, mit au point une machine capable de s'adapter à des problèmes différents, pour casser les codes les plus sûrs des Allemands. Cette machine, baptisée *Colossus*, fut réalisée par Tommy Flowers et mise en service à la fin de 1943 (deux ans avant ce qu'il est convenu d'appeler le premier ordinateur : ENIAC, d'Eckert et Mauchly).

À partir de là, la cryptographie a changé de dimension et de très nombreux développements ont été réalisés. Le plus spectaculaire s'est produit en 1976, aux États-Unis, avec la découverte de la cryptographie à clé publique par Whitfield Diffie, Martin Hellman et Ralph Merkle, qui fit faire un gigantesque bond en avant dans le difficile problème de l'échange de clés. Grâce à ces travaux, le système RSA, mis au point par Ronald Rivest, Adi Shamir et Leonard Adleman, allait devenir le chiffre le plus influent de la cryptographie moderne.

Il faut noter qu'il fut développé en milieu universitaire. Pour l'histoire, on retiendra que les Anglais James Ellis, Clifford Cocks et Malcolm Williamson avaient été les pionniers en la matière, mais que leurs travaux, réalisés au sein du GCHQ, étaient restés secrets.

L'extraordinaire expansion de l'*e-mail* a fait apparaître le besoin d'un chiffre efficace et simple d'emploi. C'est ce qui a amené l'Américain Phil Zimmermann à réaliser, à partir des principes précédents, le PGP (*Pretty Good Privacy*), disponible sur Internet, ce qui lui a valu, pour un temps, des ennuis avec la justice de son pays.

Le monde anglo-saxon a pris une avance considérable dans ce domaine, tout d'abord pour les applications militaires, comme cela a été le cas avec les Anglais pendant la Deuxième Guerre mondiale, mais aussi, ensuite, pour faciliter les échanges économiques, comme dans le cas des Américains. Il ne faut pas en déduire que les militaires américains ne s'intéressent pas au chiffre : la NSA (*National Security Agency*), connue pour son

réseau d'écoute Échelon, est le plus gros employeur de mathématiciens au monde, et elle est équipée des plus grandes ressources informatiques. Pour des raisons d'interopérabilité et du fait de leur avance dans ce domaine, les Américains imposent leurs algorithmes ou leurs boîtiers de chiffrement aux pays de l'OTAN. La France a développé ses produits propres et s'est constitué, depuis plus de dix ans, une équipe gouvernementale au CASSI, à Bruz, pour concevoir les algorithmes et composants de chiffrement utilisés dans ses moyens purement nationaux. Cette équipe doit toutefois encore être agrandie pour pouvoir satisfaire l'ensemble des besoins gouvernementaux. Le Secrétariat général de la Défense nationale (SGDN) s'engage déjà très clairement dans la prise en compte de cette préoccupation, avec la création d'une Direction de la sécurité des systèmes d'information (DSSI).

Peut-on dire aujourd'hui que l'avantage est aux cryptographes ou aux cryptanalystes ? S'il semble que les premiers l'emportent, il est permis de se demander pour combien de temps encore, vu l'accroissement considérable de la puissance des ordinateurs. Le dernier chapitre du livre de Simon Singh, *l'Histoire des codes secrets*, fait ainsi état de travaux sur les ordinateurs quantiques, à partir des idées du Britannique David Deutsch.

Si de tels concepts voyaient le jour, cela permettrait de « casser » le code RSA en quelques minutes, et de donner l'avantage aux cryptanalystes ; mais les cryptographes ne resteraient pas l'arme au pied. D'ores et déjà, l'Américain Charles Bennett et le Canadien Gilles Brassard ont élaboré une cryptographie quantique, système considéré comme inattaquable. Il reste toutefois à mettre au point des systèmes de cryptographie utilisant ce principe. Est-ce faisable ? À quel horizon ? Autorisera-t-on l'utilisation d'une telle technologie ?

Je ne chercherai pas à répondre à ces questions. Je soulignerai seulement que la France doit amplifier son effort dans le domaine de la sécurité des systèmes d'information, crucial pour sa souveraineté.

LA GUERRE ÉLECTRONIQUE

Ce domaine, à l'échelle de l'Histoire, est relativement récent. Il est apparu avec le développement des moyens de détection électromagnétique et optronique et des moyens de télécommunications. Dans ce domaine aussi, l'affrontement classique entre l'épée et la cuirasse, entre la menace et la protection, s'ouvre à des champs d'innovation permanente, grâce aux progrès technologiques. Sans revenir sur le passé, qui a été abordé par les intervenants de cette journée, que peut-on envisager pour l'avenir ?

Dans le domaine des communications,

- l'élargissement du spectre d'émission ;
 - l'utilisation de techniques spécifiques d'anti-interception et d'anti-brouillage ;
 - l'accroissement de la diversité et de la complexité des formes d'onde ;
 - la numérisation croissante des informations ;
 - la généralisation du cryptage ;
 - et enfin le développement des télécommunications par satellite,
- sont des éléments nouveaux à prendre en compte.

D'une manière plus générale, du fait de ces développements, l'analyse de situation (écoute, classification...) et l'analyse de signaux (modulation...) devraient devenir de plus en plus complexes.

Dans le domaine des radars et des autodirecteurs,

- l'élargissement du spectre d'émission (nouvelles bandes et bande plus large), pour faciliter en particulier la détection et la reconnaissance de cibles discrètes ou masquées ;
- l'utilisation d'antennes à balayage électronique offrant de nouvelles capacités de CCME ;
- les formes d'onde discrètes (LPI, *Low Probability of Intercept*) ;
- le multistatisme ;
- les fréquences basses,

sont autant d'éléments à prendre en compte pour la guerre électronique du futur.

Dans le domaine optronique « basse énergie » (brouillage ou destruction du détecteur), les contre-mesures laser (CML), bénéficiant du progrès technologique des sources laser solides compactes pompées par diodes et des dispositifs d'optique non linéaire, permettent d'étendre de façon accordable le domaine spectral d'émission des sources classiques vers les bandes d'intérêt militaire (3-5 μ en particulier, pour l'autoprotection face aux missiles à autodirecteurs infrarouges). De nouvelles sources laser solides (semi-conducteurs), émettant directement dans ces bandes d'intérêt, peuvent constituer dans le futur une solution encore plus compacte. La détection d'optique pointée devrait aussi se généraliser sur le champ de bataille.

La mise en œuvre simultanée de la guerre électronique et de la guerre optronique est une tendance croissante. Les systèmes multimodes devraient se généraliser, que ce soit par la coexistence de fonctions hyperfréquences et optiques ou par la fusion de données d'origine électromagnétique ou optique. Les systèmes de leurrage et de déception électronique bénéficieront des progrès des antennes réparties et des chaînes complètes d'acquisition, de traitement et d'émission. Ils devront être développés en associant les compléments pour d'autres bandes IR, visible, laser... (furtivité, utilisation de brouillage IR et EM ou *schaffs* et peut-être UV, émission de leurres, brouillage, aveuglement ou saturation, destruction de composants).

Les capacités temps réel de détection, de localisation et d'identification des menaces en guerre électronique seront améliorées grâce à la maîtrise :

- des récepteurs à bas niveau et à haute stabilité ;
- de la fusion de données en temps réel ;
- des senseurs à grande dynamique et à haute résolution.

Ces perspectives montrent que la guerre électronique est un domaine fondamental pour la défense, car la largeur du spectre des fréquences et de ses utilisations croît sans cesse. C'est un domaine où l'imagination, l'innovation, l'ingéniosité doivent

s'exprimer et dans lequel il est nécessaire de continuer à investir (la France y consacre 140 MF par an pour les études amont, sur un total de 2,5 à 3 milliards de francs pour l'ensemble de la guerre électronique).

C'est un domaine transverse très segmenté, aux typologies très variées : la problématique de l'autoprotection des aéronefs de combat est par exemple très différente de celle de l'écoute des réseaux GSM.

La France a une tradition d'excellence dans ce domaine et se place en position de *challenger* des États-Unis. Elle a soutenu pour cela le regroupement de Thomson-CSF avec Dassault électronique, qui constitue aujourd'hui le premier groupe européen et troisième groupe mondial, Detexis.

La position de la France dans ce domaine est connue, ce qui la place comme une alternative au choix américain sur les marchés à l'exportation. Compte tenu du caractère sensible du sujet, l'autorisation d'exporter des matériels de guerre électronique constitue un acte politique fort, qui doit donc être apprécié et contrôlé avec soin et accompagné au niveau étatique.

La réduction des budgets de Défense s'accompagne d'une politique plus volontariste en matière de coopération. La guerre électronique n'y échappe pas complètement, mais de manière sélective : il est possible de saisir des occasions, notamment en Europe, tout en sachant conserver les activités qu'il n'apparaît pas souhaitable aujourd'hui de partager.

La maîtrise de l'information est un enjeu opérationnel, mais c'est aussi un enjeu politique. En tant que tel, elle ne peut être entièrement partagée que dans le cadre d'une politique commune, par exemple une politique de Défense européenne. Celle-ci n'existe pas réellement : c'est pourquoi les États conservent des domaines réservés, ce qui se justifie aussi par le fait que si les nations sont alliées militairement, elles peuvent encore demeurer en compétition économique et industrielle.

Il faut enfin souligner l'exemple éloquent que représente la guerre du Golfe quant à l'utilisation massive de la guerre électronique lors de la campagne aérienne. Tous les avions de combat (1 600) étaient munis d'équipements d'autoprotection. Un peu moins d'une centaine d'avions spécialisés en brouillage offensif furent utilisés, ainsi qu'un nombre équivalent d'avions lanceurs de missiles anti-radar. Des équipements d'écoute et de reconnaissance électronique très importants furent mis en œuvre pendant toute la durée du conflit.

Les événements récents démontrent que même l'avion le plus performant et le plus protégé peut être abattu. L'invulnérabilité totale n'existe pas. Il faut sans cesse améliorer les systèmes d'armes face à l'évolution parallèle de leurs menaces. Le duel entre l'épée et la cuirasse a encore de beaux jours devant lui, tout comme la guerre électronique. Encore faut-il vouloir rester dans la course, au plan national, peut-être européen, voire occidental.

GUERRE INFORMATIQUE

La guerre informatique recouvre un domaine beaucoup plus vaste que la simple « attaque informatique » popularisée par de nombreuses actions dont les médias se font régulièrement l'écho.

Ce concept englobe des actions de tout genre contre les cibles informatiques et leur environnement (explosion, impulsion électromagnétique, virus et autres moyens visant à perturber, détruire, espionner ou à empêcher de fonctionner les matériels ou logiciels, *social engineering*...), contre des cibles physiques (systèmes d'armes, infrastructures...), électromagnétiques (capteurs...), informatiques bien sûr, et psychologiques.

Ce nouveau concept est apparu avec le développement de l'utilisation des moyens informatiques. Il s'agit, là aussi, d'une course effrénée entre le bouclier et l'épée, d'une complexité qui ne fait que s'accroître et qui ne peut être négligée, même si sa mise en œuvre peut se heurter à des difficultés juridiques. La réflexion est en cours, en France comme ailleurs, sur ce sujet qui recouvre partiellement celui de la guerre électronique.

Les Américains ont compris avant nous l'intérêt des nouvelles technologies. Sans aller jusqu'à partager la vision pessimiste de Paul Virilio, qui souligne dans *La bombe informatique* que « l'actuelle mondialisation du marché comporte également trois dimensions : géophysique, technoscientifique et idéologique, d'où l'inévitable rapprochement à faire entre la volonté des États-Unis de généraliser le libre-échange global à l'horizon 2010-2020, et la préparation d'une guerre informatique. Impossible en effet de distinguer clairement la guerre économique de l'informatique, puisqu'il s'agit d'une même ambition hégémonique de rendre interactifs les échanges commerciaux et militaires. D'où les efforts répétés de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) pour réguler les différentes souverainetés nationales... On ne comprendrait finalement rien à la dérégulation systématique de l'économie de marché si l'on ne rapprochait pas cette dernière de celle, systémique, de l'information stratégique », on peut penser que cette guerre informatique, déjà présente, va monter en puissance. Elle peut s'immiscer dans notre vie quotidienne dans le cadre, en particulier, de la compétition commerciale, mais elle pourrait aussi préparer des actions violentes de terrorisme ou de guerre, comme l'a imaginé Tom Clancy dans *Dette d'honneur*.

Combinés entre eux, tous ces moyens de la guerre de l'information ne permettent pas seulement de jouer sur les bits et le rayonnement électromagnétique, mais aussi de mettre en œuvre des armes comme :

- les missiles antiradars ;
- les armes HERF (*High Energy Radio Frequency*), capables de diriger un signal radio de forte puissance sur une cible électronique et de la mettre hors de fonctionnement ;
- les bombes EMP/T (*Electromagnetic Pulse Transformer*) utilisant les impulsions électromagnétiques, provenant d'une détonation nucléaire ou non, pour détruire de façon définitive les composantes électroniques de tout ordinateur ou système électronique.

Il ne s'agit que de quelques moyens de destruction physique.

Si, dans le domaine strict de la guerre électronique, la France tient une place honorable, juste derrière les États-Unis, dans le domaine plus vaste de la guerre de l'information, l'écart est beaucoup plus important, le Royaume-Uni étant devant nous. Est-il inéluctable que cet écart se creuse ? Certainement pas, si nous en avons la volonté. « Ce n'est pas sa taille ou sa superficie qui caractérise une petite nation, c'est son destin », note Alain Finkelkraut dans son essai *L'ingratitude*. Jusqu'à présent, le destin de la France n'a pas été celui d'une petite nation. Comme il sera nécessaire de coopérer sur ces sujets en Europe, la France devra jouer un rôle moteur afin que le destin de l'Europe ne soit pas entièrement déterminé par son grand allié, mais au contraire qu'il se dessine en commun : « Plutôt faire dresser les deux bannières étoilées que d'ajouter des étoiles à celle qui est aussi rayée ».

BIBLIOGRAPHIE

L'Armement, n° 60, janvier 1998.

CAMPEN, Alan D. (ed.), *The First Information War : the Story of Communications, Computers and Intelligence Systems in the Persian Gulf War*, Fairfax, AFCEA International Press, 1992.

CLANCY, Tom, *Dette d'honneur*, Albin Michel, 1995.

FINKIELKRAUT, Alain, *L'ingratitude : conversation sur notre temps*, Gallimard, 1999.

GUISNEL, Jean, *Guerres dans le cyberspace : services secrets et Internet*, La Découverte, 1995.

MARTIN, Daniel, *La criminalité informatique*, PUF, 1997.

SINGH, Simon, *Histoire des codes secrets : de l'Égypte des Pharaons à l'ordinateur quantique*, J.-C. Lattès, 1999.

SUN TZU, *L'art de la guerre*, éd. Flammarion, 1996.

TOFFLER, Alvin et Heidi, *Guerre et contre-guerre : survivre à l'aube du XXI^e siècle*, Fayard, 1994.

VIRILIO, Paul, *La bombe informatique*, Galilée, 1998.

VOLKOFF, Vladimir, *Petite histoire de la désinformation : du cheval de Troie à Internet*, éd. du Rocher, 1999.

WOLTON, Dominique, *War game : l'information et la guerre*, Flammarion, 1991.

SIGLES UTILISÉS

A/C	Autocommande
AAA	Artillerie antiaérienne
ACAL	Acquisition pour l'artillerie lourde
ALB	Analyseur large bande
ALBG	Analyseur large bande et goniométrie
ARAR	Appareil de détection de radars ; A pour aéroporté
ARBR	Appareil de détection de radars ; B pour bâtiment de surface
ARUR	Appareil de détection de radars ; U pour <i>U-Boat</i>
AS	Air-sol
ASA	Artillerie sol-air
AsGa	Arséniure de gallium
ATL	Avion de patrouille maritime Atlantique
BGE	Bureau de guerre électronique
BINOC	Brouilleur par intrusion en onde courte
BOA	Brouilleur offensif aéroporté
BOZ	Brouilleur offensif de zone
BROMURE	Brouilleur multifréquence des réseaux
BSIC	Bureau des systèmes d'information et de commandement
BT	Bande de fréquence x temps
CAPCA	Centre d'analyse des systèmes, de programmation et de calcul
CASSI	Centre de l'armement pour la sécurité des systèmes d'information
CCME	Contre contre-mesures électroniques
CEA	Commissariat à l'énergie atomique
CEHD	Centre d'études d'histoire de la Défense
CEMAA	Chef d'état-major de l'armée de l'Air
CENG	Centre d'études nucléaire de Grenoble
CEPAC	Commission d'études pratiques (artillerie des côtes)
CEPAN	Commission d'études pratiques (artillerie navale)
CEPDSM	Commission d'études pratiques (détection sous-marine)
CEPIN	Commission d'études pratiques (instruments de navigation)

CEPMG	Commission d'études pratiques (mines et grenades)
CEPOT	Commission d'études pratiques (optique et télémétrie)
CEPSM	Commission d'études pratiques (sous-marine)
CEPTSF	Commission d'études pratiques de TSF
CEPTT	Commission d'études pratiques (tir de torpilles)
CEPZ	Commission d'études pratiques (gaz de combat)
CET	Centre d'études de Toulon
CM	Contre-mesures
CME	Contre-mesures électroniques
CML	Contre-mesures laser
CNET	Centre national d'études des télécommunications
COMINT	<i>Communication Intelligence</i>
COPEP	Commission permanente de l'électronique du Plan
COTAL	Conduite de tir pour l'artillerie légère
CPIGE	Centre de programmation et d'instruction de la guerre électronique
CREI	Commission restreinte de l'électronique et de l'informatique (instance de coordination interne à la DGA)
CSF	Compagnie générale de télégraphie sans fil
CW	<i>Continuous Wave</i>
DA	Défense aérienne
DATAR	Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale
DCA	Défense contre avions
DCAN	Direction des constructions et armes navales
DCN	Direction des constructions navales
DGA	Délégation générale pour l'armement
DGRST	Délégation générale à la recherche scientifique et technique
DGSE	Direction générale de la sécurité extérieure
DMA	Délégation ministérielle pour l'armement (ancien nom de la Délégation générale pour l'armement, de 1961 à 1977)
DoA	<i>Department of Administration</i> (Etats-Unis)
DoD	<i>Department of Defense</i> (Etats-Unis)
DPA	Délégation aux programmes d'armement
DR	Détecteur de radar
DRAX	Détecteur récepteur aéroporté en bande X
DRET	Direction des recherches, études et techniques d'armement

DRME	Direction des recherches et moyens d'essais
DSSI	Direction de la sécurité des systèmes d'information
DTC	Division télécommunications (au sein de Thomson)
DVD	<i>Digital Versatile Disc</i>
EC	Escadre de chasse
EES	Escadron électronique sol
EGIDE	Ensemble de goniométrie et d'interception des ondes décamétriques
ELEBORE	Ensemble de localisation et d'écoute des réseaux
ELFE	Ensemble d'écoute et de localisation des faisceaux hertziens
ELINT	<i>Electronic Intelligence</i>
ELODEE	Ensemble de localisation des émissions par densité
EM	Électromagnétique
EMA	État-major des armées
EMAA	État-major de l'armée de l'Air
EMAT	État-major de l'armée de Terre
EMG	État-major général
EMGRS	État-major général de la recherche scientifique
EMM	État-major de la Marine
EMP/T	<i>Electromagnetic Pulse Transformer</i>
ENIAC	<i>Electronic Numerical Integrator and Computer</i>
ENIGME	Ensemble d'interception et de goniométrie en onde métrique
ENSTA	École nationale supérieure des techniques avancées
EVF	Évasion de fréquence
FAS	Forces aériennes stratégiques
FATAC	Force aérienne tactique de combat
FNS	Force nucléaire stratégique
GCHQ	<i>Government Communication Headquarters</i>
GE	Guerre électronique
GERMAS	Groupe d'entretien et de réparation de matériel aérien spécialisé
GET	Groupe électronique tactique
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GQG	Grand quartier général

HERF	<i>High Energy Radio Frequency</i>
HF	Haute fréquence
IFRI	Institut français des relations internationales
IR	Infrarouge
IR1	Infrarouge proche de la lumière visible
IR2	Infrarouge éloigné de la lumière visible
ITT	<i>International Telegraph & Telephone</i>
LCET	Laboratoire du Centre d'études de Toulon
LCR	Laboratoire central de recherches (Thomson-CSF)
LETI	Laboratoire d'électronique et du traitement de l'information
LPI	<i>Low Probability of Intercept</i>
Martel	Missile anti-radar télévision
NSA	<i>National Security Agency</i>
OCDE	Organisation pour la coopération et le développement économique
OMC	Organisation mondiale du commerce
ONRSII	Office national de recherche scientifique, industrielle et des inventions
OTAN	Organisation du traité de l'Atlantique Nord
PC	Poste de commandement
PGP	<i>Pretty good Privacy</i>
PHIMAT	Philips Matra
PTT	Postes, télégraphes et téléphones
RA	Région aérienne
RAGEL	Reconnaissance, attaque et guerre électronique lointaine
RASURA	Radar de surveillance rapproché
RSA	Rivest, Shamir, Adleman (créateurs de ce système)
SA	Sol-air
SAC	<i>Slantec Array Correlator</i>
SAMP	Sol-air moyenne portée
SARIGUE	Système aéroporté de recueil d'information de guerre électronique

SDE	Système de dépannage et d'évaluation
SDS	Surveillance de détection au sol
SEAD	<i>Suppression of Enemy Air Defense</i>
SEFT	Section d'études et de fabrication des télécommunications
SENIT	Système d'exploitation naval des informations tactiques
SFR	Société française de radioélectricité
SGDN	Secrétariat général de la Défense nationale
SHAPE	<i>Supreme Headquarters of Allied Powers in Europe</i>
SHM	Service historique de la Marine
SIRPA	Service d'information et de relations publiques des armées
SITERE	Système d'interception terrestre des émissions radar ennemies
STAT	Section technique de l'armée de Terre
STCAN	Service technique des constructions et armes navales
STEI	Service technique de l'électronique et de l'informatique
TBA	Très basse altitude
TSF	Télégraphie sans fil
TGV	Très grande vitesse
TOP	Tube à ondes progressives
TSF	Télégraphie sans fil
TTE	Thomson tubes électroniques
TWS	<i>Track while scanning</i>
UEO	Union de l'Europe occidentale
UV	Ultraviolet
VQM	Variance quadratique moyenne

LES AUTEURS

L'ingénieur général de l'armement Paul ASSENS (X 1943, École supérieure d'électricité 1949, licencié ès sciences de la Faculté de Paris, 1949) a exercé ses fonctions, de 1949 à 1974, à la Direction technique des armements terrestres, Section d'études et fabrications des télécommunications, au fort d'Issy-les-Moulineaux.

Il y est successivement chef du laboratoire de servomécanismes du département Détection (1949-1952), *project officer* de programmes franco-américains sur les études et les développements en matière de guerre électronique (radars, 1952-1963) et de matériels radars d'acquisition et radars de surveillance de champ de bataille (1954-1963), expert technique en matière de tubes électroniques (1959-1964), chef du département Détection de la SEFT (radar, optronique, guerre électronique, informatique, 1966-1968), chef du service technique de la SEFT (radar, optronique, guerre électronique, télécommunications, 1969-1972), et enfin directeur de la SEFT (1972-1974).

Distingué en 1955 par le prix du général Ferrié, diplômé du Centre des hautes études de l'armement (2^e session, 1965-1966), il exerce parallèlement d'autres fonctions. Il est président du groupe de travail interarmées (tubes hyperfréquences) en 1956-1966, président des groupes de travail franco-britanniques (tubes hyperfréquences, guerre électronique) pendant la même période, et président du groupe de travail franco-germano-italien (guerre électronique) en 1955-1969. Il est aussi professeur à l'École supérieure d'électricité (cours de radio-électricité et de servomécanismes) en 1949-1966, et il donne en 1966-1970 des conférences à l'école OTAN de guerre électronique d'Anzio (Italie). Il est aussi, en 1967-1970, conseiller des études, puis, en 1970-1971, chef de la division Armement au Centre des hautes études de l'armement.

Directeur des affaires internationales à la DMA de 1974 à 1977, il est ensuite, de 1977 à 1984, directeur du Centre des hautes études de l'armement.

Pierre BARATAULT, ancien directeur technique de Thomson-CSF radars et contre-mesures (devenu Detexis après fusion avec Dassault électronique), a exercé pendant près de quarante ans dans le domaine de la guerre électronique, avec en particulier la responsabilité des programmes SARIGUE et de systèmes intégrés d'autoprotection. Il est membre manager du Collège scientifique et technique Thomson-CSF et chevalier de l'ordre national du Mérite.

André CARBON, diplômé de l'École de l'Air en 1972, est, de 1976 à 1981, pilote sur Jaguar au sein de l'EC 2/11 Vosges, dont la mission principale est la protection électromagnétique des forces. Il y devient, en 1983-1984, chef des opérations de guerre électronique. Second du bureau de la FATAC en 1987-1989, il est ensuite second, puis commandant de la Division électronique du CEAM de Mont-de-Marsan en 1989-1993. Cette division comprend les escadrons radars et télécommunications, le CPIGE et les équipes de marque sol-air Crotale et SAMP. Chef de la division Système de commandement au BSIC de 1994 à 1997, il est ensuite, en 1997-1998, chef du bureau Recherche électromagnétique à la sous-direction Recherche de la DRME.

L'ingénieur général de l'armement (génie maritime) Bernard DELAPALME commence sa carrière, en 1946-1956, au Laboratoire radio-radar (CNET Marine) à Grenoble, puis à Clamart : création de la section Guerre électronique, invention de l'antenne Caroline et des détecteurs de radar ARBR / ARUR. En 1956, il devient professeur d'électronique à l'école du Génie maritime et chevalier de la légion d'honneur (à titre exceptionnel).

Directeur adjoint du Centre d'études nucléaires de Grenoble en 1957, il rend en 1960 à Pierre Guillaumat, ministre des Armées, le rapport *L'électronique de Défense et les armées*. En 1961, il est le créateur et le rapporteur de la Commission permanente d'électronique du Plan, et, en 1962, il est le rapporteur général de la Commission de prospective du Plan, présidée par

Pierre Guillaumat. Avec R. Lattès et J. Carteron, il est l'auteur en 1963 d'une note confidentielle sur les calculatrices électroniques. De 1964 à 1982, Bernard Delapalme est directeur recherche / développement / innovation, puis membre du Comité exécutif du groupe Elf Aquitaine. Il reçoit en 1970 le grand prix technique de la Ville de Paris. Il devient président en 1973 de l'Association européenne pour la recherche industrielle et en 1975 de l'Association nationale de la recherche technique. En 1976, il est responsable auprès du ministre de l'Éducation du projet de l'Université de Compiègne. Il devient membre du Haut conseil de l'audiovisuel en 1977 et du Comité consultatif des Nations unies pour l'application des sciences et techniques au développement en 1978. La même année, il est le président de la mission à l'innovation auprès du ministre de l'Industrie. Président du groupe d'experts de l'OCDE « progrès technique et politique économique » en 1980, créateur en 1982 et *chairman* de Elf technologies, il devient la même année conseiller du président de la Lyonnaise des Eaux.

Le général Michel FORGET a fait une carrière d'officier pilote de combat (défense aérienne et aviation tactique). Il a été chef du Bureau prospective et études en 1966-1967, chef du 3^e bureau de l'EMAA en 1971-1972, et commandant en second, puis commandant de la FATAC / 1^{re} RA de 1978 à 1983.

Gérard LEHMANN, né en 1909, diplômé de l'École centrale de Paris (promotion 1931), est, de 1932 à 1940, directeur technique de la Sadir, puis, de 1940 à 1957, directeur scientifique du Laboratoire central de télécommunications d'ITT. De 1957 à 1975, il est directeur scientifique d'Alcatel-Alsthom. Il a également enseigné à l'École centrale et à l'École supérieure d'électricité (radiogoniométrie, radionavigation...).

L'ingénieur général de l'armement Gilbert MARGIER (X 1945, École nationale supérieure du génie maritime) entre en 1956 au service technique du Laboratoire radio-radar. Il poursuit cette

activité jusqu'en 1973, au Service technique des constructions et armes navales (STCAN) : la section Guerre électronique du Laboratoire fait partie du groupe Télécommunications du STCAN depuis 1965.

De 1973 à 1979, il est chef de bureau technique du Service central des télécommunications et de l'informatique. Il est ensuite, de 1979 à 1984, directeur de la Section d'études et fabrications des télécommunications de la Direction technique des armements terrestres, puis, de 1984 à 1986, il est le premier directeur de la Direction de l'électronique et de l'informatique. Directeur pour les affaires OTAN et UEO de la société Thomson-CSF de 1986 à 1991, il exerce depuis 1991 une activité de consultant spécialisé dans les institutions et initiatives européennes dans le domaine de la défense.

Le général de brigade aérienne Jean-Paul SIFFRE (†), passionné d'histoire et de guerre électronique, a pratiqué cette dernière comme pilote opérationnel, puis comme pilote de marque sur Mirage IV A, à une époque où seules les évolutions du système de GE de l'avion restaient à mettre au point.

Après un stage de GE auprès de l'*US Air Force*, avec des instructeurs qui étaient tous des anciens du Vietnam, il a créé la Division GE du commandement des Forces aériennes stratégiques.

Après l'École supérieure de guerre aérienne, il a tenu à l'état-major de l'armée de l'Air le poste de responsable du renseignement électronique, puis de l'emploi de la GE.

Il commence ensuite une carrière interarmées, en prenant le commandement du Centre d'information sur les rayonnements électromagnétiques, puis en rejoignant le Centre d'exploitation du renseignement militaire, puis le poste de responsable du recueil technique à la Direction du renseignement militaire.

En rejoignant la 2^e section, il prend la direction du Musée de l'air et de l'espace, où il s'attache à faire entrer dans les collections nationales des équipements de GE, et il participe à la création de l'association Guerrelec. Le général Siffre est décédé en 2002.

Sébastien SOUBIRAN, titulaire d'une maîtrise de physique fondamentale, puis d'un DEA en épistémologie et histoire des sciences, doit soutenir à l'automne 2002 sa thèse de doctorat en histoire des sciences et des techniques, dirigée par M. Dominique Pestre. Ses recherches portent sur la collaboration entre scientifiques, ingénieurs et militaires en matière de recherche et de développement durant l'entre-deux-guerres, dans les Marines français et britannique. Il s'est plus particulièrement intéressé aux systèmes de radioguidage et à la conduite du tir des navires.

Philippe WODKA-GALLIEN, ingénieur dans l'entreprise Thales, est membre de l'association Guerrelec et en particulier du comité de rédaction de son *Bulletin*. Conférencier à l'ENSTA / Supaéro, il a participé en 1998 à une étude sur les opérations psychologiques pour la Fondation pour la recherche stratégique.