

COMAÉRO

COMITÉ POUR L'HISTOIRE DE L'AÉRONAUTIQUE

UN DEMI-SIÈCLE D'AÉRONAUTIQUE EN FRANCE

LES ÉQUIPEMENTS

Ouvrage, en deux volumes, coordonné par Jean Carpentier

Préface de l'Ingénieur Général Émile Blanc, Président de COMAÉRO

VOLUME II

Ouvrage édité par le Département d'histoire de l'armement
du Centre des hautes études de l'armement

2004

Cet ouvrage ne traite qu'une partie de ce que l'on nomme "Équipements", selon la terminologie du GIFAS. Ils concernent la majorité des appareils qui contribuent, directement ou indirectement, au fonctionnement et à la mise en œuvre des avions, des hélicoptères, des missiles, des lanceurs.

Plus précisément, il s'agit des équipements suivants :

- instruments de planche de bord ;
- servo-commandes ;
- pilotes automatiques ;
- moyens de navigation autonome ;
- moyens de secours et de survie ;
- générateurs de puissance électrique

Les simulateurs de vol et les moyens d'essais au sol sont aussi traités. Par contre, ne le sont pas les trains d'atterrissage. Sont aussi exclus les instruments de contrôle moteur, les générateurs de puissance hydraulique ou pneumatique et leurs organes de régulation, ainsi que tous les moyens radio, radar, contre-mesures et les dispositifs de conduite des armes, qui sont traités dans d'autres ouvrages de la collection COMAÉRO.

L'évolution des équipements vers les systèmes fait l'objet d'un développement détaillé, avec de nombreux exemples concernant les avions de combat, les avions de transport civil et les hélicoptères.

La présentation du développement des équipements de guidage-pilotage pour les missiles, celle des techniques d'observation, ainsi que l'histoire des équipements spatiaux montrent l'importance du large tronc commun entre l'Aéronautique et l'Espace.

Ces deux volumes ont été rédigés par le groupe COMAÉRO-Équipements, formé de Michel Bergounioux, Charles Bigot, Maurice Bommier, Gérard Bonnevalle, Georges Bousquet, Marcel Cado, Jean Carpentier, René Carpentier, Daniel Dupuy, Michel Hucher, Michel Lamy, Philippe Martelli, Jean Monfort, Robert Munnich, Daniel Pichoud, Jean-Claude Renaut. Les membres du groupe ont complété leurs souvenirs personnels par le témoignage de nombreux autres responsables du renouveau des équipements aéronautiques au cours du demi-siècle 1945-1995. La coordination d'ensemble a été effectuée par Jean Carpentier.

La mise en forme a été assurée au Département d'histoire de l'armement, par Patrice Bret, Françoise Perrot et Élodie Croze, ainsi qu'au Département des publications de l'armement par Aurélie Outtrabady et Philippe Raschke. Les illustrations ont été réalisées par Jacques Borie.

SOMMAIRE

ANNEXE C. DES ÉQUIPEMENTS AUX SYSTÈMES	5
INTRODUCTION	7
LE DOMAINE DES SYSTÈMES AÉRONAUTIQUES	9
1. Les systèmes aéronautiques et leur évolution	
1.1. Les origines	
1.2. Les principales étapes	
1.3. Les évolutions	
2. Les organisations de conception et de développement des systèmes	
2.1. Organisations	
2.2. Méthodes et moyens	
3. L'action des services	
3.1. L'action des services de la DTCA	
3.2. L'action de la DGAC	
3.3. Les actions de promotion du numérique et de l'intégration des systèmes	
3.4. Les études	
3.5. Les expérimentations	
3.6. L'apport des établissements et des centres d'essais	
4. Comparaison civil-militaire	
4.1. Les critères	
4.2. Les facteurs caractéristiques	
4.3. Bases de données	
4.4. Données de mission	
4.5. Standardisation et certification	
LES PROGRAMMES	35
1. La technologie des systèmes dans les avions militaires français	
2. L'évolution de la technologie des systèmes électroniques des avions militaires français, de 1960 à 2000	
2.1. Technologie des systèmes	
2.2. Caractéristiques et grands axes des évolutions technologiques des systèmes	
2.3. Multiplexage-liaisons numériques	
2.4. Technologie des visualisations	
2.5. Technologie des commandes	
2.6. Technologie des antennes	
2.7. Technologie des systèmes optiques	
2.8. Technologie des logiciels	
2.9. Technologie de la simulation	
2.10. État actuel des technologies	
3. Exemples de systèmes	
3.1. Retour sur la notion de système	
3.2. Programmes faisant l'objet de monographies	
3.3. Remarques sur les réalisations	

MONOGRAPHIES DE SYSTÈMES	44
ARMÉE DE L’AIR ET EXPORT	45
Systèmes analogiques	
Mirage IV	
Mirage III C	
Mirage III E	
Mirage F1 C	
Systèmes de transition analogique-numérique	59
Jaguar	
Milan	
Mirage F1 EH	
Mirage F1 EQ	
Mirage F1 CR	
Mirage IV P	
Systèmes numériques	75
Mirage 2000 DA	
Mirage 2000 EXPORT “RADAR RDM”	
Mirage 2000 N	
Mirage 2000 D	
Historique de la famille Mirage 2000-3 – Mirage 2000-5 – Mirage 2000-9	
Mirage 2000-5	
Rafale	
AÉRONAUTIQUE NAVALE	91
Étendard IV M – Super Étendard	
Les avions de surveillance maritime ATL 1 – ATL 2	
ARMÉE DE TERRE	117
Gazelle	
Tigre	
AVIONS CIVILS	125
La famille AIRBUS, de l’A 300 à l’A 340	
La famille des avions Falcon	
CONCLUSION	141
BIBLIOGRAPHIE	142
ANNEXE D. PIONNIERS ET FIRMES CARACTÉRISTIQUES	153
PRÉAMBULE	
Robert ALKAN	
Raoul, Édouard BADIN	
Maurice BEZU	
Pierre André CHOMBARD	
Pierre FAURRE	
Jean-Charles GILLE	
Gilbert KLOPFSTEIN	

Pierre LEROY
Gérard O'MAHONY
AERAZUR
AIR ÉQUIPEMENT
AUXILEC
CROUZET
INTERTECHNIQUE
SAGEM
SFENA
SFIM
SODERN

TÉMOIGNAGE	203
"�lectronique et informatique, leur apport à l'équipement des avions de combat français et à leurs conditions d'emploi depuis cinquante ans"	
LES AUTEURS	215
Les membres du groupe COMAÉRO-équipements, principaux auteurs	
Autres contributeurs	
Liste des sigles.....	227
Liste des figures	233

ANNEXE C

DES ÉQUIPEMENTS AUX SYSTÈMES

INTRODUCTION

Quelle que soit l'importance des équipements eux-mêmes, on ne peut plus aujourd'hui faire abstraction de la notion de système. Cette notion, qui n'existait pas en aéronautique au début de la période considérée, s'est progressivement généralisée.

Avec l'approche "système", on recherche une réponse globale, en termes de "fonctions", opérationnelles ou techniques, aux problèmes posés par l'exécution d'une mission. Il ne s'agit plus d'une juxtaposition d'équipements, mais d'un ensemble organisé, qui doit être réalisé en vue de son optimisation, tant au plan des performances que de la sécurité de fonctionnement et des coûts.

Cette approche s'est imposée dans tous les domaines aérospatiaux. Cependant, si elle est apparue très vite par exemple dans le domaine des missiles balistiques, où elle a été reconnue d'emblée comme la seule possible, elle s'est manifestée plus progressivement sur les avions du fait de la présence d'un équipage et, au début, d'une moindre complexité.

Cependant, les évolutions techniques et opérationnelles ont conduit, en définitive, à ce que l'aspect système devienne une caractéristique essentielle des programmes militaires et civils.

Des organisations spécifiques ont dû être créées pour prendre en charge les problèmes nouveaux qui se posaient à tous les acteurs de la communauté aéronautique française (armées, services de l'État, avionneurs et équipementiers).

À partir de la notion de système, les conséquences sur les équipements ont été très profondes. C'est pourquoi il a paru nécessaire de lui consacrer cette annexe.

Le sujet est évidemment trop vaste pour être traité de façon exhaustive. On s'est donc limité à quelques aspects parmi les plus significatifs, montrant les évolutions de la notion de système au cours de la période considérée, le rôle des différents acteurs et en l'illustrant par des exemples tirés des programmes.

LE DOMAINE DES SYSTÈMES AÉRONAUTIQUES

1. LES SYSTÈMES AÉRONAUTIQUES ET LEUR ÉVOLUTION

Pendant longtemps, sur les avions, le pilote ou l'équipage a assuré lui-même la synthèse des informations disponibles, au demeurant peu nombreuses.

Le besoin de liaison entre équipements n'est apparu qu'à partir d'une certaine complexité.

1.1. Les origines

Le premier cas fut celui du Mirage III C, dans lequel la conduite de tir pour l'interception air-air avec missile à autoguidage semi-actif constituait déjà un ensemble intégré avec "l'homme dans la boucle". Pour mener à bien la définition, le développement et l'intégration de cet ensemble, une coordination industrielle menée par CSF, avec MATRA et Dassault, fut mise en place. Sur ce même avion apparaissent les premiers capteurs "centraux" : centrale gyroscopique et centrale aérodynamique.

Mais le premier système d'arme aéroporté fut celui du Mirage IV. Il présentait, avec les technologies de l'époque, toutes les caractéristiques d'une véritable approche système. En effet, la mission était définie sous une forme globale et l'industriel responsable devait organiser de manière intégrée l'ensemble des nombreux éléments participant à la réalisation de l'objectif fixé. Pour la première fois, on avait recours à un ordinateur central qui, associé à un ordinateur de bombardement, assurait les liaisons entre équipements et l'élaboration des informations fournies à l'équipage et au pilote automatique.

Le programme bénéficiant dans son ensemble d'une très haute priorité gouvernementale, la prise en compte de l'aspect système s'est trouvée renforcée par une concentration exceptionnelle des responsabilités étatiques et industrielles (maîtrise d'œuvre GAMD).

Le Mirage IV, programme particulier du fait qu'il comportait une seule mission principale et que la maîtrise d'œuvre était confiée à l'avionneur, a permis d'expérimenter les méthodes et les moyens d'approche "système", qui ont ensuite été perfectionnés et appliqués systématiquement pour les autres avions d'armes, développés tant pour les besoins français que pour l'exportation.

Un autre grand système fut celui de l'Atlantic qui devait mettre en œuvre, outre des moyens de navigation, un ensemble très complexe d'observation et d'attaque. Là aussi, il s'agissait de répondre à une exigence opérationnelle exprimée de façon globale.

Le système réalisé comportait de nombreux équipements concourant à une présentation synthétique de données aux postes d'équipage, notamment sur des tables à projection de symboles lumineux de conception Breguet (table tactique et table de recherche).

Là aussi, d'ailleurs, mais dans un cadre OTAN, l'organisation étatique et industrielle a été centralisée et a fonctionné de façon très efficace avec, au plan industriel, un rôle déterminant de la Société Breguet.

Il est remarquable qu'à partir de ces programmes "phares" la méthodologie d'"approche-système" se soit maintenue, étendue et enrichie, malgré les variations de responsabilité de réalisation des équipements (*catégorie B ou C – voir volume I, page 25*).

Bien entendu, les systèmes, en tant que tels, ont ensuite beaucoup évolué et cette évolution continue encore, de sorte qu'on ne pourra pas décrire la fin de la période étudiée (1945-1995) sans évoquer les tendances déjà amorcées à cette date et qui se sont notamment concrétisées dans le programme Rafale.

La concentration du développement des avions militaires chez deux avionneurs principaux (Dassault et Breguet) regroupés ensuite en un seul (avec fusion des équipes de conception et de développement) a permis d'assurer le maximum de retour d'expérience et de pallier le faible nombre de programmes nouveaux français par des applications progressives des innovations disponibles aux nombreuses versions d'exportation des Mirage III, Mirage F1, Mirage 2000, Alphajet. Le savoir-faire des équipementiers et des systémiers a pu ainsi s'améliorer dans tous les domaines (5 000 avions militaires produits de 1946 à 2000).

1.2. Les principales étapes

Avant de développer plus particulièrement certains aspects de cette évolution, on peut commencer par un panorama général des principales étapes. À ce sujet, une excellente synthèse figure dans le document du GIFAS "L'industrie aéronautique et spatiale française 1947-1982", tome 2, p. 491, sous le titre "Évolution de l'avionique durant les trente-cinq dernières années".

Il n'est donc pas nécessaire d'en reprendre les termes ici. On se bornera à rappeler les titres retenus par le GIFAS :

- l'après-guerre : mécanique, électricité et études nouvelles ;
- les années cinquante : développement de l'avionique des Mirage ;
- les années soixante : transistorisation des équipements, les débuts de la numérisation ;
- Concorde et Airbus ;
- les années soixante-dix : la montée en puissance des systèmes numériques ;
- les années quatre-vingt : grands systèmes et logistique opérationnelle.

Concernant les programmes eux-mêmes, comme on l'a déjà dit, on trouvera plus loin des monographies qui permettent d'illustrer les générations successives et les progrès accomplis. Mais dès maintenant, si l'on considère seulement le domaine des avions de combat, on peut noter un certain nombre de faits marquants dans l'évolution :

- le système analogique intégré de navigation-bombardement à haute altitude du Mirage IV (1959), déjà cité ;
- le système analogique intégré polyvalent du Mirage IIIE (1961-1964) avec des boîtiers centralisés de distribution d'informations ;
- l'apparition des premiers équipements utilisant les techniques numériques sur Jaguar (1968) : calculateur de navigation Crouzet ;
- l'expérimentation sur Milan d'une centrale à inertie Litton LTN72 avec calculateur numérique de navigation et d'attaque air-sol intégré et d'un collimateur tête haute cathodique (1973-1974) ;
- l'expérimentation sur Milan, puis sur les versions export Mirage F1EH et F1EQ, des méthodes de spécification, de réalisation et de validation des logiciels temps réel de systèmes d'armes embarqués français ;
- le premier système français avec centrale à inertie Kearfott-Sagem et calculateur numérique d'attaque sur Super Étendard (1974-1977) ;
- le premier système numérique centralisé sur Mirage 2000 (1978-1983) avec digibus, calculateurs centraux, têtes haute et basse TV couleur multiplexées, systèmes de contre-

mesures passifs électromagnétiques intégrés, radars de détection air-air basse altitude RDM et RDI ;

- et, bien entendu, à une date plus récente, le pas encore plus important constitué par le programme Rafale, tant au niveau des équipements que du système.

1.3. Les évolutions

Les principaux facteurs d'évolution ont été la prise en compte d'une complexité de plus en plus grande et les progrès de la technologie elle-même, les deux facteurs étant évidemment liés. La complexité est à la fois de nature technique (capacités et performances accrues des équipements et armements) et de nature opérationnelle (forme et contexte des engagements).

La technologie concerne tous les secteurs des équipements, des armements et des systèmes eux-mêmes. Mais les évolutions majeures ont été sans conteste liées à l'introduction des techniques numériques avec toutes ses conséquences et notamment l'intégration de plus en plus poussée des systèmes.

La confrontation permanente de notre industrie aux productions étrangères (principalement américaine) a obligé la communauté aéronautique française à toujours rechercher le meilleur niveau dans l'application des innovations techniques aux équipements, telles que la télémétrie laser, les centrales à inertie à gyrolasers, les visualisations tête haute couleur, les liaisons numériques multiplexées, etc.

D'autres facteurs d'évolution sont aussi intervenus, qui correspondaient à des objectifs généraux, mais dont l'importance n'a fait que croître :

- sécurité des équipages et des passagers ;
- sécurité de fonctionnement des équipements et des systèmes ;
- amélioration de la maintenance ;
- réduction des coûts d'exploitation.

Au cours de la période considérée, on est passé de quelques équipements isolés à des ensembles de plus en plus complexes, mais de plus en plus organisés, conçus en même temps que le vecteur, de manière à en optimiser les possibilités d'exploitation par l'équipage. Ainsi, le concept de système d'armes a pris toute sa signification.

En fin de période, cette notion ne suffit d'ailleurs plus et l'on est amené à développer le concept de système de forces qui correspond à un ensemble beaucoup plus vaste mettant en jeu non seulement d'autres avions, mais aussi de nombreux moyens appartenant à divers milieux (sol, espace...) engagés dans la même action de façon rigoureusement coordonnée.

Dans ce qui suit, on se limitera au cas d'un aéronef unique et, en ce qui concerne les systèmes :

- pour les aéronefs militaires, à ce qui est habituellement appelé système de navigation et d'attaque (SNA), à savoir : l'ensemble des moyens embarqués permettant à l'équipage d'assurer ses missions avec la meilleure efficacité (ou le meilleur rapport efficacité/coût) ;
- pour les aéronefs civils, à la transposition qui peut en être faite, souvent désignée sous le terme d'avionique.

Aussi bien dans le domaine civil que dans le domaine militaire, deux aspects particulièrement importants sont à prendre en compte : la révolution numérique et l'ergonomie.

La révolution numérique

Avec l'apparition du transistor, puis des circuits intégrés et des microprocesseurs, la possibilité d'obtenir, grâce au numérique, en temps réel, des capacités de calcul, de transmission de données et de mémoire extrêmement importantes, a révolutionné la conception des équipements et des systèmes. Les techniques numériques ont, en particulier, permis d'atteindre des niveaux d'intégration de plus en plus poussés.

L'intégration permet d'augmenter les performances et/ou la sécurité des équipements en optimisant les interfaces et les échanges d'information entre équipements qui ne sont plus conçus séparément mais globalement. L'intégration améliore ainsi la richesse fonctionnelle de l'ensemble (équipement ou système) et ses capacités de reconfiguration (phases de missions ou modes dégradés associés à des pannes d'éléments). L'efficacité de l'ensemble est alors d'un niveau supérieur à la somme des performances individuelles des différentes composantes. L'intégration permet aussi de réduire les coûts pour l'utilisateur final en diminuant les coûts de développement grâce à une certaine modularité (matérielle et logicielle), mais également les coûts de maintenance et de support, par une certaine "réutilisation" de modules communs et des procédures allégées.

Le processus d'intégration peut s'appliquer à un équipement, comme à l'ensemble du système et à l'avion complet. L'évolution pour l'avion complet est spectaculaire ; elle a connu une extension continue. Ainsi le processus d'intégration s'est étendu à l'ensemble du SNA dans les années soixante-dix, puis aux commandes de vol dans les années quatre-vingt, enfin à la conduite des moteurs et à d'autres systèmes avion dans les années quatre-vingt-dix. En outre, une retombée de la généralisation de la numérisation a été, par exemple, la maintenance automatique intégrée.

Le traitement de l'information qui en résulte a conduit à des développements logiciels très importants. Les centaines de milliers d'états systèmes potentiels du Rafale et la combinatoire qu'ils engendrent illustrent la complexité des traitements. Cette combinatoire a conduit à un effort intense de définition, de mise au point et de validation de l'interface homme-machine et des logiques du système.

L'ergonomie

Pour certaines tâches, les qualités de l'homme (intelligence et capacité d'adaptation) sont irremplaçables, notamment dans des situations extrêmes. Mais, en contrepartie, la présence de l'homme introduit des contraintes non négligeables dans de nombreux domaines. Les premières qu'il a fallu prendre en compte ont été d'ordre physiologique (altitude, accélération, risques à l'éjection), d'où les efforts entrepris très tôt par les services, les centres d'essais et l'industrie pour permettre le redémarrage de notre aviation militaire. Le développement des instruments de bord a posé de son côté de nombreux problèmes tels que les risques d'erreurs de lecture ou d'interprétation.

Avec l'évolution des systèmes vers toujours plus de complexité, la tâche du pilote (ou de l'équipage) devient de plus en plus difficile à exécuter. L'ergonomie, au sens le plus large du terme, prend une place de plus en plus importante dans la définition de l'avion et de ses systèmes. De nombreuses voies ont été explorées et continuent de l'être, à la fois pour augmenter la sécurité des vols et pour rendre acceptable la charge de travail de l'équipage. L'homme doit avoir une vision claire de la situation et pouvoir concentrer son attention sur les décisions importantes : en particulier, lever de doute sur l'objectif ; pour cela, il doit être déchargé d'une partie de ses tâches, grâce à des aides et des automatismes appropriés.

Les recherches ergonomiques ont été conduites systématiquement dans les directions (DRME, puis DRET) et les centres d'études et d'essais, ainsi que dans l'industrie. On est passé progressivement d'une "ergonomie de correction", orientée vers la réalisation d'interfaces facilitant la tâche de l'opérateur humain dans des conditions de travail pénibles, à une "ergonomie de conception" qui vise à optimiser d'emblée l'ensemble du système homme-machine. L'ergonomie est ainsi devenue une préoccupation majeure, prise en compte dès les premiers stades des études, avec des répercussions très importantes sur les caractéristiques des systèmes et de l'avion lui-même.

Bien d'autres évolutions sont intervenues depuis l'apparition des premiers systèmes. On a pu voir notamment se confirmer l'existence de tendances fortes, telles que :

- le rôle des techniques de simulation, utilisées de plus en plus à tous les stades de la conception, du développement et des essais ;
- la place croissante des logiciels dans les systèmes, place devenue même prépondérante par rapport aux matériels
- la notion de standards successifs, destinés à servir, pour toutes les parties prenantes, d'étapes dans la définition et la mise en service progressive des systèmes (matériels et logiciels) ;
- la prise en compte, dès le stade des projets de systèmes, de nombreuses notions comme la maintenabilité, la fiabilité, la vulnérabilité, la réparabilité, la probabilité de réussite de la mission, la survivabilité, etc.

Les équipements occupent maintenant une place beaucoup plus importante dans les aéronefs et, de son côté, l'aspect "système" est devenu essentiel. Depuis le programme Mirage IV qui a ouvert la voie pour les avions militaires, les équipes systèmes de l'industrie aéronautique française (avionneurs et équipementiers) ont ainsi produit plus de 4 000 systèmes, avec un nombre considérable de versions différentes. Ceci n'a été possible que grâce à la mise en place d'organisations spécialisées pour la conception et le développement des systèmes.

Les capteurs⁽¹⁾

Avant d'exposer les organisations spécialisées pour la conception et le développement des systèmes, il semble important de souligner le rôle des capteurs et leur mutation au cours de la période considérée.

Mis à part sa conception, la performance finale d'un équipement ou d'un système dépend, pour une part importante, de la performance du ou des capteurs nécessaires à la saisie, en amont, des informations (paramètres physiques ou autres) et à leur traitement. Jusqu'à l'avènement du traitement numérique, l'erreur de mesure et l'erreur du calcul associé entachaient la performance finale. Depuis que le traitement numérique a totalement remplacé le calcul analogique (électromécanique, puis électronique), la performance des capteurs a pris une place encore plus grande dans celle de la fonction.

Cette mutation a eu pour conséquences :

- une recherche accrue des principes de saisie et de mesure des grandeurs, afin d'accroître la qualité (précision, coût, fiabilité) ;
- un effort pour l'élaboration du signal le mieux adapté à son traitement numérique ;
- la mise en place de nouveaux moyens d'étalonnage et de contrôle, manuels et automatiques.

(1) Texte d'André Derré, ancien directeur technique de Crouzet

Le développement et la mise en production d'un capteur constituent une opération longue, exigeant rigueur, patience (car semée d'embûches) et persévérance. À partir d'un certain stade du développement, les progrès ne sont rendus possibles que par l'analyse statistique des performances des produits fabriqués, d'où une incidence sur l'organisation industrielle spécifique de ce genre de fabrication (liaison intime entre service études et atelier de production).

Ces remarques justifient la manière dont le sujet "capteur" a été traité par les services officiels et par les industriels concernés. Alors qu'une organisation verticale est parfaitement lisible pour les différents programmes avions et hélicoptères, il n'en est pas de même pour le développement des capteurs, généralement plus lent et plus aléatoire. Ce n'est qu'à la faveur des résultats positifs des travaux amont soutenus par la DRME, puis par la DRET que les directions de programmes STAé, puis STPA, ont retenu de nouveaux capteurs.

C'est ainsi que partant après la Seconde Guerre mondiale de capteurs entièrement mécaniques (en général, pour les appareils de la planche de bord), d'une précision d'environ 1 %, on est parvenu, pour les systèmes multifonctionnels aéronautiques, à des microcapteurs à résonateurs à quartz et silicium, produits par micro-usinage, d'une précision de 10^{-4} et 10^{-5} du domaine de mesure, pour la mesure des pressions et des accélérations, en passant au cours des années soixante-dix par des capteurs électromécaniques à sortie analogique puis incrémentale. Il faut également citer et souligner l'évolution des capteurs de vitesses angulaires qui sont passés du gyromètre tout mécanique au gyromètre laser entièrement statique (début des années quatre-vingt) pour parvenir au bloc gyrolaser triaxial de SFENA.

Les pouvoirs publics, conscients de l'importance, de la nécessité et de la difficulté du développement des capteurs pour l'industrie aérospatiale, ont consacré d'importants et permanents soutiens financiers auprès des industriels engagés dans cette voie essentielle pour l'indépendance de l'aéronautique française.

2. LES ORGANISATIONS DE CONCEPTION ET DE DÉVELOPPEMENT DES SYSTÈMES

2.1. Organisations

À l'origine, l'installation des équipements sur avion ne donnait lieu qu'à des travaux d'ampleur limitée : étude d'implantation, figuration, alimentation en énergie, refroidissement, éclairage, etc. Avec les systèmes, il s'est agi de réaliser un ensemble organisé, qui ne pouvait se réduire à la juxtaposition d'équipements. Il y a eu, suivant les cas, deux types d'approche possibles :

- soit l'association d'équipements, mais avec les compléments plus ou moins importants, nécessaires à l'exécution de la mission ;
- soit, et c'est la véritable approche système, la recherche ab initio d'une optimisation, qui découle d'une succession d'analyses et de synthèses à partir du besoin opérationnel.

C'est cette deuxième approche qui a été le plus souvent adoptée en France depuis 1960. Elle correspond à un travail beaucoup plus important et implique l'existence d'un "ensemblier" (ou systémier) et plus généralement d'équipes systèmes chez les principaux industriels concernés.

En France, pour les aéronefs militaires, le rôle d'ensemblier a été confié à l'avionneur pour le SNA, même si certains équipementiers ont pu jouer un rôle majeur et de même nature

pour des parties très importantes (par exemple SAGEM pour l'alignement sur porte-avions). Rien que chez Dassault Aviation, la division Systèmes d'armes a compté jusqu'à 400 ingénieurs et cadres, auxquels il faut en ajouter environ 200 dans les moyens de support et environnement (SNA seulement). En raison, notamment, du très grand nombre de versions réalisées pour répondre aux exigences des clients export (au moins une centaine), les équipes systèmes ont développé en France un savoir-faire exceptionnel.

La responsabilité confiée à l'avionneur n'a pas toujours été la même. Dans certains cas, c'était une véritable maîtrise d'œuvre du SNA : cas du Mirage IV et du Super Étendard. Dans les autres cas, c'était ce qu'on a appelé "Coordination" du SNA, devenue plus tard "Coordination générale". Cette dernière formule avait été retenue par les services officiels pour différentes raisons, au nombre desquelles il y avait le souci de ne pas donner à l'avionneur, devenu unique, des pouvoirs trop étendus vis-à-vis du secteur des équipements.

Mis à part les deux programmes cités plus haut, qui constituaient pour l'État-client des cas très particuliers, il s'agissait de passer d'une situation où l'État commandait directement les principaux équipements et en gardait la responsabilité à une situation nouvelle qui devait prendre en compte la notion de système.

Cela ne s'est pas fait sans poser de nombreux problèmes : du côté des équipementiers, qui souhaitaient préserver leurs compétences et leurs positions dans leur propre secteur et qui se méfiaient de l'avionneur, certains d'ailleurs contestant le rôle qui lui était donné ; du côté de l'avionneur, qui avait beaucoup de mal à obtenir les informations sur les équipements, qui lui étaient nécessaires pour son travail. Cependant, malgré les difficultés rencontrées, la "coordination" a réussi à bien fonctionner grâce, il faut le dire, à la volonté commune de l'ensemble des acteurs concernés, de l'État et de l'industrie, d'œuvrer dans l'intérêt des programmes.

Le terme "coordination", qui représentait un compromis assez artificiel, était en fait un terme beaucoup trop faible par rapport à la réalité. Dans la pratique, l'avionneur, au titre de contrats passés par le responsable avion du STAé, a exercé de plus en plus un rôle d'"architecte industriel" avec, dans le cas du Rafale, la responsabilité des appels d'offres et un engagement sur les performances.

Toutes les études de définition (spécification, validation, justification...) ont été conduites dans la structure constituée à cet effet, à savoir un noyau central piloté par l'avionneur et des groupes de travail (air-air, suivi de terrain, armement laser...) quelquefois pilotés par les partenaires les plus concernés. Ainsi, les "coordinations" ont constitué un bureau d'études multipartenaires animé par l'avionneur à la disposition du programme (que les besoins émanent des services officiels ou de l'avionneur).

Pour illustrer le type de travaux effectués dans cette structure, on peut citer :

- les études de précision de tir ;
- la définition des échanges ;
- les spécifications générales applicables à tous les équipements ;
- les spécifications techniques d'intégration des équipements ;
- les spécifications fonctionnelles des logiciels ;
- les bases de conditions de réception des équipements ;
- toutes études relatives à la fiabilité, vulnérabilité, maintenabilité, etc.

La mise en œuvre de ces procédures de travail a été très difficile, mais elle a abouti en définitive à la création d'un véritable "Atelier de conception et de développement des systèmes" et surtout à la constitution d'équipes humaines de grande compétence chez l'avionneur et ses partenaires.

2.2. Méthodes et moyens

L'approche système s'est traduite par une évolution très importante des méthodes et des moyens de conception et de développement. L'acquisition d'un nouveau savoir-faire a été nécessaire, qui a conduit à un véritable ensemble de conception assistée par ordinateur. On se limitera ici à quelques exemples.

V méthodologique

La méthode s'applique aussi bien aux matériels qu'aux logiciels. À partir de l'expression du besoin opérationnel, le problème est fractionné en un certain nombre de niveaux hiérarchisés, sur lesquels on effectue un processus d'analyse et de synthèse qui aboutit à l'intégration et à la validation de l'ensemble.

Le processus est symbolisé par les deux branches du "V", qui correspondent aux opérations suivantes :

- partir de l'objectif à atteindre et du général pour aller vers le détail, afin de définir et spécifier à chaque niveau, les ensembles, sous-ensembles, éléments, tant dans leur contenu que dans leurs liaisons avec les niveaux supérieur, inférieur et connexes ainsi qu'avec leur environnement ;
- remonter des éléments les plus détaillés pour les vérifier et les assembler avec leurs éléments connexes, puis avec leurs éléments supérieurs successifs jusqu'à atteindre "l'intégration" complète du système, y compris, s'agissant d'un système piloté, l'équipage. La vérification de chaque niveau suppose une représentation aussi précise que possible de l'environnement de "vie" du système.

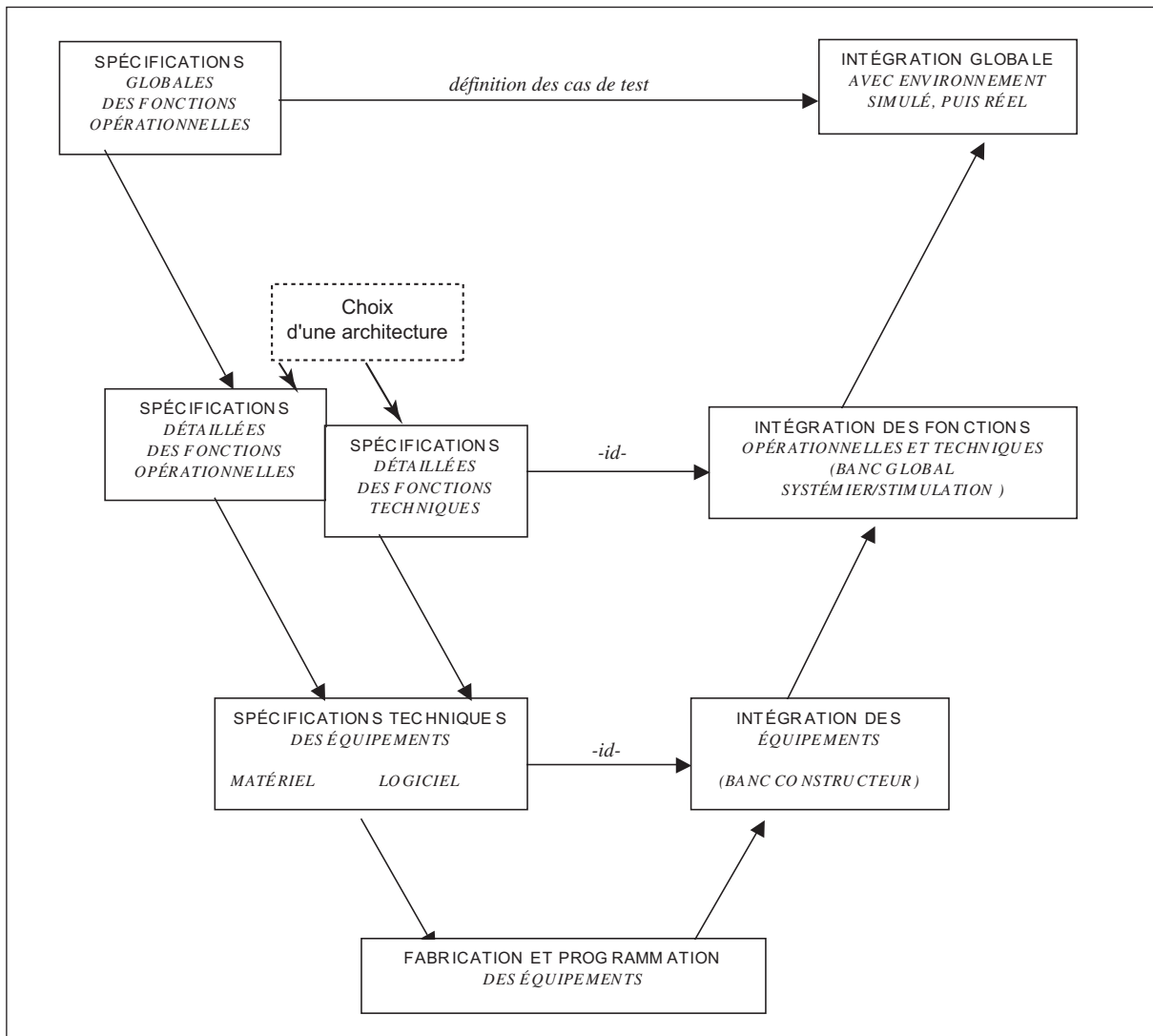
La simulation

Elle a été l'un des principaux outils utilisés comme aide à la définition des systèmes, dans le prolongement de son utilisation pour la définition des commandes de vol. Alors que la simulation analogique était très bien adaptée pour les commandes de vol (son application a été décisive pour les avions à décollage vertical), la simulation des systèmes d'armes n'a pu se faire qu'avec l'arrivée de l'informatique et de tous les moyens de visualisation et commandes programmables adaptés : c'est à partir de 1975 que la simulation a pu réellement aider efficacement la définition des systèmes, en particulier avec le centre de simulation du CEV.

La stimulation

C'est un moyen original permettant une étude dynamique des systèmes. L'essentiel des moyens de vérification des équipements, puis des sous-systèmes et des systèmes, était constitué jusqu'au milieu des années soixante-dix par des bancs de câblages complétés par des moyens d'excitation et de mesure en laboratoire (ce qui nécessitait la "coupure" des câblages pour introduire ces moyens). En 1972-1973, l'apparition des calculateurs numériques a mis en évidence l'insuffisance des moyens traditionnels et Dassault a alors développé, avec la stimulation, un nouveau moyen qui s'est révélé très performant. Le principe de ce moyen est de "faire vivre" un système au sol, constitué par ses équipements

et ses câblages d'interconnexion, en lui "injectant" des paramètres de vol cohérents et corrélés entre eux comme ils le seraient dans une mission réelle (et en général issus d'enregistrements en vol), tels que, par exemple, les vitesses de vol, les pressions aérodynamiques, les signaux électromagnétiques, etc. Le système étant ainsi excité, il devient possible de représenter toutes les phases de vol et de mission, avec l'équipage "dans la boucle" comme dans la réalité. Cette technique a été particulièrement efficace pour le contrôle et la mise au point des versions export du Mirage F1 et du Super Étendard, puis des systèmes très numérisés du Mirage 2000 et du Rafale



LE "V" MÉTHODOLOGIQUE (diagramme simplifié)

La combinaison des moyens de simulation et de stimulation permet de traiter le cas de systèmes très complexes. Ainsi, cela a été le cas pour l'Atlantique 2 (sous la conduite de Dassault et pour le compte du Centre de programmation de la Marine) et celui du Rafale (dans les phases de "pré-intégration" avant l'arrivée des matériels réels ou pour l'intégration dans des "systèmes de forces").

Développement des logiciels

L'arrivée des logiciels, avec comme conséquence la multiplication du nombre d'états d'un équipement ou d'un système, a nécessité l'utilisation d'outils d'aide à la définition et à la gestion, respectant la plus grande rigueur, depuis la "spécification en langage clair" jusqu'au code exécutable (le rêve, presque réalisé maintenant, étant de passer de l'un à l'autre automatiquement, sans risque d'erreur !).

Les équipementiers ont mis en place des ateliers de conception et de réalisation des logiciels adaptés aux besoins de leurs machines aux différents stades de développement : langage assembleur, traducteurs langage de haut niveau/assembleur...

Dès que la numérisation a atteint l'ensemble des systèmes, avec, notamment, les liaisons numériques multiplexées, les systémiers, et en particulier les avionneurs, se sont dotés d'un ensemble cohérent d'aides à la spécification, partant du langage clair et présentant toutes les garanties de rigueur indispensables.

Ces aides sont réunies dans de véritables ateliers de conception qui permettent, grâce à une simulation en temps réel, de représenter les spécifications imaginées et d'effectuer, également en temps réel, les corrections nécessaires. La sortie de ces travaux est une spécification exécutable, fournie aux réalisateurs d'équipements ou de modules, avec la définition de l'environnement de test correspondant.

Quand les équipements ou modules sont réalisés, leur intégration peut être effectuée dans l'ensemble de simulation, qui peut fonctionner avec tout ou partie des éléments réels.

Essais au sol et en vol

Tout développement nécessite l'exécution d'essais en conditions réelles au sol et en vol.

Ces essais ont évolué avec les systèmes, puisqu'il s'y est ajoutée une phase d'intégration très importante ; ils ont aussi évolué dans leur exécution, grâce notamment à l'apport des techniques numériques.

En résumé, s'agissant des systèmes d'armes, on peut distinguer :

- les essais "amont" des capteurs en laboratoire et sur avions de servitude ;
- les essais sur avions laboratoires de sous-systèmes importants (radars, navigation, contre-mesures, etc.) ;
- les essais d'armements ou de missiles dans des centres spécialisés ;
- les essais d'intégration au sol des systèmes. Ces essais, réalisés sous la responsabilité de l'avionneur avec la participation active des équipementiers et missiliers, sur des bancs de câblage (stimulables à partir de 1975), l'ont été d'abord à Villaroche, puis à Brétigny à proximité des équipes de développement, et en finale sur la base d'essais des avions prototypes ;
- les essais d'intégration en vol. Ces essais, auxquels, comme on l'a dit, s'appliquait le principe des équipes intégrées, ont eu lieu, pour l'essentiel, au départ de la base d'Istres ou, pour les essais avec armements réels, au départ de la base de Cazaux.

Les essais d'intégration en vol, sur avions prototypes avec matériels réels, doivent s'effectuer dans des conditions d'environnement aussi proches que possible des conditions opérationnelles. Ils ont bénéficié des progrès considérables apportés par les technologies numériques : enregistrement des paramètres numériques à bord (permettant un "rejeu" au sol avec stimulation des bancs d'intégration) ; transmission au sol en temps réel des paramètres numériques et des vidéos par télémesures très performantes, permettant aux ingénieurs de suivre et d'orienter les essais en temps réel.

D'une manière générale, le volume des essais en vol, qui serait devenu prohibitif, a pu être considérablement réduit grâce aux perfectionnements des essais au sol et à la simulation.

Enfin, dans le domaine radioélectrique, il faut signaler la mise en œuvre par Dassault Aviation à Istres de chambres anéchoïdes indispensables pour les essais de contre-mesures, mais aussi pour beaucoup d'autres essais (sur avion complet).

3. L'ACTION DES SERVICES

L'action des services, en matière de systèmes, s'est manifestée de différentes façons. On peut citer notamment :

- l'action des services de la DTCA dans la conduite des programmes ;
- les changements d'organisation ;
- l'action de la DGAC ;
- les actions de promotion du numérique et de l'intégration ;
- l'apport des établissements et des centres d'essais.

3.1. L'action des services de la DTCA

Conduite des programmes

Il s'agit là, bien entendu, du domaine des programmes militaires. Le rôle de l'ingénieur de marque avion ou hélicoptère a toujours été très important. Ainsi, il intervenait, en liaison étroite avec les services ou sections spécialisés, dans les orientations et les choix des équipements. C'est donc très naturellement que son rôle s'est étendu au cas des systèmes d'armes lorsque ce concept est apparu, et cela d'autant plus aisément que l'approche système s'est développée d'abord chez les avionneurs.

Il n'a pas été nécessaire pour cela de changer d'organisation, du moins dans un premier temps, mais seulement d'adapter les méthodes de travail. Il a fallu prendre en compte :

- la complexité de plus en plus grande (avec un énorme accroissement des échanges d'informations) ;
- le passage au numérique ;
- la recherche d'une optimisation d'ensemble, en efficacité et en coût ;
- une intégration de plus en plus poussée.

En fait, le rôle des services a changé de forme et certains transferts ont été rendus indispensables. Les services, qui détenaient avec les équipementiers l'essentiel des informations, ont dû trouver le moyen de favoriser les échanges entre équipementiers et systémiers et mettre en place de nouvelles procédures.

Cela s'est fait, comme il a été dit plus haut, et non sans difficulté, par une plus grande délégation donnée à l'avionneur, dans le cadre de contrats de maîtrise d'œuvre puis de "coordination" impliquant les principaux acteurs.

Mais les services se sont également engagés eux-mêmes dans des approches très innovantes, comme par exemple :

- le recours aux "simulations pilotées" dans l'élaboration des spécifications, avec le concours des industriels et des utilisateurs, notamment pour les commandes et les visualisations ;
- la "gestion de la configuration" adoptée à partir du Mirage 2000, qui est devenue un outil indispensable pour maîtriser l'évolution des standards successifs ;
- les procédures spécialement adaptées aux problèmes de logiciel (voir plus loin le rôle particulier du CEAT) ;
- enfin et de plus en plus, le travail, en équipes intégrées, des acteurs étatiques et industriels pour les essais au sol et en vol.

Organisation des services

Le fonctionnement de l'organisation existante a cependant trouvé ses limites. D'une part, l'importance toujours plus grande au fil des années des directions de programme a rendu nécessaire la création d'une structure d'accueil mieux adaptée, sans hiatus entre développement et production. D'autre part, l'importance des techniques numériques et l'intégration croissante des systèmes ne pouvaient plus s'accommoder d'une situation dans laquelle il y avait deux pôles distincts pour les équipements.

En janvier 1980, la DTCA a donc réorganisé ses services centraux autour de deux thèmes majeurs :

- meilleure prise en compte du rôle plus étendu des directions de programme, avec des services dont les responsabilités couvrent toutes les phases d'un programme (fin de la séparation entre études /STAé et production /SPAé) ;
- meilleure prise en compte de la place de l'électronique, avec le regroupement de tous les équipements et armements en un seul service (fin de la séparation dans ce domaine entre STAé et STTA).

Sont alors créés le Service technique des programmes aéronautiques : STPA (avions, hélicoptères, moteurs, matériaux, avec responsabilité d'ensemble des systèmes d'armes à base d'aéronefs) et le Service technique des télécommunications et des équipements aéronautiques : STTE (équipements, armements, avec responsabilité d'ensemble des systèmes électroniques spécialisés au sol ou sur avions porteurs autres qu'avions d'armes).

On peut considérer, avec le recul, que ces deux nouveaux services ont atteint leurs objectifs, tant dans le domaine des directions de programme que des systèmes. En particulier, les équipes du STTE ont pleinement rempli leur rôle et ont su faire face aux problèmes de toute nature que posait la gestion d'un ensemble de techniques et de technologies en pleine évolution.

Cette organisation a ainsi fonctionné jusqu'en 1996, date à laquelle la DGA tout entière s'est transformée avec un objectif prioritaire de performance économique. Dans cette transformation, la DTCA a disparu et les missions des deux précédents services ont été concentrées dans le Service des programmes aéronautiques (SPAé).

3.2. L'action de la DGAC

Dans le domaine des équipements et des systèmes, la DGAC a surtout été associée à l'élaboration et à la mise en œuvre des dispositions réglementaires, normes ou recommandations. D'une façon générale, les services de la DGAC ont appliqué une politique de participation dans les multiples instances internationales chargées de réglementer le secteur équipements. Il faut noter que les travaux préparatoires en groupes de travail de ces instances sont ouverts non seulement aux compagnies aériennes étrangères aux États-Unis, mais aussi aux équipementiers. Il faut citer :

- les normes ARINC (*Aeronautical Radio Inc.*), organe exécutif de l'AEEC (*Airlines Electronic Engineering Committee*), dont la bible est "*form, fit and function*" ;
- les TSO (*Technical Standard Order*) publiés par la FAA ;
- les MOPS, spécifications minimum de performance étudiées par EUROCAE, qui regroupe en Europe des représentants des compagnies, des services étatiques (SPAé, STNA, SFACT) et des équipementiers. Ces MOPS sont pris en compte par les JAA (*Joint Aviation Authorities*) européennes pour l'élaboration des *Joint Technical Standard Orders* ;
- les certificats de navigabilité, émis par les États et imposant une panoplie minimum d'équipements en état de marche à bord.

Il est clair que tout cet arsenal technique, réglementaire et économique n'a pas facilité un passage rapide vers une intégration des fonctions à bord et une approche système. Ainsi, les services de la DGAC pouvaient difficilement prendre une attitude dirigiste, mais ils ont toujours contribué, par leur participation active à tous les nombreux organismes internationaux concernés, à soutenir les équipementiers français pris entre des exigences de standardisation, de compatibilité ou d'encombrement souvent contradictoires entre les avions civils et les avions militaires.

3.3. Les actions de promotion du numérique et de l'intégration des systèmes

Après une prise de conscience dans les années soixante de l'importance qu'allait prendre le numérique dans les équipements et les systèmes, le STAé s'est préoccupé de la manière dont pouvait être favorisée sa mise en application dans les avions.

À l'occasion du programme Mirage F1 fut mis en place chez Dassault un banc destiné à étudier les besoins de technologie pour les systèmes intégrés numériques (banc SDECIAA, système de développement d'échanges et de calculs d'informations analogiques et arithmétiques, 1966-1970).

En 1972, le STAé organisa un symposium sur l'avionique numérique au CEV à Istres ; la DTCA cherchait simultanément à faire connaître le centre de simulation d'études qu'elle avait créé quelques années auparavant et qui était mis à la disposition des industriels. Ce symposium, qui réunissait tous les services et industriels concernés par l'introduction progressive des techniques numériques, a permis de débattre de ces nouvelles perspectives et d'identifier les actions souhaitables.

À la suite de cette réunion, un groupe de travail sur l'intégration des systèmes (GTIS) fut lancé : il réunissait périodiquement des représentants de l'État (DTCA, DGAC, SCTI, DRME, armée de l'Air) et de l'industrie (avionneurs, Thomson-CSF, EMD). S'appuyant, en

particulier, sur les travaux d'un Comité technique (CTIS), ce groupe a permis d'établir une concertation très ouverte sur les travaux en cours, les lacunes et les soutiens à proposer pour maintenir l'aéronautique française à niveau par rapport aux développements qu'on voyait apparaître aux États-Unis.

C'est à partir de cette concertation qu'ont été définis ou confirmés les axes de travail sur les nouveaux postes d'équipage, les liaisons numériques et les langages de programmation et qui ont donné lieu à des contrats d'études (souvent à financement étatique partiel, comme GINA, OPE, PERSEPOLIS).

3.4. Les études

Liaison numérique multiplexée (GINA)

La question des liaisons numériques multiplexées s'était posée dès les travaux sur le banc SDECIAA, qui ont servi de base aux études ultérieures. La modernisation des échanges entre équipements numériques devait être étudiée, le but étant de remplacer, à terme, les liaisons point à point avec formats divers adaptés à chaque type de boîte et type de donnée, par une liaison numérique multiplexée à laquelle seraient abonnés la plupart des équipements.

Le STTA, en liaison avec le STAé, lança des études dans ce domaine à partir de 1972 : études théoriques papier (protocoles d'échanges, interfaces de couplage au bus, gestion de l'ensemble), puis réalisation de maquettes et prototypes avec essais au banc. Ce fut l'étude GINA (gestion des informations numériques aéroportées), confiée à EMD, et qui déboucha, quelques années plus tard, sur certaines versions exportation du Mirage F1 et sur le Mirage 2000 sous le nom de Digibus (pour le Super Étendard, le produit n'était pas encore mûr, et les quelques liaisons numériques nécessaires furent traitées en point à point en utilisant le standard civil ARINC).

On peut remarquer que les travaux en France soutenaient la comparaison avec ce qui se faisait aux États-Unis : les standards américains (famille 1553) n'étaient en effet pas encore figés au moment des choix pour le Mirage 2000 (vers 1976), ce qui a conduit à retenir la solution française tout à fait valable et maîtrisée, malgré le regret de certains de ne pouvoir miser sur un standard (américain) devenu international par la suite.

Il est intéressant de noter que ce Digibus d'origine aéronautique a trouvé ensuite des applications dans la Marine (sous-marins nucléaires) et dans l'armée de Terre (char Leclerc). L'adoption du standard international 1553 ne se fera qu'avec le Rafale.

Visualisations et postes d'équipage

Dès le début des années soixante-dix, certains équipementiers commençaient à réaliser des maquettes d'instruments de bord avec des tubes cathodiques. L'évolution numérique générale des équipements était cohérente avec les besoins de génération de symboles et les capacités de figurations adaptées aux différentes phases de vol.

Il faut noter à ce propos l'utilisation par Dassault d'un outil de conception sommairement piloté, OASIS (outil d'aide à la spécification et à l'intégration des systèmes). Cet outil était implanté à Istres, à proximité des pilotes et il était utilisé pour définir à l'équipementier les visualisations à réaliser dans les générateurs de symboles.

Dans le cadre des travaux de soutien à l'évolution vers des systèmes intégrés, l'ergonomie des postes d'équipage utilisant au mieux les nouvelles possibilités technologiques demandait un travail important associant utilisateurs, avionneurs et équipementiers et qui donna lieu, dès le début de la décennie 1970, à des contrats d'études passés par le STAé à l'industrie. Les principaux ont été désignés par OPE (organisation du poste d'équipage) pour la partie militaire et PERSEPOLIS (programme d'étude et de réalisation d'un système électronique pour la lecture d'informations synthétiques), pour la partie civile.

Nécessitant un travail continu avec les pilotes, les études s'appuyèrent sur les techniques de simulation du vol piloté, utilisant en particulier le simulateur de vol du CEV à Istres qui avait été lancé en 1965 sous l'impulsion du STAé.

Deux équipementiers principaux étaient initialement en concurrence : SINTRA et Thomson-CSF, mais, assez rapidement, seul ce dernier restera en course.

Les nouvelles technologies devenant disponibles, un travail très important fut alors de définir les meilleures figurations pour présenter les informations utiles à l'équipage. Cela se fit progressivement, tenant compte des capacités d'adaptation des populations de pilotes : on commença par reproduire pratiquement les instruments électromécaniques, puis on améliora la présentation grâce à la souplesse du support et à sa capacité à être reprogrammé en fonction de la phase de vol, ou à être reconfiguré en cas de panne d'un des éléments.

Au plan technique, les tubes cathodiques furent d'abord monochromes, la première application opérationnelle étant le collimateur du Super Étendard, dérivant d'ailleurs des technologies utilisées pour les visualisations radar (dans le cas du Super Étendard, il avait fallu toutefois développer un tube de dimensions réduites mais capable d'une très forte luminosité).

Mais l'objectif fut très vite d'avoir des figurations en couleur pour les visualisations tête basse. Dans un premier temps, Thomson-CSF développa un tube couleur "à pénétration", c'est-à-dire comportant trois couches de phosphores pour les trois couleurs fondamentales, sélectionnables par commutation de trois niveaux de THT. Cette technique était tout à fait remarquable pour la finesse des ses tracés (balayage "cavalier"). Elle présentait par contre deux inconvénients qui ont conduit finalement à son abandon :

- il était difficile de faire des trames pour fonds colorés (le bleu du ciel, par exemple) ;
- son marché limité à des applications professionnelles aéronautiques la rendait beaucoup plus coûteuse que la technique des *shadow-masks* utilisée par des centaines de millions de récepteurs TV dans le monde.

La première génération de planches de bord électroniques (Mirage 2000, Airbus à partir de l'A 300-600 jusqu'à l'A 320) fut donc à base de TC *shadow-mask* (la seconde génération utilisa ensuite les cristaux liquides, mais c'est une histoire beaucoup plus récente...).

Les calculateurs numériques embarqués dans le domaine militaire

Après l'apparition des transistors, l'électronique embarquée avait commencé à prendre une certaine ampleur : des fonctions qui avaient été traitées auparavant, très ingénieusement mais laborieusement, avec des mécanismes divers (électriques, pneumatiques, hydrauliques) furent progressivement assurées par l'électronique, dans le domaine militaire. Cependant, jusqu'à la fin des années soixante, l'électronique embarquée était analogique, ce qui limitait les capacités de calcul, en particulier pour les aspects non-linéaires et les commutations de processus. L'introduction des techniques numériques allait lever ces contraintes en ouvrant les possibilités de logiques complexes.

Ce sont les travaux financés par les programmes balistiques MSBS et SSBS qui ont conduit au développement des techniques de miniaturisation électronique nécessaires à la réalisation de calculateurs numériques embarqués. Le guidage des engins et aussi l'alignement initial des centrales inertielle exigeaient de disposer de calculateurs puissants, compacts et fiables.

Dès 1960, les premiers calculateurs avec des possibilités très limitées préparaient les études, lancées par EMD, du calculateur Sagittaire aboutissant en 1968 aux essais en vol d'un calculateur numérique de 15 kg pour le guidage de l'engin expérimental M013 V3 et surtout pour l'alignement initial, à la mer, de la centrale inertielle de guidage. Ce calculateur, réalisé ensuite à plus de 200 exemplaires, équipa tous les engins MSBS jusqu'au M 20. Après introduction de liaisons numériques et de circuits VLSI en 1971, les deux sociétés les plus avancées dans les technologies d'électronique hybride, Crouzet et EMD, furent consultées pour le calculateur du M 4. C'est le calculateur Arcturus d'EMD qui a été retenu en 1976. Ce dernier, beaucoup plus puissant et plus fiable que le Sagittaire, ne pesait que 12 kg et était le premier à être durci en environnement nucléaire.

Les principaux équipementiers, qui avaient auparavant une solide expérience et des positions commerciales dans les matériels électroniques, se lancèrent tous dans la numérisation, avec des motivations à la fois techniques et économiques.

↳ Les motivations techniques : intérêt évident de lever les contraintes de l'analogique et de mieux répondre aux besoins croissants des avions, liés à l'extension des domaines d'application et de pouvoir, en même temps, assurer des fonctions plus étendues dans des dimensions réduites. Les avantages escomptés de la numérisation sont développés dans la partie sur la technologie des systèmes.

↳ Les motivations économiques : nécessité de s'adapter aux évolutions du marché pour y maintenir leur place, avec la crainte, dès l'origine, de se voir réduits à un rôle de fournisseur de logiciels pour des moyens de calcul standard qui seraient pris en charge par les maîtres d'œuvre.

À cette même époque, devant la rapidité de développement des techniques numériques et pour coordonner les efforts de l'industrie française dans ce domaine, fut créée une Délégation à l'informatique qui, en 1966, lança le Plan calcul civil. Ce plan donna naissance à la CII, formée à partir de la SEA et de la CAE (filiale de la CGE et du groupe Thomson).

Dans le domaine militaire, le SCTI, créé par la DMA en 1965, fut chargé de définir une politique générale et de coordonner les développements, en particulier des matériels. À partir de 1972, il définit avec la DMSA⁽²⁾ (Division militaire de la CII) une gamme de matériels militarisés, dérivés des matériels civils, compatibles avec eux et utilisant les mêmes logiciels de base. Cette gamme (P0 M, P2 M, puis MITRA 15 M) a constitué le volet "calculateur" du Plan calcul militaire.

Mais la définition de ces matériels standard n'était pas adaptée aux spécificités du domaine aéronautique et, de plus, ne s'accommodait pas des évolutions très rapides de la technologie. Aussi les services techniques continuèrent-ils à encourager les initiatives des équipementiers aéronautiques dans leurs efforts de numérisation. Ceux-ci portèrent à la fois sur des calculateurs spécialisés et sur des calculateurs à vocation de calculateur central :

(2) En 1976, la DMSA devient la CIMSA (Compagnie d'informatique militaire, spatiale et aéronautique) filiale à 100 % de Thomson-CSF.

Calculateurs spécialisés

Chez *Crouzet*, les travaux débutèrent dans les années soixante sur une centrale anémométrique (ils aboutirent plus tard à la centrale type 91, adoptée en série sur Mirage 2000 et ATL 2). À la même époque, à l'issue d'un appel d'offres (1968), *Crouzet* fut retenu pour le calculateur de navigation du Jaguar A. Ce calculateur, type 90, fut le premier calculateur numérique monté sur avion de combat français. Par la suite, l'indicateur de navigation INCA de *Crouzet* équipa également les Mirage III, Mirage 5 et Mirage F1 destinés à l'exportation.

Chez *SAGEM*, au début des années soixante, l'expérimentation d'un calculateur Kearfott marqua l'origine des travaux menant au premier système inertiel numérique (prototype S106) essayé en vol en 1964-1965. Parallèlement, une coopération avec Ferranti permit de fournir les centrales inertielles SF 500 de Concorde à la fin des années soixante. Puis une étape importante fut franchie avec l'équipement inertiel du Super Étendard (UNI 40 associé au calculateur d'attaque UAT 40) à la fin des années soixante-dix et ultérieurement la modernisation du Super Étendard (UNI 90 et UAT 90) dans les années quatre-vingt.

Chez *Thomson-CSF*, le premier équipement numérique a été le calculateur de portée du Jaguar, associé à la conduite de tir. Dans un autre domaine, on peut noter, lors du passage aux visualisations cathodiques, la réalisation d'un calculateur pour la génération de symboles.

Chez *SFENA*, le passage au numérique entraîna une véritable révolution dans la conception des systèmes de pilotage automatique dès le début des années soixante-dix avec notamment, dans le domaine des calculateurs, la réalisation de l'UMP 6800 (unité modulaire de pilotage).

Cette énumération est forcément incomplète, mais elle donne une idée des transformations qui se sont produites un peu partout.

Calculateur central⁽³⁾

En 1975-76, quand le STAé lança le système d'armes du Mirage 2000, tous les ingrédients étaient techniquement et technologiquement prêts pour doter cet avion d'un véritable système informatique.

Les premiers microprocesseurs militaires étaient matures (AMD 29116), la technologie des mémoires à tores était suffisamment miniaturisée (le diamètre des tores avait été divisé par 3 en trois ans !), les transmissions par bus numériques avaient été mises au point lors du programme GINA du STTA (il est à noter que ce programme avait permis de créer les premières transmissions numériques embarquées au monde, les États-Unis étant partis plus tard avec le 1553, qui devint ensuite une norme de fait dans les pays de l'OTAN), et les langages de programmations évolués voyaient le jour en France, grâce aux travaux de la DEI sur le LTR (langage temps réel).

L'appel d'offres concernant le calculateur fut remporté par EMD (devenue ESD puis Dassault-Électronique) dans le cadre de l'accord signé avec *SAGEM* quelques années plus tôt. Le calculateur retenu, le 2084, était un dérivé direct du calculateur de guidage qui avait été choisi par la DTEn pour le guidage-pilotage de l'engin balistique MSBS M4.

Les différentes versions du Mirage 2000 sont équipées de deux calculateurs de mission 2084 chargés de l'ensemble des fonctions de navigation, conduite des armes, gestion du vol, et surtout gestion des échanges entre les divers équipements numériques de l'avion.

(3) Texte de M. Jean-Louis Michel, Ingénieur en Chef de l'Armement (CR), ancien directeur général de Dassault-Électronique.

La version 2000N ne compte pas moins de 25 équipements reliés au bus numérique digibus, équipements dont les échanges sont régis par les calculateurs. Progressivement, le volume mémoire passe de 32 à 256 K octets, les tores de ferrite étant progressivement abandonnés au profit de mémoires à semi-conducteurs. L'ensemble du logiciel d'application a été écrit en langage LTR par les équipes intégrées de Dassault Aviation et Dassault-Électronique.

Un système informatique de même nature, mais bien entendu à la fois plus puissant et plus moderne, a été retenu pour le Rafale, les améliorations portant principalement sur la puissance de calcul, le langage de programmation (ADA a été retenu, car plus "interopérable"), le volume mémoire (plus d'un million de lignes en ADA avaient été écrites en 1998) et le débit des échanges par le choix d'un bus dit 3910 permettant de passer de 1 Mbit/s à 20 Mbits/s.

En définitive, les efforts de l'ensemble des industriels concernés, avec l'appui des services, ont permis de résoudre les problèmes posés par l'introduction généralisée des calculateurs numériques embarqués. La démarche adoptée, qui a privilégié la souplesse et la rapidité d'adaptation, s'est ainsi trouvée largement justifiée. Dans un seul cas, d'ailleurs très particulier, il a été possible d'utiliser un calculateur issu du plan calcul militaire (Mitra 15 M dans sa version 15 M /125 pour l'ATL 2).

Dans tous les autres cas, ce sont des solutions spécifiques qui ont été retenues pour les programmes militaires nationaux ou export.

Les langages de haut niveau

Dès le début des années soixante-dix, les divers pays (essentiellement États-Unis et Europe) qui commençaient à numériser des équipements embarqués se sont préoccupés des langages adaptés à des calculs en temps réel.

Compte tenu de la diversité des champs d'application (dans le domaine de la Défense, toutes les armes étaient concernées), la promotion du développement d'un langage de haut niveau pour temps réel fut assurée en France par le SCTI.

Les premiers travaux furent lancés par le SCTI auprès d'une petite société de services en informatique dès le début de la décennie 1970, et aboutirent fin de la décennie, après diverses étapes et perfectionnements, au LTR v 3 (langage temps réel, version 3). Le LTR v 2 a été utilisé sur l'Atlantique 2 et la v 3 sur Mirage 2000.

Parallèlement, les Américains avaient promu un autre langage temps réel appelé ADA, à partir d'ailleurs d'un noyau développé par un expert français (Ichbiah).

La normalisation OTAN se fit naturellement à partir des recommandations américaines. ADA étant également un très bon langage, la France le retint alors afin de bénéficier d'un produit dont la vie serait mieux assurée grâce à l'ampleur des utilisations ayant misé sur lui.

La modularité (ASAAC)

Dans la période récente (à partir de 1990 environ), l'évolution des systèmes d'avionique numérique a fait un nouveau pas, basé sur le concept d'avionique modulaire promu par le programme international ASAAC (*Allied Standard Avionics Architecture Council*). Il s'agit d'une tentative de standardisation des fonctions et de l'architecture, essayant de se libérer (au moins en partie) des changements permanents et inévitables de la technologie numérique (mais misant néanmoins sur les capacités les plus récentes de miniaturisation) et se fixant surtout un objectif prioritaire de diminution des coûts. Mais cette tentative demande encore à être confirmée.

3.5. Les expérimentations

De nombreuses expérimentations ont été lancées pour aider à la définition et à la mise au point des nouveaux aéronaves. Outre les travaux qui ont pu être faits au sol sur les simulateurs et les bancs systèmes, il faut signaler notamment :

- les actions très novatrices de la section Études générales du STAé, grâce à la réalisation et à la mise en œuvre d'un simulateur volant, le Mirage IIIB 225 à stabilité variable (utilisé en particulier pour Concorde) ;
- les actions menées par la section Équipements du STAé qui avait orienté une des Caravelle du CEV vers les mises au point et validations des nouveaux principes d'avionique intégrée, la Caravelle ALIS (avion laboratoire d'intégration des systèmes).

Les aviateurs ayant, en général, leurs propres moyens aériens, cet avion était orienté vers les travaux préalables des équipementiers. Initialement prévu pour le soutien du groupement ISPENA assez rapidement disparu, la Caravelle ALIS a surtout fait des essais d'ergonomie de poste d'équipage (visualisations tête haute et tête basse, clavier multifonctions), de liaisons numériques, puis de simulation d'approche avec le MLS.

3.6. L'apport des établissements et des centres d'essais

Outre leurs missions propres sur lesquelles on ne reviendra pas ici, il faut signaler des contributions particulières en matière de systèmes.

Centre de simulation du CEV

La conception des avions modernes a fait de plus en plus appel, au cours des années, à des travaux de définition au sol, à base de techniques de simulation. Pour permettre au Centre d'essais en vol de continuer à jouer pleinement son rôle, il était nécessaire de disposer, à côté des moyens d'essais en vol, de moyens d'essais au sol adaptés à ces nouvelles méthodes, tant pour les avions que pour les systèmes.

Deux problèmes, en particulier, doivent être étudiés très tôt dans le développement d'un programme, bien avant que le premier appareil équipé du système d'armes effectue son premier vol :

- celui du fonctionnement dynamique des systèmes ;
- celui de la définition du poste de pilotage.

La DTCA a donc créé, à partir de 1965, sur la base d'essais d'Istres, le centre de simulation du CEV. Les simulations d'études au CEV ont débuté en 1966 sur des calculatrices analogiques, avec une équipe de 2 à 3 personnes qui travaillaient sur le programme Concorde et le Jaguar. Dès 1968, on a utilisé un ordinateur numérique, car les calculs à effectuer dépassaient déjà les capacités des machines analogiques ; il fallait également disposer de moyens d'environnement plus importants (mouvement cabine et système de visualisation). La section Études et Simulation a été créée en 1971. De 1968 à 1978, le développement du centre de simulation a connu une progression continue, en mettant en œuvre des moyens capables de traiter les études d'ergonomie et en constituant des équipes qualifiées, issues des personnels du CEV.

Enfin, un nouveau centre complet, installé dans un bâtiment particulier conçu spécialement à cette fin, a été réalisé à temps pour les premiers essais du Mirage 2000 (ce centre commencé en décembre 1977 a été opérationnel en 1979). Des extensions notables sont encore intervenues (1987) et les activités du centre se sont étendues à de nouveaux domaines, en liaison avec les industriels et les utilisateurs.

Les principaux moyens implantés au centre de simulation sont des moyens de restitution de l'environnement du vol et des moyens de calcul et de conduite des essais. Les moyens d'environnement comprennent essentiellement des cabines de pilotage équipées, des systèmes de visualisation du monde extérieur et de restitution des sensations gyro-accélérométriques du vol. En 1989, le centre disposait de sept cabines avions et hélicoptères (civils et militaires) de deux mouvements cabine et de systèmes d'imagerie du monde extérieur très élaborés (y compris radar).

Les essais se répartissaient en trois catégories :

- les essais militaires (principaux programmes traités en équipes intégrées) ;
- les études civiles (principalement d'ordre réglementaire, sur des sujets très variés tels que cisaillement de vent, coordination des manches latéraux, certification des viseurs tête haute...) ;
- les études générales (à dominante militaire, regroupant des sujets d'intérêt général non encore intégrés à un grand programme, par exemple conduite de tir air-sol future, pilotage de l'axe de visée...).

CELAR (Centre électronique de l'armement)

Suite à une mission aux États-Unis en 1971, l'armée de l'Air française souhaita disposer d'un simulateur de combat analogue à celui vu à Langley AFB où l'USAF pouvait expérimenter ses tactiques de combat. Ne disposant que d'un budget très limité pour cette application, elle travailla avec le CELAR qui fit réaliser artisanalement, dans un premier temps, deux sphères et des dispositifs de projection simples, et utilisa les moyens d'un centre de calcul existant.

C'est ainsi qu'à partir de 1974 un simulateur de combat air-air put être utilisé à Bruz par les pilotes de l'armée de l'Air pour mettre au point des tactiques de combat avec canons et missiles air-air.

Avec l'expérience ainsi acquise, le CELAR orienta ses développements selon deux axes majeurs, utiles en fait à des systèmes de Défense aussi bien air que sol :

- la réalisation d'images de synthèse en temps réel ;
- la mise en place de simulateurs de combat "dédiés".

Ainsi, ont été installés successivement à Bruz les simulateurs de combat pour Mirage 2000, pour Tigre, pour char Leclerc, puis, pour Rafale.

L'aboutissement de ces développements fut, pour ce qui concerne la partie aéronautique, la création en 1982 d'un centre de simulation de combat au CEAM à Mont-de-Marsan. La réalisation de ce simulateur fut confiée à Thomson-CSF, qui bénéficia gratuitement, puisque pour une utilisation étatique, de certains plans et logiciels précédemment mis au point au CELAR. Le CELAR apporta par ailleurs un support direct à Mont-de-Marsan pour les parties simulées nécessitant une protection du savoir-faire d'autres industriels.

CEAT (Centre d'essais aéronautiques de Toulouse)

Le CEAT a des missions très étendues dans le domaine des essais aéronautiques, sur lesquelles il n'y a pas lieu de revenir. Il ne s'agit ici que de sa mission particulière dans le domaine des logiciels civils et militaires.

L'arrivée des systèmes numériques et l'importance croissante prise par les logiciels ont été l'occasion de nouvelles activités. Se posait alors en effet la question de la maîtrise des logi-

ciels, de leur contrôle et de leur qualification, et même de leur certification. Les services officiels devaient trouver leur place dans ce domaine nouveau, les industriels étant évidemment très attachés à assurer par eux-mêmes la validité de leurs produits, dans des fonctions vitales comme les commandes de vol.

Les équipes du CEAT étaient à la fois très motivées et dans un environnement scientifique très favorable (laboratoire du CNRS, ONERA-CERT, Université Paul Sabatier...). Dès le début des années quatre-vingt, confronté aux demandes émanant tant de la DGAC que de la DCAé, le CEAT a fait développer dans des PME issues du milieu universitaire les outils nécessaires aux investigations sur les logiciels. Ainsi se sont constitués une méthodologie et un savoir-faire qui ont ensuite été utilisés avec succès dans les différents programmes.

Cas des avions civils⁽⁴⁾

Les méthodes classiques de démonstration de sécurité n'étant pas envisageables pour les logiciels, la communauté aéronautique internationale s'est entendue pour ouvrir de nouvelles voies à la fin des années soixante-dix.

Pour chaque logiciel embarqué contribuant à une fonction est déterminé un "niveau minimum de qualité en développement", qui dépend de la gravité des pannes ou des erreurs associées à ce logiciel : quatre niveaux sont définis, le niveau 1 étant le plus sévère (associé à la criticité "catastrophique"). À chaque niveau de qualité en développement correspond l'application de processus qualité plus ou moins contraignants, définis dans un document de référence RTCA/EUROCAE DO 178 B.

Les autorités de certification participent directement au processus d'approbation du logiciel et, en France, l'expertise de certification logicielle est assurée par le CEAT depuis le programme A 310.

Cas des avions militaires

Les processus adoptés s'inspirent de la même approche.

La maîtrise du développement d'un logiciel embarqué passe, entre autres, par la rédaction de spécifications claires et précises, la formulation d'exigences méthodologiques appropriées à inclure dans le contrat et un suivi régulier des actions par le client, ou par un représentant accepté par les deux parties.

Dans le cas du Rafale, il y a eu plusieurs étapes :

- la signature par le STPA, le CEAT et Dassault Aviation d'une charte prévoyant la rédaction d'un référentiel méthodologique pour les logiciels, largement inspiré du document RTCA/EUROCAE cité plus haut (même principe des niveaux de criticité) ;
- la définition du rôle et des moyens d'investigation du CEAT dans un document spécial relatif aux logiciels ;
- l'établissement de clauses d'assurance de la qualité des logiciels pour tous les équipements (B ou C) ;
- enfin, un suivi rigoureux du développement mis sur pied par le CEAT pour s'assurer auprès des industriels de la bonne adaptation et de la cohérence des méthodologies utilisées.

(4) Voir aussi pages 128 à 136

Le CEAT a pu, dans ces conditions, en liaison avec Dassault Aviation et l'ensemble des équipementiers, fournir un avis à la direction de programme sur la qualité des logiciels développés et contribuer également à la maîtrise des coûts des logiciels et à l'optimisation de l'architecture globale du système (réduction du nombre et de la taille des logiciels devant être développés en niveau critique).

L'expertise reconnue au CEAT dans ces nouveaux domaines témoigne de l'aptitude des services et des établissements à faire face aux problèmes posés par l'ingénierie des systèmes complexes. Elle constitue aussi un exemple d'expérience réussie dans l'application de techniques duales civil-militaire.

4. COMPARAISON CIVIL-MILITAIRE

Il faut rappeler tout d'abord les différences de relations client-fournisseur qui caractérisent les marchés des avions militaires et ceux de l'aviation civile : pour les besoins de nos armées, l'État est à la fois prescripteur de besoin, financier des études, contrôleur et client, alors que les compagnies aériennes, même lorsqu'elles sont nationales, font appel aux fournisseurs du monde entier. Il en résulte que l'action des services de l'État prend des formes très différentes dans le sujet traité de l'évolution des équipements aux systèmes.

L'approche "système" résulte du besoin de concevoir un ensemble optimum de moyens en vue de remplir selon des critères définis une ou plusieurs missions.

Une des premières différences entre le civil et les militaires va donc découler de la nature des missions et critères d'optimisation retenus.

On peut noter en préambule que le domaine de l'aviation civile comporte pratiquement une seule mission, consistant à transporter, en sécurité et économiquement, des passagers payants et du fret, d'un point connu à un autre point connu et prévu, alors que l'action militaire se caractérise par la multiplicité des cibles possibles dans l'espace et le temps et par une certaine imprévisibilité dans le déroulement des opérations.

Les mouvements dans l'espace aérien sont traités, même en temps de paix, selon des règlements spécifiques, mais aussi compatibles, ce qui impose l'adoption de solutions communes pour, par exemple les communications radio, mais entraîne également de réserver certaines parties de l'espace à un usage exclusivement militaire.

Cohabitation et spécificité sont des caractéristiques permanentes des systèmes civils et des systèmes militaires.

4.1. Les critères

Le marché des avions civils est dominé par le souci de rentabilité des compagnies aériennes et par les obligations de sécurité. Le critère principal de conception des systèmes civils est donc la réduction des coûts d'exploitation avec sauvegarde d'un niveau de sécurité acceptable par les autorités de certification.

Les avions (ou les hélicoptères) armés doivent remplir des missions variées : interception, reconnaissance, attaque au sol, bombardement, renseignement dans un environnement hostile où la réussite, assortie d'un niveau d'attrition acceptable par les acteurs, constitue le critère principal. Toutefois, l'accroissement constant des coûts de développement et d'acquisition des moyens aériens armés a conduit à les doter d'une polyvalence renforçant la nécessité d'une approche système tout au long de leur conception. Le Rafale illustre cette évolution puisqu'il est à la fois multimissions et multi-utilisateurs (armée de l'Air et Aéronavale).

4.2. Les facteurs caractéristiques

Les évolutions technologiques du secteur équipement ont été le facteur principal, commun au civil et au militaire, de l'implantation de systèmes intégrés efficaces et sûrs. Comme indiqué précédemment, l'apparition de capteurs nouveaux plus précis et fiables a constitué, dans cette évolution, une étape essentielle. Les capteurs ou "senseurs" ont un rôle fondamental car ils conditionnent, en amont de tout équipement ou système, la performance finale et sa stabilité dans le temps. Les services officiels en ont eu parfaitement conscience et y ont consacré d'importants efforts financiers. La disponibilité de capteurs performants adaptés aux techniques évolutives a non seulement favorisé la conception des systèmes, mais aussi été un facteur de potentialité industrielle et d'indépendance nationale. Comment ferait-on pour bâtir un système cohérent et performant si les senseurs d'aujourd'hui pour mesurer les accélérations, les vitesses angulaires, les pressions, les forces et les déplacements... n'étaient pas *solid-state* avec sortie en fréquence ?

Certes, avant même l'approche système, la centrale inertielle a conduit pour les applications civiles à la suppression de la fonction navigateur de l'équipage, et pour l'attaque au sol à un niveau de précision décuplant le taux de réussite des missions. Mais le facteur principal a été l'implantation réussie de la numérisation des informations nécessaires à l'accomplissement des missions et leur traitement temps réel sécurisé. Même si le présent document n'appréhende que la partie système du véhicule aérien, il faut tenir compte de l'environnement complet de la mission pour mesurer le volume et le degré temps réel des informations venant de l'extérieur et traitées à bord. De même, les bases de données utiles à une mission doivent être stockées à bord et leur temps d'accès spécifié en fonction des besoins opérationnels.

Enfin, l'équipage reste à la fois une source et un récepteur d'informations, et surtout un acteur dans le fonctionnement du système. Les problèmes de liaison air-sol et sol-air passent encore souvent par la phonie pour la transmission d'informations, même peu urgentes pour la mission, mais nécessitant d'intervenir sur le système. L'interface entre équipage et système prend une importance considérable et constitue une source potentielle d'erreurs. L'ergonomie du cockpit est devenue, dans l'approche système, une technique et un art.

Il faut toutefois citer un cas singulier dans le sujet qui nous occupe, celui du Concorde. Sa genèse a été menée comme s'il s'agissait d'un produit militaire et il a fallu définir des règlements de certification nouveaux, ceux existant ne s'appliquant pas à un avion supersonique. La *CAA, Civil Aviation Authority*, a apporté son expérience dans l'objectif commun franco-britannique de faire adopter au plan international de nouvelles règles et méthodes pour la certification du Concorde. Le défi technique était tel que les concepts généraux d'intégration mis en œuvre à l'époque sont encore valables aujourd'hui, malgré le handicap de moyens de transfert d'information et de calcul encore analogiques.

On peut dès lors aborder les comparaisons civil-militaire en examinant les caractéristiques des traitements de données et d'informations effectués à bord.

4.3. Bases de données

La navigation des avions civils, surtout les longs courriers, impose la présence à bord d'un volume considérable d'informations sur les terrains, leurs procédures, les aides radioélectriques, météo, les interdictions de survol, etc. Avant l'apparition des systèmes de

navigation de zone Sperry sur DC10, puis le *Flight Management System* (FMS), sur tous les avions à partir de la fin des années soixante-dix, plusieurs volumes de documentation papier édités et mis à jour par des sociétés spécialisées étaient utilisés par l'équipage. Le succès du système Sperry a reposé sur l'emploi d'un disque avionné à lecture optique genre CD capable de stocker numériquement toutes les informations avec une mise à jour par échange simple et rapide. Les systèmes FMS actuels utilisent des mémoires électroniques bénéficiant des accroissements de capacité venant du marché grand public et tenues à jour par échange standard. Ils incorporent également les informations concernant les procédures de décollage et d'atterrissage propres à chaque piste d'un terrain, SID (*Standard Instrument Departure*) et SIAR (*Standard Instrument Arrival Route*), dont l'exécution automatique par le FMS diminue la charge de travail de l'équipage tout en améliorant la sécurité.

Les bases de données de navigation des avions militaires exigent un volume plus réduit et leur stockage à bord n'a pas constitué un facteur déterminant du système pour les missions qui ont été longtemps les plus nombreuses : interception par tir engins air-air ou canon, supériorité aérienne. L'attaque au sol par engins à guidage laser, possible seulement de jour, n'a pas exigé une évolution significative des bases de données de navigation.

4.4. Données de mission

La mission quasi unique d'un avion de transport civil est caractérisée par le plan de vol. Préparé sans urgence particulière, il doit respecter la réglementation de la circulation aérienne édictée par les autorités de l'aviation civile, être déposé préalablement, mais les conditions d'emploi opérationnel de l'avion sont du ressort des compagnies aériennes. Le système FMS définit ces conditions optimales à partir des performances avion et dans l'environnement réel du vol en fonction de critères économiques (*cost index*). Les routes aériennes sont étudiées à l'avance et les données spécifiques stockées dans le FMS. Les contrôleurs de la navigation aérienne peuvent, en fonction des impératifs d'anti-collision qu'ils doivent faire respecter, imposer des modifications dans le déroulement programmé. Mais le commandant de bord reste l'acteur intervenant sur les systèmes à bord dont le degré d'intégration permet d'exécuter automatiquement toutes les phases du plan de vol, depuis le décollage jusqu'à l'atterrissage, modifications comprises.

La préparation et l'exécution d'une mission militaire est beaucoup plus complexe. Le cas le plus contraignant est constitué par l'emploi d'un porte-avions comme base opérationnelle. En effet, la position géographique du lieu de décollage est variable et ses coordonnées doivent être transférées au système bord de navigation et d'attaque rapidement, précisément et automatiquement pour initialiser les moyens aéroportés.

Les vecteurs aériens de la force de dissuasion remplissent une mission très particulière mettant en œuvre, tant dans sa préparation, son déclenchement et son exécution, un ensemble de systèmes dont ils ne constituent qu'un maillon chargé d'ameener en un point donné la charge, bombe pour le Mirage IV, ASMP (air-sol moyenne portée) pour le Mirage 2000 ou le Super Étendard en utilisant tous les moyens de furtivité possibles, dont le vol à très basse altitude. Ce cas conduit à exiger le stockage et la reconfiguration temps réel du profil de terrain à partir des coordonnées géodésiques numérisées et des informations d'un radar de suivi de terrain performant.

Il paraît nécessaire de distinguer deux phases dans les caractéristiques des systèmes bord des avions d'armes français en fonction de l'évolution des autres missions principales :

- interception et supériorité aérienne, tout d'abord, avec capacité air-sol par armement conventionnel ;
- attaque au sol par bombe et engin guidés laser, puis par missile de croisière avec imagerie.

Historiquement, interception et supériorité aérienne étaient les missions dévolues aux différents avions d'armes, tels les Mirage III, F1, 2000. Les conduites de tir sont organisées autour du radar et les systèmes sont développés en coopération entre avionneur et radariste. Le savoir-faire des équipementiers dont les produits font partie du système évolue de solutions matérielles à la maîtrise dans l'écriture des logiciels. On comprend dès lors leur souci de conserver ces capacités nouvelles comme faisant partie de leur propriété, qui devient plus intellectuelle qu'industrielle, mais n'est pas moins importante pour l'entreprise.

L'autonomie de conduite de la mission par l'équipage est grande, les liaisons sol fournissant les informations initiales de position de l'ennemi, l'interception restant du ressort du moyen aérien et la décision de tir au pilote qui sélectionne l'arme la plus adéquate et le moment favorable en fonction de ses détecteurs de bord. Le système n'a pas besoin de bases de données importantes à bord, mais doit être très rapide et faciliter la gestion complexe des configurations de l'armement, des contre-mesures et des alertes.

Les missions d'attaque au sol ont été les plus nombreuses dans les conflits récents (Kosovo, Afghanistan). Les doctrines d'emploi des moyens sont différentes et entraînent des modifications dans les caractéristiques des systèmes. Ravitaillement en vol, désignation d'objectifs, depuis le sol ou par un avion illuminateur laser, imposent la présence d'un poste militaire autonome de gestion de la circulation et de commandement aérien, de type AWACS, qui ordonne aux équipages concernés (quelques centaines d'avions parfois) les actions à exécuter par liaisons radiophoniques cryptées. Les nombreuses versions de l'armement emporté et leur sélection en vol compliquent encore le déroulement de la mission. Les moyens sol de préparation de mission et le transfert rapide d'informations à bord prennent une importance majeure dans le succès opérationnel. Enfin, une évolution récente vers une désignation de cibles par GPS va contraindre à disposer à bord d'une cartographie précise et étendue prenant une grande place mémoire dans les systèmes.

4.5. Standardisation et certification

Les organismes traditionnels œuvrant dans le domaine de l'aviation civile se sont convertis aux impératifs de l'approche système en gardant à l'esprit le souci de sauvegarder, au moins en partie, les possibilités de choix des équipements par les compagnies aériennes. Le souci d'économie a conduit à spécifier la concentration des capteurs et des calculs associés, à définir les caractéristiques de la liaison numérique entre calculateurs dont les composants électroniques spéciaux ont été disponibles sur le marché, à réglementer les méthodes et les moyens de production des logiciels.

Souvent les avionneurs ont utilisé des procédures encore plus sécurisées en matière de logiciel, comme l'écriture d'un même programme par deux équipes différentes. En revanche, les solutions de redondance adoptées ont conduit à des choix d'architecture nouvelle (capteurs communs pour la navigation et les commandes de vol).

Les matériels pour l'aviation civile ont utilisé très vite des composants électroniques dits "grand public", tels les microprocesseurs et les mémoires, seuls susceptibles de répondre aux exigences de prix des avionneurs et des compagnies aériennes.

Les actions de standardisation des systèmes militaires, conduites dans un cadre national et sous l'autorité de l'État, présentent naturellement un aspect nettement plus "dirigiste". Mais, même dans ce domaine, cette politique rencontre des limites. Ainsi, le digibus GINA, qui avait ouvert la voie à un moment où il n'existait pas d'autre solution disponible, a-t-il finalement été remplacé par la norme MIL 1553 qui s'est imposée au sein de l'OTAN.

En matière d'architecture, la solution avec calculateur central a été adoptée par l'avionneur, en même temps qu'une intégration de plus en plus poussée des équipements (certains organes considérés comme vitaux pour la cellule conservant cependant leur autonomie).

Enfin, comme dans l'aviation civile, on a utilisé très largement les composants électroniques dits "grand public".

La certification des logiciels est un point d'action commune civile-militaire, à la fois dans les textes et dans les organismes concernés. Le CEAT a été très vite chargé de contrôler et d'avaliser les travaux des constructeurs (cf. §3 : l'action des services).

Le coût élevé de la formation des équipages en vol a conduit civils et militaires à recourir à des simulateurs. Certains ont utilisé des avions "de servitude" pour cet usage. Dès la fin des années soixante, les navigateurs de Mirage IV se sont entraînés sur des N 2501 équipés du système navigation-bombardement de l'avion d'armes installés par l'AIA de Clermont-Ferrand. De même, plusieurs types de Falcon 20 modifiés avec poste de pilotage de l'avion d'armes en place gauche, pilote de sécurité à droite et équipés du radar opérationnel servent à la formation des pilotes de Mirage III E, F1 CR et F1 CT. Pour la formation des équipages à deux des Mirage 2000 N, le poste navigateur est simulé dans la cabine du Falcon. Mais les simulateurs de mission les plus nombreux sont des moyens sol rétablissant avec plus ou moins de réalisme les conditions de vol réelles. Les calculateurs avions ne sont que rarement simulés, les industriels répugnant à dévoiler ce qui constitue leur véritable *know how*, le code source de leur logiciel.

(Pour les aspects industriels, voir l'annexe A 4 : les simulateurs de vol)

Les procédés de maintenance ont été profondément bouleversés par l'apparition des systèmes. Les civils, toujours par souci d'économie, ont exigé les premiers des équipementiers les moyens d'identifier en vol le "boîtier" défectueux et des avionneurs des bancs test automatiques permettant la réparation par échange standard jusqu'au niveau carte. Les militaires ont adopté une politique analogue pour l'entretien premier et deuxième échelon, après avoir abandonné la notion de potentiel pour celle de maintenance selon état.

Il est difficile de tirer des conclusions générales de cette comparaison des approches systèmes entre civil et militaire. Il paraît toutefois possible d'avancer que, malgré la persistance de profondes différences entre les missions, les solutions retenues se sont plutôt rapprochées et qu'une fertilisation croisée est apparue, bien que mise en œuvre par des équipes de conception indépendantes. Une plus grande communalité s'est établie en matière d'entraînement, de maintenance et de documentation.

LES PROGRAMMES

1. LA TECHNOLOGIE DES SYSTÈMES DANS LES AVIONS MILITAIRES FRANÇAIS

L'évolution de la technologie a été évidemment très importante au cours de la période considérée. Elle peut, au moins en partie, être appréciée concrètement à la lecture des monographies de programmes. Il est en revanche très difficile d'en faire la synthèse, compte tenu des multiples aspects relatifs aux divers équipements et armements et à leur intégration.

C'est pourquoi on a préféré plus simplement reproduire ci-après le témoignage d'un des principaux acteurs industriels, M. Daniel Lerouge, ancien directeur technique des systèmes à Dassault Aviation.

Même si le sujet traité se limite aux avions de combat, on peut avoir ainsi une idée d'ensemble des évolutions intervenues au cours de la période et des principales préoccupations qui ont été à la base de ces évolutions.

2. L'ÉVOLUTION DE LA TECHNOLOGIE DES SYSTÈMES ÉLECTRONIQUES DES AVIONS MILITAIRES FRANÇAIS, DE 1960 À 2000⁽⁵⁾

Le développement de l'aéronautique militaire française après la guerre a été très fortement marqué par la volonté d'indépendance politique et économique affirmée dès les années cinquante et proclamée plus ouvertement encore lors du retour au pouvoir du général De Gaulle en 1958. Cette volonté correspondait au désir profond de M. Marcel Dassault de créer de nouveaux avions, toujours plus performants dans la lignée historique de l'aéronautique française d'avant-guerre. Cette volonté d'indépendance (relative, car il n'était pas question de tout développer ex nihilo en France) a eu des conséquences importantes sur toute l'industrie aéronautique française.

Parmi les conséquences générales nous pouvons citer :

- une politique permanente de nouveaux programmes prototypes permettant d'entretenir et développer les connaissances scientifiques et techniques, de créer des équipes d'ingénieurs concepteurs, de mettre au point les moyens et techniques de conception, de fabrication et d'essais (ceci en collaboration entre l'État et les industriels) ;
- la recherche permanente du meilleur rapport entre coût et efficacité dans le choix des formules d'avions et des architectures des systèmes d'armes : l'option, par exemple, de réservoirs supplémentaires et d'armements externes "intégrés" aérodynamiquement à la cellule de base permet de limiter la taille de l'avion, tout en offrant une panoplie de configurations répondant à la variété des missions des utilisateurs et avec une répercussion minimale sur les performances ;
- la recherche de clients à l'exportation intéressés par ces formules économiques mieux adaptées à la taille de leurs forces aériennes : ces programmes dérivés ont permis l'application, par petits pas, des évolutions technologiques, en particulier pour les équipements électroniques, en amortissant les investissements sur un nombre plus

(5) Par Daniel Lerouge, ancien directeur technique des systèmes à Dassault Aviation.

important d'exemplaires et en finançant des évolutions de technologie non appliquées sur les avions français. Cette politique fournissait en même temps le moyen de maintenir les équipes de conception et de fabrication, en attendant le lancement des programmes de série français.

2.1. Technologie des systèmes

Dans le cadre général exposé ci-dessus, les orientations technologiques des systèmes et les choix de technologie des équipements répondaient aux objectifs généraux de coût-efficacité du système d'armes global.

Pour le système embarqué, cela conduisait à l'application des critères suivants :

- masse minimale ;
- consommation électrique minimale ;
- réduction des masses de câblages ;
- réduction de traînée aérodynamique des antennes et charges externes ;
- souplesse d'adaptation aux différentes configurations et missions, tant des commandes et visualisations que des échanges d'informations ;
- réduction de la charge de travail de l'équipage (en particulier, par le choix systématique de l'intégration des commandes et visualisations et l'optimisation des commandes en temps réel) ;
- fixation, pour chaque programme, des règles de conception et des standards pour éviter des adaptations inutiles et faciliter l'instruction et la maintenance ;
- application systématique de règles de développement, d'essais et d'intégration communes à tous les équipements et sous-systèmes ;
- développements exploratoires préalables aux choix des technologies nouvelles, par exemple : techniques numériques (banc SDECIAA), organisation des poste d'équipage, commandes de vol numériques, stabilité variable, commandes à la voix, radars CW et pulse-doppler, missiles actifs, attaque air-air multi-cibles, etc.

Ces travaux ont été généralement réalisés en coopération étroite entre les industriels concernés, quelquefois reliés par une coordination, et les services de l'État (services techniques, CEV, laboratoires).

En matière de systèmes et équipements, les principes ci-dessus ont été appliqués, chaque fois que possible, de manière volontariste par tous les coopérants. Des séminaires, symposiums, conférences (nationaux et internationaux) ont permis les échanges d'informations et de points de vue nécessaires pour l'orientation des choix ; il faut dire que, pendant de nombreuses années, le peu d'obstacles mis par les États-Unis aux échanges d'informations dans le cadre de l'OTAN a beaucoup facilité la tâche. De même, l'obtention, à des moments critiques, de technologies nouvelles dans de nombreux domaines a permis le progrès quasi continu des systèmes d'armes de nos avions de 1945 à 2000 !

2.2. Caractéristiques et grands axes des évolutions technologiques des systèmes

Étant donné le cadre et les objectifs exposés ci-dessus, les évolutions technologiques des systèmes se classent dans les grandes catégories suivantes :

- miniaturisation : transistorisation, circuits imprimés, circuits intégrés, couches épaisses, couches minces, etc. ;

– numérisation : la volonté de numériser les équipements et les systèmes se manifeste dès le début des années soixante ! Lors du concours OTAN pour un avion d’attaque air-sol VTOL ou STOL (devant remplacer le FIAT G 91), Dassault avait proposé un système organisé autour d’un ordinateur central numérique (1962-1963). Ce choix, un peu futuriste pour l’époque, même aux États-Unis, découlait des avantages basiques qu’on pouvait espérer et qui se sont révélés exacts par la suite... mais beaucoup plus tard. Il n’empêche, l’orientation était donnée et elle a été suivie pas à pas de manière constante depuis 1965. Des réunions organisées par les services officiels ont permis aux avionneurs et industriels d’équipements d’aborder ensemble cette nouvelle période technologique... qui dure encore !

Parmi les avantages escomptés de la numérisation étaient cités :

- la souplesse de reconfiguration et d’adaptation ;
- la précision des calculs indispensable à certaines fonctions : les centrales à inertie n’ont pu, par exemple, atteindre leurs performances que grâce aux ordinateurs numériques associés ;
- la capacité de “mise en mémoire”
- l’amélioration de la fiabilité (disparition des pertes de performances dues aux dérives des systèmes analogiques) ;
- la réduction, à terme, des masses et des consommations, un même équipement effectuant des fonctions jusque-là réparties entre de nombreux autres équipements ;
- la capacité d’optimisation des commandes et visualisations à chaque mission et à chaque phase de mission ;
- l’aptitude à la préparation et à la restitution de mission.

La numérisation s’est d’abord appliquée, en interne aux équipements sur Jaguar (ordinateurs de navigation et de bombardement), sur le Super Étendard (centrale à inertie et ordinateur de bombardement), puis sur les versions d’exportation du Mirage F1 (première apparition d’un ordinateur central) ; l’application de la numérisation n’a pu se généraliser par la suite qu’avec les liaisons numériques multiplexées et les visualisations intégrées sur tube cathodique (Mirage 2000).

2.3. Multiplexage-liaisons numériques

La numérisation a permis la généralisation du multiplexage, c’est-à-dire l’emploi des mêmes supports et outils physiques pour de nombreuses et différentes fonctions et échanges.

Parmi ces applications, au niveau du système, le développement des liaisons numériques multiplexées sur support cuivre ou fibre optique a donné une approche tout à fait nouvelle des systèmes permettant le transfert de la plus grande partie des développements de systèmes du matériel au logiciel. Il en est résulté des gains de masse de câblages considérables ainsi qu’une aptitude à la maintenance embarquée de l’ensemble du système électronique.

Le multiplexage et la reconfiguration ont également permis une augmentation considérable des combinaisons possibles des commandes et visualisations, à masse et volume constant, la seule limite étant celle des capacités d’adaptation des équipages !

Premières études sur banc SDECIAA vers 1968. Application du digibus GINA d’ESD sur les versions d’exportation du Mirage F1 et sur le Mirage 2000 DA (armée de l’Air française).

2.4. Technologie des visualisations

La recherche du meilleur rapport entre coût et efficacité a conduit, compte tenu des motorisations dont nous disposons en France, à limiter la taille des postes d'équipage. La technologie a permis, par étapes successives, l'exploitation quasi complète de l'angle solide accessible par les yeux du pilote : collimateurs à tube cathodique monochrome et couleur ; miroirs et optiques holographiques ; générateurs de symboles ; matrices CCD monochromes et couleur ; écrans plats monochromes et couleur à cristaux liquides ; collimateurs "tête moyenne" avec présentation des images des capteurs dits "temps réel" ; etc.

Premier collimateur "tête haute" à tube cathodique sur le Super Étendard (1977). Collimateur "tête moyenne" et miroir holographique sur Rafale A (1986).

2.5. Technologie des commandes

Dans cette catégorie, il faut citer les commandes à la voix, la reconnaissance vocale, la synthèse vocale, etc.

Application de la synthèse vocale sur Mirage 2000. Application de la commande vocale sur Rafale.

2.6. Technologie des antennes

Longtemps négligés, les développements récents sur les antennes "conformes" et "réparties" ainsi que sur toutes les catégories d'antennes synthétiques ouvrent des horizons nouveaux permettant de traiter en émission et en réception tout l'environnement électromagnétique des avions qui devient ainsi programmable, tout en réduisant considérablement les conséquences sur la traînée aérodynamique et la "signature" de l'aéronef. Tous ces progrès ne sont évidemment possibles que grâce au développement en parallèle des circuits et traitements hyperfréquences qui mériteraient à eux seuls un exposé complet des spécialistes.

Applications sur Rafale M et C : antenne du radar et du système de contre-mesures Spectra.

2.7. Technologie des systèmes optiques

Outre les développements cités plus haut pour les systèmes de visualisation, la période 1960-2000 aura été marquée par l'application des lasers : télémétrie ; éclairage des cibles ; gyroscopes statiques ; instruments de reconnaissance ; autodirecteurs ; mémoires ; visualisations ; caméras d'observation ; etc.

Télémètre laser sur Jaguar (laser CGE 1968). Pods de désignation optique pour armement guidé laser : Jaguar, Mirage F1 EQ, Super Étendard (Thomson-CSF). Désignation par caméra thermique sur Mirage 2000-3.

2.8. Technologie des logiciels

Cette technologie est devenue fondamentale pour le développement des systèmes puisque l'essentiel des études de fonctions techniques et opérationnelles est, depuis le Mirage 2000 et l'Atlantique 2, traité sous forme de logiciels. L'évolution des volumes de logiciels est due, en grande partie, à la multiplication des possibilités apportée par la numérisation.

Les développements des langages de haut niveau (LTR 2 sur Atlantique 2 et LTR 3 sur Mirage 2000, ADA sur Rafale, langage C++ orienté objet sur les dernières versions Rafale), des “ateliers” de spécifications et d’écriture des logiciels, des moyens de maquettage et de test sur machines de laboratoire puis sur équipements de vol réels, ont jalonné depuis 1975 l’histoire du logiciel embarqué en France.

L’approche française du développement des logiciels système “temps réel” s’est surtout révélée dans les applications aéronautiques militaires. Dans ce domaine, étant donné l’imbrication étroite des équipes de développement et des outils, une expérience propre est indispensable et ne peut pas être acquise entièrement à l’extérieur : c’est ce qui s’est produit en France et qui permet de disposer maintenant en support du programme Rafale d’un ensemble organisé d’équipes humaines et matérielles particulièrement performant. Pour plus de détails sur cette partie, un exposé plus détaillé des spécialistes serait nécessaire.

2.9. Technologie de la simulation

En matière de système, la simulation est devenue un outil indispensable depuis l’étude jusqu’à la formation et l’entraînement. Les progrès de la technologie, à mi-chemin entre les moyens informatiques terrestres et les moyens embarqués, ont permis une “fusion” des moyens de développement des systèmes sol et bord.

2.10. État actuel des technologies

Le tableau suivant donne la liste des dernières technologies appliquées sur le programme Rafale dans ses derniers standards (F2, F3, F4).

cabine	<ul style="list-style-type: none"> – écrans tactiles – jumelles de vision nocturne – commande vocale – viseur de casque – toutes commandes sur manche et manette
capteurs	<ul style="list-style-type: none"> – radar à balayage électronique 2 plans – antenne active (émetteurs répartis) – "radar" optronique sur cibles aériennes et cibles au sol multispectral
navigation	<ul style="list-style-type: none"> – GPS – centrales à inertie à gyroscopes laser sans cardans (strapdown) – application des filtrages d'hybridation multiples
architecture système	<ul style="list-style-type: none"> – électronique modulaire – programmation "objet" – langage objet C++
avion cellule	<ul style="list-style-type: none"> – réduction des signatures radar et optique – intégration générale des gouvernes

3. EXEMPLES DE SYSTÈMES

3.1. Retour sur la notion de système

La présente annexe C “Des équipements aux systèmes” a pour but d’introduire, à côté des équipements eux-mêmes, la très importante notion de système. Différents aspects relatifs à la naissance et à l’évolution de ce concept ont donc été développés, mais il ne pouvait être question, à partir du seul domaine couvert par le groupe COMAÉRO-Équipements, de traiter des systèmes d’armes dans leur ensemble.

Pourtant, c’est bien cette notion qui est sous-jacente lorsqu’on évoque les réalisations et les programmes des dernières décennies. Le concept de système d’armes figure donc en bonne place dans le volume COMAÉRO “Avions militaires”. Mais il est normal qu’il soit aussi présent dans cette annexe, à partir du moment où l’on veut illustrer l’évolution des systèmes par des exemples de réalisation.

Le système d’armes va bien au-delà d’un ensemble d’équipements, puisqu’il regroupe tous les moyens permettant à un équipage d’assurer ses missions. Il s’étend ainsi non seulement aux moyens embarqués, mais aussi aux moyens sol ou autres qui les complètent et ce, à tous les stades de la préparation et de l’exécution de la mission.

Comme on l’a déjà dit, l’évolution même des conditions d’emploi a conduit encore à étendre ce concept et, aujourd’hui, on parle de “systèmes de forces”, car beaucoup d’opérations ne peuvent être menées qu’avec la participation d’un ensemble coordonné d’avions de différents types, de satellites et de systèmes au sol de toute nature.

Pour les avions civils, le problème est évidemment différent, en raison de la nature de la mission, mais on retrouve beaucoup de caractéristiques communes au niveau des systèmes et, bien entendu, une évolution parallèle des technologies.

Dans ce qui suit, on a cherché à illustrer l’évolution des systèmes à travers des exemples de réalisations. Cette approche a été retenue de préférence à la recherche d’une véritable synthèse, compte tenu du grand nombre de facteurs qu’il aurait fallu faire intervenir.

3.2. Programmes faisant l’objet de monographies

Les exemples choisis l’ont été dans les divers domaines d’utilisations aéronautiques. Ils sont cependant plus nombreux pour les avions de combat de l’armée de l’Air et les avions destinés à l’exportation qui, dans l’ensemble, ont donné lieu à une évolution continue tout au long de la période considérée et sont, de ce fait, très représentatifs des progrès accomplis. On peut, en particulier, suivre à travers cette évolution le passage de l’analogique au numérique, avec les différentes étapes de transition.

Si on a retenu un panorama presque complet pour les avions de combat de l’armée de l’Air, on s’est limité pour les autres domaines à quelques exemples considérés comme suffisamment significatifs.

Pour l’aéronautique navale, les exemples choisis concernent des systèmes réalisés à environ vingt ans d’intervalle pour la même mission et le même porteur simplement modifié, d’où une comparaison particulièrement intéressante.

Pour l'armée de Terre, le passage de la Gazelle au Tigre permet d'illustrer un changement radical, puisqu'avec ce dernier programme, l'hélicoptère armé s'est pratiquement hissé, d'un seul coup, à un niveau comparable à celui des avions de combat.

Enfin, pour les avions civils, la présentation de la famille Airbus et de la famille Falcon montre des évolutions très importantes en matière de systèmes. On pourra également se reporter à l'annexe A 3, en ce qui concerne le pilotage automatique et les travaux menés en France dans le domaine de l'atterrissage automatique.

3.3. Remarques sur les réalisations

Les monographies regroupées dans la partie suivante sont présentées, par catégorie, dans un ordre chronologique, avec seulement, de temps à autre, quelques commentaires permettant d'établir un lien entre elles. Il a donc paru utile de mettre en lumière quelques aspects plus généraux s'appliquant à l'ensemble de cette présentation.

Un système est une application, à un moment donné, dont les résultats dépendent :

- de l'état de la technologie des différents éléments qui le constituent ;
- des compromis nécessaires pour le coût d'acquisition et pour l'optimisation coût-efficacité qui fait partie de la définition d'un système ;
- des avancées réalisées dans les moyens de conception, de simulation, etc. ;
- de la qualité des coopérations et travaux communs de tous les partenaires.

Différents aspects interviennent dans la définition : aspect opérationnel, aspect technique, aspect économique, interface homme-machine, etc.

↳ L'aspect opérationnel est évidemment fondamental. Il est plus formalisé dans le domaine militaire (bien que les exigences soient aussi contraignantes dans le domaine civil) et les orientations qui sont ainsi données influent très fortement sur l'évolution des systèmes : priorité donnée à telle ou telle mission, choix des formules et des procédures d'emploi et de mise en œuvre, etc. Les options prises sont d'autant plus importantes que certains choix ont des conséquences qui se font sentir sur de longues périodes, ne serait-ce qu'à cause de la durée de vie des programmes. Dans la suite des systèmes présentés, apparaît d'ailleurs une réelle continuité, mais c'est parce qu'elle ne concerne que les programmes qui ont abouti et qui ont, eux-mêmes, donné naissance à d'autres versions. C'est aussi en raison d'une autre forme de continuité, cette fois au plan industriel et parce que, en général, les programmes sans suite n'ont pas entraîné de réalisation de systèmes, au délai d'aboutissement plus long.

La grande durée de vie d'un programme (environ dix ans ou plus pour le développement, et trente ans ou plus pour l'utilisation en service) a également d'autres conséquences :

- d'une part, il est nécessaire de prévoir des rénovations des systèmes, en raison de l'obsolescence des composants et/ou des progrès ou changements à prendre en compte ;
- d'autre part, il peut se produire des évolutions notables dans l'environnement, qui influent sur les équipements de mission. Cela a conduit, par exemple, l'armée de l'Air à valoriser l'utilisation du Jaguar largement au-delà des prévisions initiales. De même, le Tigre, conçu essentiellement pour les missions antichar, a ensuite évolué pour privilégier l'appui-protection.

↳ L'aspect technique est tout aussi important. Comme l'aspect opérationnel, il est très visible dans la suite des monographies qui montrent l'évolution des équipements et armements ainsi que celle des conceptions de systèmes. Certains équipements sont directement issus des besoins liés à la réalisation des systèmes : calculateurs centraux, liaisons multiplexées, visualisations, etc. Mais la plupart des équipements et armements ont connu des avancées techniques et technologiques qui ne résultent pas de la conception des systèmes.

Celles-ci n'ont pu être obtenues que grâce aux recherches et développements préalables, souvent sur une très longue période. Grâce à ces efforts, soutenus par l'État et par les industriels concernés, des progrès considérables et des innovations se sont manifestés pratiquement dans tous les domaines, y compris dans ceux où notre industrie avait, pour différentes raisons, un retard certain.

Bien entendu, le passage au numérique et la place croissante des logiciels sont une caractéristique essentielle de l'évolution constatée au fil des programmes, avec toutes les conséquences que cela comporte.

↳ L'aspect économique est également présent, même s'il n'apparaît pas au premier abord dans les monographies. Outre la préoccupation générale de coût-efficacité déjà mentionnée, qui est une caractéristique de l'approche système, les considérations économiques ont aussi favorisé l'emploi croissant des systèmes. En effet, l'intégration fonctionnelle et l'optimisation des configurations conduisent, à fonctions égales, à des coûts d'acquisition plus faibles. Les coûts d'usage sont également réduits par une meilleure détection, en service, des sous-ensembles ou constituants défectueux ; ceci permet de limiter les stocks de rechange et le coût des réparations. Certaines monographies illustrent particulièrement les gains en volume et en masse obtenus, à fonctions égales. Ces gains ont rendu possible la réalisation des systèmes beaucoup plus élaborés, sans arriver à des encombrements et des coûts prohibitifs. Bien entendu, la performance reste toujours un objectif de base en aéronautique, mais l'aspect économique devient de plus en plus une priorité.

↳ Enfin, s'agissant d'aéronefs militaires ou civils, l'importance de l'homme est telle que la conception même du système et les questions d'interface homme-machine sont devenues fondamentales. Si la relation homme-machine a toujours été en tête des préoccupations bien avant l'arrivée des systèmes, le problème s'est évidemment beaucoup compliqué avec l'accroissement de la complexité dans tous les domaines. Non seulement les études d'ergonomie sont devenues un élément majeur de la définition du système, mais c'est l'ensemble constitué par le pilote (ou l'équipage), l'aéronef et ses systèmes qui doit être optimisé, dès le stade de la conception. Cette préoccupation peut se lire à travers les monographies, au fur et à mesure qu'on avance dans le temps.

Un dernier point est à signaler à propos de la lecture des monographies : le développement des nouveaux systèmes s'est naturellement effectué à l'occasion des grands programmes d'avions ou d'hélicoptères qui, seuls, pouvaient apporter le soutien nécessaire, en particulier au plan financier. L'avionneur a été ainsi amené, depuis le Mirage IV, l'Atlantic et Concorde, à exercer de très larges responsabilités en matière de systèmes. Une intégration de plus en plus poussée entre avion et systèmes a encore conduit à renforcer ce rôle, d'où la mise en place d'organisations spécifiques et de moyens puissants pour traiter les problèmes correspondants chez l'avionneur et ses coopérants (avec, bien entendu, les adaptations appropriées dans les services officiels).

Comme on pourra le voir également, il faut noter la place, pour un pays comme la France, des marchés à l'exportation, qui ont fourni non seulement des débouchés importants, mais aussi la possibilité de développer des versions nouvelles qui ont parfois contribué à l'équipement de nos forces.

Le travail en commun de l'avionneur et de ses coopérants s'est traduit, pour finir, par la création avec tous les partenaires d'un véritable "esprit système". Certains équipements importants (radars, contre-mesures, inertie, gestion du vol) doivent d'ailleurs être conçus eux-mêmes comme des systèmes, d'où le développement de "compétences systèmes" qui en résulte. À partir de ces compétences, certains équipementiers ont pu réaliser la modernisation de tout ou partie de l'avionique sur des cellules utilisées à l'étranger, françaises ou non (par exemple, la modernisation d'avions de combat indiens, par SAGEM ou la certification d'un avion de transport civil canadien par Thales).

En fin de période, l'importance des équipements et des systèmes avait donc été pleinement reconnue.

D'une génération à l'autre, l'évolution des systèmes a été extrêmement sensible. De ce point de vue, les systèmes du Rafale, comparés à ceux du Mirage 2000, montrent bien le chemin parcouru. Une comparaison analogue peut être faite à l'intérieur de la famille Airbus et de la famille Falcon.

(Après l'ensemble des monographies, qui vise à illustrer l'évolution des systèmes, mais qui, en même temps, est une présentation résumée d'un certain nombre de programmes – d'où sa longueur – on trouvera une conclusion générale de l'annexe C)

MONOGRAPHIES DE SYSTÈMES⁽⁶⁾

ARMÉE DE L'AIR ET EXPORT

- SYSTÈMES ANALOGIQUES

Mirage IV, Mirage III C, Mirage III E, Mirage F1C

- SYSTÈMES DE TRANSITION ANALOGIQUE-NUMÉRIQUE

Jaguar, Milan, Mirage F1EH, Mirage F1EQ, Mirage F1CR, Mirage IVP

- SYSTÈMES NUMÉRIQUES

Mirage 2000 DA, Mirage 2000 Export radar RDM, Mirage 2000 N, Mirage 2000 D, famille Mirage 2000-3, -5, -9, Mirage 2000-5, Rafale

AÉRONAUTIQUE NAVALE

Étendard IV M – Super Étendard

ATL 1 Atlantic – ATL 2 Atlantique

ARMÉE DE TERRE

Les hélicoptères Gazelle et Tigre

AVIONS CIVILS

Avions de transport civil Airbus, de l'A300 B2-B4 à l'A340

Avions d'affaires Falcon, du Falcon 10 au Falcon 2000.

(6) Sauf mention particulière, les monographies des avions de combat ont été rédigées par Daniel Lerouge.

ARMÉE DE L'AIR ET EXPORT

SYSTÈMES ANALOGIQUES

MIRAGE IV

MIRAGE III C

MIRAGE III E

MIRAGE F 1C

Le Mirage IV est placé en tête, car il constitue, pour la première fois en France, un véritable système d'armes.

Le Mirage III C, antérieur, n'entre pas vraiment dans cette catégorie, mais il est cependant mentionné en association avec son successeur, le Mirage III E, premier système d'armes multimiions.

MIRAGE IV

1. INTRODUCTION

Le Mirage IV est l'avion de bombardement nucléaire, essentiellement conçu comme vecteur de la bombe atomique nationale. Pour la première fois est défini un système d'armes global dans lequel sont associés l'avion, le système de navigation-bombardement et l'arme nucléaire (toute la partie spécifiquement "nucléaire" étant réalisée par le CEA).

Si la formule de l'avion lui-même n'a été définitivement arrêtée qu'en 1959 après l'étude de différentes variantes pour aboutir au Mirage IV A, la consistance de la mission est restée inchangée et cela a été d'une importance capitale pour la réussite de l'opération, qui devait être menée sans recours possible à une expérience antérieure.

L'ensemble du programme Mirage IV a bénéficié d'une très haute priorité gouvernementale, avec des impératifs de délais et de garantie de résultats tout à fait exceptionnels. L'organisation retenue a été, elle aussi, tout à fait exceptionnelle, avec une très forte concentration des responsabilités, tant au niveau étatique qu'au niveau industriel. En particulier, une très large maîtrise d'œuvre a été accordée à l'avionneur et, pour le Système de navigation bombardement (SNB), au Département électronique de la GAMD, devenu ensuite Électronique Marcel Dassault (EMD).

La mission, pratiquement unique du Mirage IV, est celle d'une capacité de bombardement par tous les temps, dans des délais extrêmement courts, sur des objectifs préalablement définis.

2. SYSTÈME DE NAVIGATION-BOMBARDEMENT (SNB)

Le système de navigation-bombardement (SNB) est l'un des composants essentiels du système d'armes Mirage IV. La fiche-programme de novembre 1956 prévoyait l'utilisation d'un viseur de bombardement radar + optique auquel auraient dû aboutir les études alors en cours du viseur Derveaux dans le cadre du projet SO 4060. Les difficultés rencontrées dans le développement de ce matériel conduisirent rapidement à son abandon, tandis que les caractéristiques de l'arme nucléaire permettaient de concevoir un système de navigation-bombardement entièrement différent.

Il s'agissait de délivrer de façon aussi discrète que possible une bombe nucléaire sur un but déterminé par ses seules coordonnées géographiques, avec une erreur circulaire à 90 % garantie quelle que soit la distance parcourue depuis le départ⁽⁷⁾.

(7) La « fiche programme », relative à l'avion de bombardement du 19 octobre 1959, fixe le rayon du cercle à 90 % de probabilité pour cinq conditions de largage :

$Z = 18\ 000\ m$, $M = 1,7$ recalage radar à 100 km du but : 2 000 m.

$Z = 18\ 000\ m$, $M = 1,7$ recalage radar à 50 km du but : 1 700 m.

$Z = 18\ 000\ m$, $M = 1,7$ recalage radar sur le but : 1 300 m.

$Z = 4\ 000\ m$, $V_c = 650\ kts$, recalage radar sur le but : 800 m.

$Z = 4\ 000\ m$, $V_c = 650\ kts$, recalage optique sur le but : 400 m.

Comme indiqué plus haut, la nouveauté de la notion même de système, les exigences de garantie globale et de délai conduisirent la DTI à confier à la GAMD la maîtrise d'œuvre de l'ensemble du système d'armes.

L'accomplissement de la mission exigeait deux fonctions essentielles :

- d'une part, la navigation, qui consistait, par l'intermédiaire du pilote automatique, à amener l'avion de son point de départ au voisinage immédiat de points précis : rendez-vous de ravitaillement en vol, point de largage ;
- d'autre part, le bombardement qui, au voisinage de l'objectif, devait déterminer automatiquement l'instant précis du largage de la bombe pour qu'au terme de son vol libre et selon sa balistique propre, déterminée par les seules conditions de largage, celle-ci explose au point fixé comme objectif (coordonnées géographiques et altitude au-dessus du sol).

Les éléments constitutifs du SNB sont :

- les capteurs d'information ;
- les organes de recalage ;
- les organes de calcul.

À cet ensemble, seul décrit dans ce qui suit, il faut associer le pilote automatique SFENA (voir pilotage automatique des avions), le synthétiseur et la bombe.

2.1. Les capteurs d'information

Des équipements de navigation à l'estime équipaient déjà les Vautour. Mais, basés sur l'utilisation de la vitesse-air et d'une référence directionnelle magnétique, ces matériels étaient loin de pouvoir répondre aux besoins de la mission assignée au Mirage IV. À l'opposé, les centrales inertielles auraient tout à fait convenu par leur précision et leur discrétion aux besoins fonctionnels du SNB.

Mais leur développement technologique et industriel, alors suffisant pour en autoriser l'emploi dans les sous-marins, ne devait permettre leur utilisation dans des conditions aéroportées qu'une bonne dizaine d'années plus tard (missile SSBS).

Au moment du choix en 1958, après que plusieurs missions d'information aux États Unis et en Grande-Bretagne aient permis de faire le point sur les matériels envisageables, le constructeur, les services officiels (STAé/AV, STAé/Éq et STTA) et l'armée de l'Air (BPM) décidèrent donc de s'orienter vers des solutions qui, tout en étant nouvelles, avaient déjà fait, en Angleterre notamment, l'objet d'expérimentations suffisantes pour garantir à l'horizon 1963 l'obtention opérationnelle des performances recherchées. Les capteurs retenus furent donc le radar doppler de navigation (Marconi), la centrale de cap et de verticale à deux gyroscopes à roulements activés (Sperry), constituant la référence de cap (après alignement initial par gyroscope de transfert), et la centrale aérodynamique (Kelvin-Hughes, produite en série par Jaeger).

2.2. Les organes de recalage

Les techniques numériques, aujourd'hui quasiment universelles, n'étant alors absolument pas envisageables (les premiers circuits intégrés ne sont apparus sur le marché qu'en 1963), toutes les informations ne pouvaient être élaborées et traitées que sous forme analogique et avec une précision qui atteignait très difficilement le 1/1 000.

Pour obtenir, dans ces conditions et après une croisière de plusieurs milliers de kilomètres, une navigation compatible avec la précision demandée pour le bombardement, il s'avérait indispensable :

- de découper le trajet total en tronçons plus courts en fixant un certain nombre de buts intermédiaires ;
- de procéder au recalage de la position estimée et, éventuellement, des informations de base, à partir d'une observation directe du sol en un certain nombre de repères caractéristiques et précisément localisés.

Organes de recalage :

- radar panoramique (CSF) ;
- hyposcope (COTELEC) ;
- sonde-radio altimétrique haute altitude (CSF).

Le radar panoramique d'observation du sol et, pour une précision encore meilleure lorsque les conditions de visibilité le permettaient, l'hyposcope, assuraient, par rapport à des repères connus, la mesure de l'écart entre position réelle et position estimée, et donc le recalage de cette dernière.

Afin de ne pas pénaliser la traînée aérodynamique de l'avion, le CSF réalisa une antenne plate sur mesure qui s'intégrait sous le fuselage dans la partie la plus large de celui-ci.

La sonde radio altimétrique assurait le recalage de l'altitude fournie par la centrale aérodynamique.

2.3. Les organes de calcul

Même si la plupart des équipements mentionnés avaient déjà fait l'objet d'expérimentations sous forme de prototypes, aucun, bien évidemment, n'avait été conçu pour être immédiatement connectable avec les autres au sein d'un système homogène et intégré tel que le SNB. Afin de respecter les très courts délais impartis, il était essentiel, d'une part, d'utiliser au maximum les résultats déjà acquis et donc de limiter les modifications à apporter aux équipements dans leur définition initiale comme au cours des essais ultérieurs du système et, d'autre part, de pouvoir mener en parallèle les essais complémentaires.

C'est pourquoi on prit le parti de limiter strictement chacun des équipements à son rôle spécifique et bien défini :

- de source d'information de base (doppler, référence de cap et centrale aérodynamique) ;
 - de moyen de recalage (radar panoramique, hyposcope et sonde altimétrique) ;
 - d'organes d'exécution (pilote automatique, synthétiseur, bombe) ;
- en reportant au niveau centralisé des organes de calcul toutes les adaptations d'interface physique ou fonctionnelle que pouvait exiger le SNB, tant au niveau de sa définition que dans sa mise au point ultérieure.

Pour pouvoir mieux faire face aux problèmes qui se sont posés en cours d'étude et dont les détails étaient loin d'être définis au début du programme, le département Électronique Dassault conserva la maîtrise des organes de calcul.

➤ Le calculateur central, relié à l'ensemble des autres équipements du SNB, jouait le rôle d'un véritable centre de distribution et d'échange des informations. On peut considérer qu'il

fut en cela l'ancêtre analogique des bus de transmission de données et des réseaux locaux qui se sont généralisés beaucoup plus tard avec le développement universel du numérique.

Regroupant à lui seul, sous un volume global d'environ 150 litres, 25 blocs électromécaniques d'asservissement, plus de 200 machines tournantes (moteurs, synchros, *resolvers*, potentiomètres) et 120 amplificateurs ou circuits électroniques, ce calculateur constitue certainement le calculateur analogique le plus puissant et le plus performant jamais embarqué sur un avion européen et soutient honorablement la comparaison avec celui, à peu près contemporain, du B 52 américain.

↳ Le calculateur de bombardement devait, quant à lui, déterminer en fonction des conditions de vol instantanées le point de chute de la bombe si elle était larguée à cet instant. À partir de cette information constamment remise à jour, le calculateur de navigation devait donner au pilote automatique les ordres conduisant ce point à coïncider avec le but et commander automatiquement le largage de la bombe lorsque cette coïncidence était réalisée, en fournissant le décompte des dix dernières secondes pour l'information de l'équipage.

3. CONCLUSION

En définitive, les objectifs du programme ont été tenus, tant du point de vue des délais que de la précision demandée. Pour mémoire, la commande des prototypes du Mirage IV A a été passée début 1959 et le premier vol de l'avion de série a eu lieu début 1964, de même que la recette du système complet sur le Mirage IV A 04.

Ce programme a permis à la société Dassault, mais aussi à l'ensemble de l'industrie française, de relever un véritable défi. De leur côté, les services officiels ont apporté leurs compétences et leurs moyens au programme, dans toutes les phases de l'opération qui a été conduite avec une rigueur exceptionnelle.

Le Mirage IV a ainsi constitué une étape déterminante dans la conception et la réalisation des systèmes aéroportés français, même si sa mission et les conditions de son lancement en font un cas unique, difficile à rapprocher des programmes qui ont suivi.

Une fiche plus complète sur le SNB Mirage IV et sa mise au point figure dans l'ouvrage COMAÉRO – Avions militaires.

Elle a été rédigée par Bernard Latreille et Georges Bousquet en s'appuyant sur des informations et documents de MM. Jean Cabrière et Charles Meyer.

MIRAGE III C

1. INTRODUCTION

Le Mirage III C est le premier avion de la classe Mach 2 construit en série en Europe. Il répond à une fiche-programme de l'armée de l'Air pour un intercepteur capable d'interdire la pénétration d'attaquants ennemis haute altitude.

2. MISSIONS OPÉRATIONNELLES

La mission principale est l'interception des cibles pénétrant à haute altitude de manière à interdire la destruction des installations sensibles – plus particulièrement celles qui participent à la défense. La première détection est assurée par des radars et des installations de guidage au sol, les ordres étant transmis aux intercepteurs par phonie ou transmission de données (téléaffichage).

Les missions secondaires sont la supériorité aérienne et l'attaque air-sol manuelle avec bombes freinées, roquettes et canon 30 mm.

3. FONCTIONS OPÉRATIONNELLES

- Conduite de tir de missile air-air MATRA R 530 : il s'agit d'un missile comportant deux versions complémentaires d'autodirecteur : électromagnétique semi-actif et infrarouge.
- Conduite de tir canon air-air à vue avec télémétrie radar.
- Conduite de tir canon air-sol à vue avec télémétrie radar.
- Conduite de tir roquettes air-sol.
- Conduite de tir de bombes freinées.

4. FONCTIONS TECHNIQUES

Les principales fonctions techniques pour assurer les fonctions opérationnelles ci-dessus sont :

- détection par radar des cibles aériennes, accrochage automatique sur pré-désignation, poursuite et éclairage de la cible pour permettre l'accrochage de l'autodirecteur du missile et le guidage jusqu'à l'impact ;
- visée "tête haute" pour les conduites de tir "à vue" ;
- communications phonie et transmission de données sol-air ;
- harmonisation électronique radar et missiles.

5. ARCHITECTURE MATÉRIELLE

Le Mirage III C est équipé d'un ensemble d'équipements intégré pour la partie qui concerne la conduite de tir air-air : la responsabilité de cette fonction opérationnelle avait été confiée à CSF en coopération avec MATRA et Dassault. Le viseur constitue une première approche du pilotage en "tête haute". Les paramètres aérodynamiques sont élaborés dans une centrale aérodynamique, la première conçue et réalisée en France par Crouzet.

6. TECHNOLOGIES – PRINCIPAUX ÉQUIPEMENTS

Tous les équipements du Mirage III C sont analogiques et font encore appel pour beaucoup de fonctions à des tubes “subminiatures” : radar, communications, amortisseurs. Les transistors sont encore au germanium, ce qui pose quelques problèmes de refroidissement pour cet avion Mach 2. Les liaisons sont du type *selsyns*, par *resolvers* ou par potentiomètres de précision.

- Radar : Cyrano I bis de CSF.
- Coffret d’harmonisation et missile : MATRA 530.
- Centrale gyroscopique et indicateur sphérique BEZU.
- Centrale aérodynamique : Crouzet Type 20.
- Viseur : électro-optique CSF type 95.
- Téléaffichage (prototype) : Sintra.

7. MOYENS DE DÉVELOPPEMENT

Avions de servitude pour le radar et le missile au CEV. Pas de banc d’intégration pour ce système.

8. MOYENS DE MISE EN ŒUVRE ET DE MAINTENANCE

Le système du Mirage III C n’a pas bénéficié d’études approfondies de maintenabilité : l’essentiel s’effectuait par débranchement des liaisons opérationnelles, substitution de boîtiers de tests et échanges a priori d’équipements.

9. PLACE DU SYSTÈME AÉROPORTÉ DANS LE SYSTÈME D’ARMES GLOBAL

Le Mirage III C est le premier exemple en France d’un ensemble intégré des moyens aériens et des moyens de détection et de guidage au sol.

MIRAGE III E

1. INTRODUCTION

Le Mirage III E est la version multimitation du Mirage III. Il est destiné à l'équipement de l'armée de l'Air pour les missions d'interception et d'attaque air-sol avec pénétration à basse altitude par tout temps.

Sa date de conception (1962) lui permet de profiter des techniques en cours de développement pour le Mirage IV ainsi que des progrès technologiques apportés par l'emploi des transistors au silicium. Il est le premier système français polyvalent bénéficiant des méthodes d'approche-système. Son principal concurrent était le F104 G qui a équipé les armées de l'air d'Allemagne, de Belgique et de Hollande.

2. MISSIONS OPÉRATIONNELLES

Les missions air-air sont celles du Mirage III C. Les missions air-sol conventionnelles sont les mêmes que celles du Mirage III C mais sont précédées d'une navigation en aveugle à basse altitude. Un calculateur de bombardement conventionnel avait été envisagé mais n'a jamais été installé. L'avion devait être capable de l'emport d'une bombe nucléaire tactique OTAN.

3. FONCTIONS OPÉRATIONNELLES

Air-air : voir Mirage III C.

Air-sol : pénétration aveugle à basse altitude (500 pieds), au-dessus de la hauteur maximum des crêtes pour le tronçon de navigation considéré, soit en évitant les obstacles en pilotage manuel, soit en ligne droite en pilotant la pente du vecteur vitesse pour passer au-dessus des crêtes à la hauteur minimum sélectionnée.

Conduites de tir sommaires comme sur Mirage III C à vue.

4. FONCTIONS TECHNIQUES

Par rapport au Mirage III C, les fonctions nouvelles sont :

- navigation autonome avec présentation sur indicateur combiné type PHI avec sélection de buts pré-enregistrés ;
- recalage manuel de la navigation ;
- fonctions "découpe iso-altitude" et "découpe vecteur-vitesse" du radar, avec présentation sur indicateur tête basse : radioaltimétrie 0-2500 ou 0-5000 ft ; mise en œuvre de l'armement spécial ; compte-rendu de mission par appareil photographique.

5. ARCHITECTURE MATÉRIELLE

L'architecture matérielle a été choisie pour réduire au maximum les masses et les coûts d'installation et en optimisant la charge de travail du pilote. Les caractéristiques essentielles de cette architecture sont les suivantes.

- ↳ Centralisation des tensions de référence 26 volts utilisées pour les calculs et les échanges d'informations.
- ↳ Groupement des organes de transmission des informations dans deux boîtiers de recopie des informations d'attitude et des informations aérodynamiques : par ce moyen, les organes capteurs et élaboration primaire d'information préservent leur précision et ne sont pas modifiés par des évolutions ultérieures des fonctions techniques.
- ↳ Standardisation des principales caractéristiques des équipements : normes applicables, conditions d'environnement, procédures et réalisation des échanges, câblages, conditions de réception, etc. Cette démarche s'est concrétisée par la rédaction d'un document de référence "spécifications générales applicables aux équipements électroniques". Cette approche réalisée en coopération entre l'avionneur et les principaux coopérateurs a été appliquée par la suite sur tous les systèmes d'armes des avions Dassault.
- ↳ Centralisation des commandes du système par une approche mission sur un nombre limité de postes de commande, à commencer par le manche et la manette de gaz pour les commandes dites "temps réel". Les postes de commande centralisés principaux sont le poste de commande de navigation et le poste de commande d'armement.
- ↳ Le viseur est de plus en plus utilisé pour permettre toutes les phases de mission "à vue" en "tête haute".

C'est pour le développement du système d'armes du Mirage III E qu'a été inaugurée une coopération industrielle originale : la coordination générale du développement du système d'armes sous la conduite de l'avionneur et avec la participation des industriels chargés de la conception des principaux équipements : radar, centrale aérodynamique, centrale gyroscopique, missiles, viseur, capteur et calculateur de navigation, etc. Cette coordination était chargée de traiter les problèmes de définition, conception, développement liés à l'intégration des différents éléments pour répondre aux objectifs fixés par la fiche-programme et aux clauses techniques de l'avion. Cette coordination concernait aussi bien les matériels commandés par l'État que ceux commandés par l'avionneur. Elle rendait compte de ses travaux aux représentants de l'État, maître d'ouvrage, qui constituaient eux-mêmes une équipe de conduite de programme menée par l'Ingénieur du STAé section Avions.

Cette méthode de coopération a par la suite été appliquée à tous les programmes d'avions Dassault suivants en étant l'objet d'extensions successives à tous les types d'équipements et à toutes les phases de conception et de production.

6. TECHNOLOGIE – PRINCIPAUX ÉQUIPEMENTS

Par rapport au Mirage III C, on constate la quasi-disparition des tubes subminiatures sauf pour les communications radio, IFF, etc. Les transistors au silicium remplacent les transistors au germanium. Les organes de transmission (*selsyns*, *resolvers*, potentiomètres) et d'asservissement (moteurs, génératrices) sont de taille plus réduite : on passe progressivement de la taille 15 à la taille 8 selon les performances demandées.

- ↳ Radar : Cyrano II A (antenne Cassegrain stabilisée) presque entièrement transistorisé, commandes des fonctions par un manche radar.

- ↳ Viseur TH-CSF type 97.
- ↳ Centrale aérodynamique et boîte de recopie associée : Crouzet type 22.
- ↳ Centrale gyroskopique et boîte de recopie associée : BEZU SFIM CCV 180.
- ↳ Indicateur sphérique BEZU SFIM.
- ↳ Radar doppler de navigation : CSF licence Marconi. Il s'agit du même matériel de base que celui du Mirage IV dont l'antenne était installée sous le poste de pilotage ; cette antenne comportait quatre faisceaux et était asservie sur le vecteur vitesse. Le radar fournit la vitesse sol et la dérive au calculateur de navigation. Précision : 0,7 % de la vitesse, 0,1° pour la dérive.

Remarque : dans un premier temps, il avait été envisagé d'équiper le Mirage III E d'une centrale à inertie dont le développement commençait à donner des résultats aux États-Unis : une mission mixte État-industriels s'était rendue en juin 1960 aux États-Unis pour étudier l'avancement technique de ces matériels. Les sociétés Litton, Librascope, Honeywell, Kearfott avaient été visitées.

Cette enquête a montré que les performances des centrales à inertie, sans couplage avec un radar doppler, étaient insuffisantes et que leur volume et leur masse étaient prohibitifs pour le Mirage III E. Seule la centrale Litton LTN3 pouvait donner satisfaction (avec une performance de 2 NM/heure) mais son état de développement était insuffisant : elle a été retenue pour équiper les F 104 G mais les performances de précision et de fiabilité ont été catastrophiques pendant les premières années d'utilisation opérationnelle.

↳ Calculateur de navigation Marconi-CSF : ce calculateur a été étudié par Marconi spécialement pour le Mirage III E car les équipements du Mirage IV ne pouvaient pas convenir pour un avion monoplace. Ce calculateur – original par la nature de ses intégrateurs et organes de calcul – définissait les buts programmés par des languettes perforées à lecture optique avec un sélecteur rotatif et présentait les données de navigation sur un indicateur avec rose de cap, index de route et distance au but.

7. MOYENS DE DÉVELOPPEMENT

- ↳ Avion de servitude pour le radar et le système de navigation.
- ↳ Banc d'intégration (installé à Villaroche) : c'est le premier système d'armes développé en coordination qui a utilisé ce moyen très efficace de mise au point, bien qu'il ait été réduit à cette époque à un banc de câblages avec possibilité de "piquages" de mesure.
- ↳ Banc d'intégration des systèmes de série installé à Mérignac près de la chaîne de sortie des avions.

8. MOYENS DE MISE EN ŒUVRE ET DE MAINTENANCE

Moyens classiques de "valises" de test par "interposition".

9. PLACE DU SYSTÈME AÉROPORTÉ DANS LE SYSTÈME D'ARMES GLOBAL

Voir Mirage III C.

10. VERSIONS EXPORT

Le Mirage III E pour l'Australie a été développé en même temps que le Mirage III E. Au niveau du système, certains équipements sont différents :

- radar (doppler Canadian Marconi) ;
- calculateur de navigation (PHI de Canadian Devices of Canada) ;
- radioaltimètre (Bendix au lieu de CSF).

Le Mirage III S a été équipé d'un système très semblable dans son principe à celui du Mirage III E, mais avec des équipements américains tous différents des matériels français et surtout spécialement développés pour cet avion : il en est résulté des frais de développement et de mise au point très élevés mais une réussite technique indiscutable qui a validé les méthodes françaises. Il en est aussi résulté, malheureusement pour Dassault, une réduction de 116 à 57 exemplaires de série !

Mirage III R. La version Reconnaissance du Mirage III a été conçue à la même époque. Les appareils photographiques (OMERA) étaient installés dans le nez. Le système de navigation était entièrement "à l'estime" sans radar doppler : le calculateur de navigation type 51 a été réalisé par Crouzet. Centrale aérodynamique Crouzet type 21.

Malgré les défauts du système de navigation, le Mirage III R a remporté beaucoup de succès dans les concours OTAN de reconnaissance.

MIRAGE F1 C

1. INTRODUCTION

Le Mirage F1 C est le successeur du Mirage III C dans la mission d'interception. Sur une cellule et une motorisation entièrement différentes a été installé un système d'armes embarqué modernisé, mais dans une période de transition où les nouvelles technologies numériques, tant pour les fonctions de calcul que pour les hyperfréquences, ne sont pas encore disponibles en France.

2. MISSIONS OPÉRATIONNELLES

Voir Mirage III C.

3. FONCTIONS OPÉRATIONNELLES

- ⊃ Conduite de tir de missile air-air à autodirecteur semi-actif MATRA Super 530 F et du missile de combat infrarouge Magic.
- ⊃ Conduite de tir canon air-air à vue avec télémétrie radar.
- ⊃ Conduite de tir canon air-sol à vue avec télémétrie radar.
- ⊃ Conduite de tir de roquettes air-sol.
- ⊃ Conduite de tir de bombes freinées.

4. FONCTIONS TECHNIQUES

Les principales fonctions techniques pour assurer les fonctions opérationnelles ci-dessus sont :

- détection par radar des cibles aériennes, accrochage automatique sur prédésignation manuelle ou par téléaffichage de la station STRIDA, poursuite et éclairage de la cible pour permettre l'accrochage de l'autodirecteur du missile et le guidage jusqu'à l'impact ;
- conduite de tir pour missile de combat rapproché à autodirecteur infrarouge Magic ;
- visée et guidage en "tête haute" pour toutes les conduites de tir ;
- communications phonie et transmission de données sol-air ;
- harmonisation électronique radar et missile.

5. ARCHITECTURE MATÉRIELLE

Le système du Mirage F1 C est entièrement analogique et son architecture est semblable à celle du Mirage III E.

6. TECHNOLOGIES – PRINCIPAUX ÉQUIPEMENTS

- ⊃ Radar Cyrano IV. Ce radar, dérivé du Cyrano II, est entièrement nouveau : l'antenne est de type Cassegrain inversé pour obtenir le diamètre le plus grand possible dans le nez très

effilé (angle au sommet de 20°) de l'avion. L'antenne, très légère, permet des performances de balayage et de poursuite très améliorées par rapport aux radars précédents.

- ↳ Collimateur tête haute couleur Thomson-CSF 196 avant de passer à la technologie tube cathodique (qui ne pouvait alors être que monochrome, telle que développée en Grande-Bretagne par Smiths et Elliott), une tentative avait été faite d'améliorer les collimateurs optiques.
- ↳ Centrale gyroscopique et indicateur sphérique SFIM.
- ↳ Centrale aérodynamique Crouzet, type 60 à capteurs de pression modulaire.
- ↳ Communications : après pas mal de retard, une nouvelle technologie de postes radio a été développée pour le Jaguar et le Mirage F1 (TRT).

7. MOYENS DE MAINTENANCE

Sur demande de l'armée de l'Air, pour faire face aux difficultés de recrutement de personnel spécialisé en électronique, un moyen de dépannage automatique de piste a été développé : le SDAP (système de dépannage automatique de piste) réalisé par MATRA et ESD sous la maîtrise d'œuvre de Dassault. Ce moyen devait permettre la vérification du fonctionnement du système et la désignation de l'URP (unité remplaçable en piste) à changer. Le développement de ce système a été très difficile et long, mais a fini par être réalisé complètement puis amélioré dans des versions d'exportation. Cet exercice, non satisfaisant par le volume et le poids du matériel final, a "éveillé" tous les coopérants pour approcher convenablement les problèmes de maintenabilité et de maintenance des matériels électroniques.

Les difficultés d'application provenaient de la nature analogique des matériels. La numérisation permettra le développement des tests intégrés et fera faire sur les avions suivants des progrès considérables.

8. PLACE DU SYSTÈME AÉROPORTÉ DANS LE SYSTÈME D'ARMES GLOBAL

C'est sur cet avion qu'a pu être réalisée la mise en œuvre complète des conduites d'interception avec Strida.

ARMÉE DE L'AIR ET EXPORT

SYSTÈMES DE TRANSITION ANALOGIQUE-NUMÉRIQUE

JAGUAR

MILAN⁸

(SUPER ÉTENDARD)⁹

MIRAGE F1-EH

MIRAGE F1-EQ

MIRAGE F1-CR

MIRAGE IV P

(8) Le Milan, bien que resté au stade expérimental, est cité en raison de son importance dans le processus d'évolution des systèmes;

(9) Le Super Étendard entre bien dans cette catégorie, mais il est décrit dans la rubrique "aéronautique navale".

JAGUAR⁽¹⁰⁾

1. INTRODUCTION

Le programme franco-britannique Jaguar est né de la convergence de deux programmes nationaux :

- du côté français : ECAT (avion-école de combat et d'appui tactique, qui avait abouti au choix du projet Breguet 121 en 1964) ;
- du côté britannique : avion-école supersonique (projet BAC P45).

Si la définition des cellules et des équipements fonctionnels fut, à quelques exceptions près, la même pour les deux pays, il y eut, hélas, divorce total pour les systèmes d'armes. En conséquence, ils furent traités sur un plan purement national, tant du point de vue des équipements (classés B) que des essais d'intégration au sol et en vol.

Nous nous limiterons dans ce qui suit au cas du système d'armes de la version A.

2. GÉNÉRALITÉS SUR LE SYSTÈME D'ARMES

Le Jaguar A est un avion monoplace d'appui tactique, réalisé dans un souci d'économie et de rusticité, mais avec des capacités d'emport d'armements très importantes. La ligne directrice choisie par les services officiels français était d'utiliser les technologies éprouvées en France en 1965, pour éviter toute dépense importante de développement de nouveaux équipements. En particulier, pas de radar de pointe avant, pas de centrale à inertie.

Cela conduisait à exclure les missions à basse altitude de nuit et par mauvaise visibilité de jour et ne permettait qu'une précision limitée des armes. Une des missions principales était le tir du missile MARTEL, développé lui aussi en coopération franco-britannique.

Tardivement dans le programme intervint la modification majeure de l'introduction de l'armement guidé laser (AGL), qui lui donna des possibilités d'attaques de précision par engins et bombes guidés.

3. LE SYSTÈME DE NAVIGATION ET D'ATTAQUE

La navigation autonome était assurée par un ensemble constitué :

- d'une centrale de cap et de verticale SFIM 2501 ,
- d'une centrale aérodynamique ELDIA type 12 Jaeger ;
- d'un radar doppler EMD RDN 72 ;
- d'un calculateur Crouzet type 91.

Ce calculateur représente, en 1968, le premier cas d'application de calculateur numérique à bord d'un avion militaire français. À ce titre, le Jaguar peut être considéré, dans une certaine mesure, comme un appareil de transition.

(10) Monographie rédigée à partir d'éléments fournis par Marcel Berjon, ancien directeur technique des Avions Breguet.

La conduite de tir (avant la modification AGL) comportait essentiellement :

- un viseur Thomson-CSF type 121 et ses accessoires ;
- un calculateur de portée Thomson-CSF 32, qui détermine la portée du projectile à partir des paramètres avion et de la distance initiale obtenue soit par télémétrie laser, soit par passage au-dessus d'un point connu ;
- un télémètre laser (pour les derniers avions) ;
- un radio-altimètre ;
- un coffret de servitude Martel.

L'avion était en outre équipé :

- de moyens de communications (V/UHF, UHF secours et IFF mode 4) ;
- de systèmes de contre-mesures électroniques (détecteur passif, pod lance-leurres anti-radar PHIMAT et pod de contre-mesures actives Barracuda, BARAX) et ultérieurement de lance-leurres infrarouges ;
- de moyens photographiques (caméra à balayage latéral dans la pointe avant, complétée par un bidon photo réalisé par l'armée de l'Air) ;
- d'un pilote automatique simplifié, installé en modification, pour permettre au pilote de lâcher le manche en vol à basse altitude.

4. ARMEMENTS

Comme on l'a déjà dit, les capacités en armement étaient particulièrement importantes.

En interne, deux canons DEFA type 553 de 30 mm, dont les goulottes, très sophistiquées, longuement mises au point, ont permis de ne pas avoir d'effet du tir sur le fonctionnement des moteurs. En externe, cinq points d'emport pour pylônes et adaptateurs et plus de 300 configurations validées (en tenant compte des configurations avec bidons largables). Le Jaguar était considéré dans l'armée de l'Air comme un véritable "camion à bombes".

Tous les types de bombes françaises et OTAN de masse inférieure ou égale à 1 000 kg ; bombes antipistes BAP 100 et antipersonnel BAT 120 (adaptateur sous pylône fuselage capable de 18 bombes).

- ↳ Roquettes : tir simultané possible de 4x36 roquettes de 68 mm.
- ↳ Missiles air-air Magic 2 : adaptateurs sous pylônes externes.
- ↳ Missile air-sol antiradar Martel : sous pylône fuselage (mission de base).
- ↳ Arme nucléaire tactique AN52 : sous pylône spécial du fuselage (essai réussi à Mururoa).

5. LE SYSTÈME ARMEMENT GUIDÉ LASER (AGL)

C'est la modification majeure du système d'armes Jaguar. Le Jaguar a servi d'avion de servitude pour le développement et la mise au point du système par Thomson-CSF et les services officiels.

Bien que s'appuyant au départ sur des réalisations américaines (Martin-Marietta), le système a fait l'objet d'un développement original par l'industrie française pour l'adapter au cas d'un avion monoplace.

Système éclaireur-tireur ATLAS (autopointeur télévision laser d'illumination du sol)

- ↳ Une nacelle ATLAS avec caméra et éclaireur laser, montée sous le pylône standard de fuselage.
- ↳ Un boîtier d'adaptation.
- ↳ Un boîtier de commande.
- ↳ Une poignée de commande de la caméra.
- ↳ Un moniteur de télévision sur la planche de bord (acquisition et verrouillage de l'objectif).
- ↳ Un magnétoscope.
- ↳ L'ensemble est relié au système de conduite de tir de base de l'avion.

Système tireur ELIAS (écartomètre laser pour illumination aéroportée ou au sol)

Ce système comporte un pylône spécial de fuselage adapté avec une partie avant portant les équipements ELIAS (détecteur passif de la tache laser sur l'objectif désigné par l'avion éclaireur ou par les unités au sol) reliés au viseur, ce qui permet d'avoir un réservoir largable sous le fuselage.

Les Jaguar A 131 à A 160 ont eu la modification complète. Les Jaguar A 81 à A 130 ont reçu seulement la capacité ELIAS.

Armes du système AGL

Missiles AS30 L ou bombes guidées laser de 1 000 kg, 400 kg et US GBUI12 de 250 kg, aux points internes de l'aile.

MILAN

1. INTRODUCTION

Le Milan est un avion expérimental réalisé à partir d'un Mirage III dont le nez a été modifié pour recevoir un petit empennage canard fixe surnommé "moustaches" rétractable permettant de réduire considérablement les vitesses d'approche sur cet avion à aile Delta. Cet avion était proposé à la Suisse qui recherchait un avion d'attaque conventionnelle au sol de haute performance. Dans un premier temps, il a été présenté (en 1972) au concours avec un système de navigation et de bombardement très proche de celui du Jaguar. Il était confronté à l'avion américain A 7 qui était équipé d'un système très performant à base de centrale à inertie, calculateur numérique, *Head up Display*.

Le radar doppler du Milan fonctionnait mal au-dessus des nombreux lacs rencontrés en Suisse et le calculateur de bombardement n'avait pas les fonctions adaptées au tir de bombes lisses à grande distance : le concours a été annulé mais Marcel Dassault a brutalement pris conscience du retard considérable pris par la France dans le domaine des systèmes d'armes d'attaque air-sol conventionnelle. Il a alors décidé de transformer cet avion en banc d'essais de nouveaux systèmes modernes.

2. MILAN 1

La première phase, compte tenu du délai de disponibilité d'une centrale à inertie, a consisté essentiellement en l'installation d'un calculateur numérique universel Dassault Électronique (ESD à l'époque) dans lequel ont été mis au point les calculs de couplage doppler-inertie (entre un doppler ESD RDN 72 et une centrale gyroscopique équipée d'accéléromètres SFIM) ainsi que les nouveaux calculs de bombardement pour bombes lisses selon les modes CCPL : calcul continu du point de largage (en piqué-ressource) et CCPI : calcul continu du point d'impact (en vol horizontal à très basse altitude et passage au-dessus de l'objectif). La distance air-sol était fournie par un télémètre laser Thomson (au lieu du laser CGE du Jaguar dans la première phase). Dans un délai très réduit (inférieur à neuf mois), la démonstration a été faite qu'il était possible d'atteindre des précisions de tir sur l'objectif de l'ordre de 0,5 % de la distance (CEP).

3. MILAN 2

La technologie utilisée dans le Milan 1 n'était pas transposable sur un avion opérationnel et certaines fonctions nouvelles ne pouvaient pas être démontrées, en particulier l'utilisation d'un collimateur "tête haute" et des commandes temps réel sur manche et manette des gaz. C'est pourquoi un nouveau chantier a été réalisé sur cet avion pour installer des matériels mis gratuitement à notre disposition par deux partenaires étrangers : Litton et Elliott.

La centrale à inertie LTN 72 à gyros flottants de la classe 1 NM/heure était dotée d'un calculateur numérique très performant qui a permis, en plus de la navigation, la réalisation de tous les calculs nécessaires au bombardement.

Le collimateur tête haute à tube cathodique était doté de toute la symbologie nouvelle permise par les générateurs de symboles numériques et mise au point depuis plusieurs années par les Britanniques : pilotage, navigation, attaque air-air et air-sol, approche, etc. De plus, ce collimateur avait une fonction air-air toute nouvelle pour le tir canon air-air : le CCLT (calcul continu de la ligne de traceurs), qui permettait des tirs “à la volée” au lieu des systèmes antérieurs qui nécessitaient une poursuite de la cible.

L’avion a même été équipé ensuite d’un petit radar AIDA 2 d’ESD, ce qui a permis au total de réaliser un ensemble très compact, entièrement numérisé et de très haute performance.

4. IMPORTANCE DU PROGRAMME MILAN

Le programme Milan, qui n’aura au total duré qu’un peu plus de deux années, a été considérable pour l’évolution des technologies des systèmes d’armes en France.

La première retombée est le Super Étendard et le lancement d’une filière de centrales à inertie numériques en France. Il en est de même pour la technologie des collimateurs à tube cathodique qui en était à ses débuts dans notre pays.

Le programme Milan a permis d’aborder sur des exemples très concrets tout le savoir-faire lié à l’utilisation de calculateurs numériques embarqués et donc le logiciel temps réel embarqué, depuis la spécification jusqu’à la validation au banc et en vol. Les échanges numériques point à point Arinc et autres ont également été mis en œuvre. À partir de cette expérimentation, tous les avions de chasse ont été équipés des moyens d’attaque air-sol et canon air-air mis au point sur le Milan.

Les industriels équipementiers français et les services de l’État ont compris tout l’enjeu qui leur était imposé pour rester dans la course de la conception et de la production de systèmes modernes indispensables pour la Défense française et la compétition à l’exportation.

MIRAGE F1 EH

1. INTRODUCTION

Cet avion, destiné au Maroc, reprend les fonctions air-air développées pour le Mirage F1 C, mais lui adjoint des fonctions air-sol mises au point sur le Milan et les équipements inertie et HUD français du Super Étendard. Il est développé simultanément avec le Mirage F1 EQ (voir fiche spécifique).

2. MISSIONS OPÉRATIONNELLES

En plus de celles du Mirage F1 C : attaque air-sol de haute précision avec bombes conventionnelles lisses et freinées.

3. FONCTIONS OPÉRATIONNELLES

En plus de celles du Mirage F1 C : conduite de tir air-sol type CCPL (calcul continu du point de largage) et CCPI (calcul continu du point d'impact).

4. FONCTIONS TECHNIQUES

- ⊃ Navigation inertielle.
- ⊃ Télémétrie air-sol fournie par le radar pour les calculs de bombardement.
- ⊃ Pilotage et navigation en tête haute pour la plupart des phases de vol.

5. ARCHITECTURE MATÉRIELLE ET LOGICIELLE

Sur le Mirage F1 EH est installé, pour les fonctions nouvelles, un digibus (transmission de données numériques multiplexées) qui a été expérimenté sur le banc SDECIAA (système de développement d'échanges et de calculs d'informations analogiques et arithmétiques). Un calculateur numérique universel préfigure les calculateurs centraux des systèmes suivants : il pilote toutes les phases des fonctions opérationnelles, organise les échanges d'informations, effectue les calculs de bombardement et transmet les données vers le générateur de symboles et les boîtiers de largage d'armement. À ce stade, les logiciels sont écrits en assembleur.

Un collimateur tête haute permet l'intégration la plus efficace de l'interface homme-système pour cet avion qui réalise une polyvalence plus grande encore que le Mirage III E.

6. TECHNOLOGIE – PRINCIPAUX ÉQUIPEMENTS

- ⊃ Radar : Thomson-CSF Cyrano IV.
- ⊃ Centrale à inertie : Sagem sous licence Kearfott.

- ↳ Calculateur universel : ESD M 182 processeur AMD.
- ↳ Collimateur tête haute : Thomson-CSF VE 120.
- ↳ Centrale aérodynamique Crouzet type 67.

7. MOYENS DE DÉVELOPPEMENT

Le développement a été effectué sur un avion avancé dans le délai très court de vingt-quatre mois (entre la commande et la réception du 1er avion de série). La stimulation a été utilisée pour la mise au point des logiciels sur le banc au sol : cette méthode a ensuite été généralisée pour tous les développements des systèmes suivants chez Dassault.

8. MOYENS DE MAINTENANCE

Une version de SDAP a été développée pour cet avion.

MIRAGE F1 EQ

1. INTRODUCTION

Les avions Mirage F1 EQ sont des avions destinés à l'Irak. Ils ont été réalisés en de nombreuses versions (du Mirage F1 EQ1 jusqu'au F1 EQ 6) qui ont permis de développer de nombreux matériels électroniques et armements. Les équipes françaises d'avionique et de systèmes ont pu ainsi "roder" des nouvelles technologies et des méthodes de développement de logiciel qui ont été très utiles par la suite pour les programmes nationaux qui étaient trop rares à cette époque pour maintenir et faire progresser le savoir-faire.

2. MISSIONS OPÉRATIONNELLES

Les missions opérationnelles listées ci-dessous n'ont pas été disponibles dès les premières versions du Mirage F1 EQ, ni même toutes incluses dans une seule version.

- ⊃ Interception des cibles pénétrant à haute et moyenne altitude par tout temps.
- ⊃ Supériorité aérienne.
- ⊃ Attaque air-sol de haute précision avec bombes lisses et freinées, canons et roquettes.
- ⊃ Attaque air-mer avec missile type AM 39.
- ⊃ Attaque air-sol avec armement guidé laser.
- ⊃ Reconnaissance photographique à très haute altitude.
- ⊃ Reconnaissance aveugle avec radar spécialisé.
- ⊃ Guerre électronique passive et active.

3. FONCTIONS OPÉRATIONNELLES

- ⊃ Conduite de tir missile air-air à autoguidé semi-actif MATRA Super 530 F.
- ⊃ Conduite de tir pour missile de combat Magic 1.
- ⊃ Conduite de tir canon air-air.
- ⊃ Conduite de tir canons et roquettes air-sol.
- ⊃ Conduite de tir de bombes type CCPL pour bombes lisses et CCPI pour bombes freinées.
- ⊃ Conduite de tir missile air-mer.
- ⊃ Mise en œuvre et conduite de tir pour armement guidé laser AS 30 L et bombes à autoguidé laser.

4. FONCTIONS TECHNIQUES

- ⊃ Détection par radar des cibles aériennes, accrochage automatique sur prédésignation manuelle, poursuite et éclairage de la cible pour accrochage de l'autoguidé du missile semi-actif, calculs de guidage de l'avion et de domaine de tir.
- ⊃ Interrogation IFF (sur certaines versions).
- ⊃ Calculs de conduite de tir et de domaine pour missile Magic.
- ⊃ Navigation autonome par doppler inertie.

- ⤷ Mise en œuvre et adaptation du pod de guidage laser comprenant un ensemble de recherche et de poursuite à base de télévision et un laser d'éclairage de la cible, présentation des images sur un indicateur tête basse TV utilisé aussi pour la présentation des images du radar (monochrome).
- ⤷ Conduite de tir des armements laser (AS 30 L et BGL).
- ⤷ Mise en œuvre du pod de reconnaissance photographique haute altitude TRT Harold et du pod de reconnaissance par radar à antennes latérales Thomson Rafael.
- ⤷ Pilotage et navigation en tête haute pour la plupart des phases de vol et d'attaque.

5. ARCHITECTURE MATÉRIELLE ET LOGICIELLE

Voir la fiche du Mirage F1 EH. Les calculs de couplage doppler-inertie et de navigation sont effectués dans le calculateur universel central M 182.

6. TECHNOLOGIE – PRINCIPAUX ÉQUIPEMENTS

- ⤷ Radar Cyrano IV : avec fonction air-mer et interrogation IFF.
- ⤷ Centrale gyroscopique SFIM type (gyros à paliers activés).
- ⤷ Calculateur numérique universel ESD M 182.
- ⤷ Collimateur tête haute Thomson VE 120.
- ⤷ Centrale aérodynamique Crouzet type 67.
- ⤷ Indicateur TV tête basse Thomson monochrome.

7. MOYENS DE DÉVELOPPEMENT ET MAINTENANCE

Voir Mirage F1 EH.

MIRAGE F1 CR

1. INTRODUCTION

Le Mirage F1 CR a été développé pour doter l'armée de l'Air d'un avion de reconnaissance en remplacement des Mirage III R. Il a bénéficié des développements d'équipements et de systèmes effectués pour le Super Étendard et les Mirage F1 d'exportation.

2. MISSIONS OPÉRATIONNELLES

- ↳ Mission principale de reconnaissance photographique visible et infrarouge.
- ↳ Mission de reconnaissance électronique.
- ↳ Mission de reconnaissance radar tout temps.
- ↳ Mission secondaire d'attaque air-sol avec bombes classiques.
- ↳ Mission secondaire air-air avec missiles Magic 2 et canon (un seul canon interne).

3. FONCTIONS OPÉRATIONNELLES

- ↳ Navigation autonome par système inertielle.
- ↳ Mise en œuvre des capteurs de reconnaissance photographiques (visible et IR, capteurs internes à la place d'un canon et externes, en pod central fuselage), radar à antennes latérales, enregistrements correspondants.
- ↳ Mise en œuvre des moyens de reconnaissance électronique (détection des émissions électromagnétiques).
- ↳ Conduite de tir canon air-air en mode CCLT (calcul continu de la ligne de traceurs).
- ↳ Conduite de tir des missiles d'autodéfense à autodirecteur infrarouge.

4. FONCTIONS TECHNIQUES

- ↳ Détection des cibles aériennes : voir Mirage F1 C.
- ↳ Navigation inertielle autonome, présentation des informations en collimateur tête haute et sur indicateur de navigation (IDN Crouzet).
- ↳ Conduite de tir canon air-air CCLT.
- ↳ Conduite de tir des missiles air-air Magic 2.
- ↳ Conduite de tir des bombes en modes CCPL et CCPI (téléométrie air-sol fournie par le radar).
- ↳ Pilotage et navigation en tête haute pour la plupart des phases de vol.
- ↳ Ensemble des calculs, commandes et liaisons avec les conteneurs externes de reconnaissance : pod photo (OMERA), reconnaissance radar EMI et Thomson-CSF Rafael, reconnaissance électronique Astac ainsi qu'avec l'analyseur infrarouge SAT Super Cyclope installé en interne à l'avion à la place d'un canon.

5. ARCHITECTURE MATÉRIELLE

Voir Mirage F1 EH et Mirage F1 EQ.

6. TECHNOLOGIE – PRINCIPAUX ÉQUIPEMENTS

- ↳ Calculateur principal : EMD M 182 pilotant le Digibus type GINA.
- ↳ Centrale à inertie : Sagem ULISS 47.
- ↳ Collimateur tête haute : Thomson-CSF VE 120.
- ↳ Visualisation tête basse TV.
- ↳ Centrale aérodynamique Crouzet Type 67.
- ↳ Radioaltimètre TRT AHV 6.
- ↳ TACAN et VOR ILS.
- ↳ Transmission de données par radio.

7. MOYENS DE MAINTENANCE

La maintenance intégrée a été développée pour le 1er échelon des équipements nouveaux (par rapport au Mirage F1 C). La maintenance 2e niveau est effectuée par l'ATEC Aérospatiale.

Nota : Les premiers Mirage F1 C ont été modifiés en Mirage F1 CT (à partir de 1991) en utilisant, pour une bonne part, des équipements communs avec ceux du Mirage F1 CR. La mission principale de ces avions est l'attaque des radars sol avec missile Martel AS 37. Les missions secondaires sont l'attaque air-sol avec bombes conventionnelles et l'autodéfense air-air avec canons et missiles de combat rapproché type Magic 2.

MIRAGE IV P

Le Mirage IV P est le nom donné à la transformation de 18 avions Mirage IV A pour les rendre capables du tir à basse altitude du missile ASMP et de l'emport d'un pod de reconnaissance photographique à très haute altitude CT 52. Ces emports sont effectués en position centrale fuselage. La modification du système de navigation et de bombardement se résume pour l'essentiel aux évolutions suivantes.

- ↳ Remplacement du radar doppler et du calculateur "de point" Marconi par deux systèmes inertiels Sagem Uliss 54. Ces systèmes gèrent les digibus GINA et effectuent les calculs de position géographique destinés au calculateur analogique de navigation et les autres paramètres nécessaires pour le missile et le pod photo.
- ↳ Remplacement de la centrale anémométrique Kelvin Hughes par la centrale anémométrique Crouzet type 87.
- ↳ Modernisation de la radio VHF/UHF et UHF, TACAN et VOR/ILS Marker.
- ↳ Modernisation du radar : installation du radar Thomson-CSF Arcana doté d'une fonction "affinage doppler" améliorant les performances de recalage de navigation en aveugle.
- ↳ Remplacement du radioaltimètre par le TRT AHV 12, haute et basse altitude.

La transformation des avions, étudiée par Dassault, a été réalisée par l'AIA de Clermont-Ferrand.

ARMÉE DE L'AIR ET EXPORT

SYSTÈMES NUMÉRIQUES

MIRAGE 2000 DA

MIRAGE 2000 EXPORT RADAR RDM

MIRAGE 2000 N

MIRAGE 2000 D

HISTORIQUE DE LA FAMILLE MIRAGE 2000-3, 2000-5, 2000-9

MIRAGE 2000-5

RAFALE

MIRAGE 2000 DA

1. INTRODUCTION

Après les Jaguar, Super Étendard et Mirage F1 France et Export qui ont été des avions de transition pour l'application des nouvelles technologies numériques, les Mirage 2000 vont être le support d'une nouvelle architecture permettant de profiter pleinement des avantages de ces nouveaux composants, en particulier pour la maintenabilité, la flexibilité et la souplesse d'évolution, la programmation en langage temps réel de haut niveau. C'est aussi sur cet avion que va commencer le rattrapage de notre retard en technologie des radars, des contre-mesures et des communications.

2. MISSIONS OPÉRATIONNELLES

Le Mirage 2000 DA est d'abord un avion air-air, successeur moderne du Mirage F1 C : on retrouve donc les missions d'interception et de supériorité aérienne de cet avion, améliorées par l'utilisation d'un radar capable de détecter les cibles pénétrant à basse altitude et d'un missile doté d'un autodirecteur doppler capable également de basse altitude tout temps. Les progrès des capacités de calcul et de présentation en tête haute ont permis de lui donner à peu de frais des missions d'attaque air-sol classiques mises au point sur les avions Dassault précédents.

3. FONCTIONS OPÉRATIONNELLES

- ↳ Navigation autonome.
- ↳ Conduite de tir missile air-air à autodirecteur semi-actif doppler MATRA Super 530 D.
- ↳ Conduite de tir pour missile de combat AD Infrarouge Magic 2.
- ↳ Conduite de tir pour armement air-sol conventionnel bombes lisses et freinées, canons et roquettes.

4. FONCTIONS TECHNIQUES

- ↳ Détection par radar des cibles aériennes toutes altitudes, accrochage automatique sur prédésignation manuelle ou par transmission de données sol-air, poursuite et éclairage de la cible pour accrochage de l'AD du missile actif.
- ↳ Interrogation IFF intégrée à l'antenne radar.
- ↳ Calculs de conduite de tir et domaines de tir pour missiles Super 530 D et Magic 2.
- ↳ Navigation autonome par système inertiel.
- ↳ Détection des émissions ennemies par le système de contre-mesures passives Serval, présentation sur écran spécifique.
- ↳ Contre-mesures actives électromagnétiques et optiques.
- ↳ Pilotage automatique.
- ↳ Pilotage et navigation en tête haute pour la plupart des phases de vol et d'attaque.

5. ARCHITECTURE MATÉRIELLE – LOGICIELLE

C'est sur le Mirage 2000 DA qu'est appliquée pour la première fois une gestion intégrée complète des échanges d'informations numériques : deux unités centrales de calcul, de codage/décodage et de gestion contrôlent ces échanges (calculateur ESD 2084 et unité secondaire de gestion).

Le logiciel de la quasi-totalité du système est écrit en LTR (langage de haut niveau temps réel développé par le Centre de programmation de la Marine pour les sous-marins puis l'Atlantique 2).

Le radar, les contre-mesures, les boîtiers d'armement, etc. sont tous reliés au digibus. Cette généralisation permet la mise au point d'une maintenance 1er niveau réellement intégrée qui, à cette époque, était probablement très en avance par rapport aux autres avions concurrents.

6. TECHNOLOGIES – PRINCIPAUX ÉQUIPEMENTS

Les évolutions technologiques les plus notables concernent essentiellement les équipements hyperfréquences : radar, contre-mesures, autodirecteurs, communications.

- ↳ Radar Thomson/ESD RDI (radar doppler à impulsions HFR/haute fréquence de récurrence). Ce radar permet la détection aérienne toutes altitudes ainsi que l'éclairage de la cible pour le guidage du missile. Son développement a été assez long et difficile mais a permis à la France d'entamer le rattrapage de son retard dans cette technologie. Ce type de radar – sans mode BFR/basse fréquence de récurrence – est cependant désavantagé pour les détections en air-mer et les modes air-sol classiques : télémétrie air-sol, visualisation du sol, fonctions de "découpe", etc.
- ↳ Collimateur tête haute type VE 130 (à tube cathodique et à glace double pour augmenter le champ vertical).
- ↳ Indicateur tête basse Thomson type VMC 180 (visu couleur à tube "à pénétration" multifonction) + visualisation contre-mesures VCM 65.
- ↳ Calculateur central Dassault Électronique 2084 et unité secondaire de gestion.
- ↳ Centrale à inertie Sagem Uliss 52.
- ↳ Détecteur de radar Serval.
- ↳ Détecteur de radars cohérents ESD Sabre, brouilleur associé.
- ↳ Pilote automatique numérique SFENA type 605.
- ↳ Centrale aérodynamique Crouzet type 90.

7. MOYENS DE DÉVELOPPEMENT

- ↳ Avions de servitude : deux Mystère 20 affectés au développement du radar et des contre-mesures.
- ↳ Application de la stimulation sur les bancs.
- ↳ Mise au point des contre-mesures et liaisons hyperfréquences dans les deux chambres anéchoïdes d'Istres (déjà utilisées pour les Mirage F1 EQ).

8. MAINTENANCE

Toute la maintenance 1er échelon est entièrement intégrée sans aucun recours à des boîtiers externes (sauf pour les points d'emport S 530 et Magic).

MIRAGE 2000 EXPORT "RADAR RDM"

1. INTRODUCTION

Cette version de système répondait au besoin d'un avion multimiissions air-air et air-sol pour l'exportation. Le radar RDM, dans l'état de la technologie française de cette époque, permettait de répondre au mieux à ce besoin : c'est ce qui a permis la vente rapide du Mirage 2000 et a soutenu la production aéronautique militaire dans l'attente de la mise au point d'un radar doppler polyvalent .

2. MISSIONS OPÉRATIONNELLES

- ⤷ Interception de cibles pénétrant à haute, moyenne et basse altitude (capacité réduite pour les cibles volant à basse altitude par suite des performances limitées de l'élimination des échos fixes) avec tir d'un missile air-air semi-actif doppler.
- ⤷ Supériorité aérienne avec tir de missiles air-air de courte portée et canons 30 mm.
- ⤷ Pénétration aveugle à basse altitude et attaque air-sol à vue avec armements conventionnels et tir d'armements guidés par autodirecteur laser.
- ⤷ Attaque air-mer avec missile.
- ⤷ Armement air-sol *stand-off* (à distance de sécurité).
- ⤷ Reconnaissance avec conteneur photo longue distance Harold TRT Omera.
- ⤷ *Data-Link* (transmission de données).

3. FONCTIONS OPÉRATIONNELLES

- ⤷ Conduite de tir missile air-air MATRA Super-530 D, calculs de navigation et de domaines de tir correspondants.
- ⤷ Conduite de tir pour missile de combat MATRA Magic 2, calculs de domaines de tir correspondants.
- ⤷ Conduite de tir pour armement air-sol conventionnel bombes lisses en CCPL, bombes freinées en CCPI, canons et roquettes.
- ⤷ Désignation et poursuite de cibles au sol avec pod de désignation laser optique visible et caméra thermique, liaisons avec missile et bombes à guidage laser.
- ⤷ Conduite de tir de missile air-mer AM 39.
- ⤷ Conduite de tir missile *stand-off*.

4. FONCTIONS TECHNIQUES

- ⤷ Détection par radar des cibles aériennes toutes altitudes, accrochage automatique sur désignation manuelle – poursuite et éclairage ce la cible pour tir du Missile Super-530 D.
- ⤷ Interrogation IFF.
- ⤷ Calculs de navigation et domaine de tir du missile – harmonisation avec le missile.
- ⤷ Conduite de tir Magic 2, domaines de tir missile.

- ↳ Navigation inertielle autonome (SAGEM Type 52).
- ↳ Centrale anémométrique Crouzet type 80 et boîtiers capteurs anémométriques BCA.
- ↳ Radioaltimètre TRT type AHV 9.
- ↳ Radionavigation : TACAN et VOR/ILS.
- ↳ Ensemble de contre-mesures passives ICMS (integrated countermeasures system) sur certaines versions.
- ↳ Visualisation du sol par radar.
- ↳ Fonctions de découpe iso-altitude et “vecteur vitesse” du radar pour aide à la pénétration aveugle.
- ↳ Détection des cibles air-mer et harmonisation avec le missile air-mer AM 39.
- ↳ Pilotage automatique (SFENA type 608).
- ↳ Pilotage et navigation en tête haute pour toutes les phases d’attaque : viseur à tube cathodique Thomson VEM 130.
- ↳ Visualisation tête basse sur écran “multimode” VMC 180.
- ↳ Contre-mesures passives Serval avec présentation sur écran cathodique VCM 65.
- ↳ Désignation des cibles et éclairage par laser, en visible et par caméra thermique, pour le tir des armements à guidage laser.
- ↳ *Data-Link*.

5. ARCHITECTURE MATÉRIELLE – LOGICIELLE

La conception est la même que celle du Mirage 2000 DA. Le cœur informatique du système a été renforcé en puissance de calcul et mémoires avec deux calculateurs ESD 2084 XR au lieu d’un seul.

Par ailleurs, cet avion a été équipé pour la première fois de liaisons numériques et vidéo avec les points d’emport normalisés pour permettre l’adaptation de nombreux armements.

6. TECHNOLOGIE – PRINCIPAUX ÉQUIPEMENTS

- ↳ Radar RDM Thomson : radar doppler multifonctions. Radar à impulsions à émetteur cohérent et doté d’une fonction d’élimination des échos fixes permettant la détection des cibles aériennes à basse altitude. Pour les autres fonctions, en particulier air-sol, le fonctionnement répond aux mêmes principes que les radars précédents (radar Cyrano IV du Mirage F1) mais la technologie est modernisée, en particulier par l’utilisation des techniques numériques et le contrôle général du capteur par un calculateur numérique.
- ↳ Calculateurs principaux de mission ESD : type 2084 XR gérants de transmissions de données par digibus GINA (voir les principales caractéristiques des calculateurs et équipements nouveaux dans la monographie du Mirage 2000-5).

MIRAGE 2000 N

1. INTRODUCTION

Le Mirage 2000 N est un avion biplace destiné principalement à l'attaque nucléaire par tout temps. Pour réduire sa vulnérabilité, il pénètre à très basse altitude en "suivi de terrain" et l'arme utilisée est un missile tiré à grande distance et grande vitesse en suivant une trajectoire programmée (dont une partie peut être balistique).

2. MISSIONS OPÉRATIONNELLES

- ⊃ Attaque air-sol nucléaire à très basse altitude.
- ⊃ Combat rapproché avec missile à AD infrarouge.
- ⊃ Attaque air-sol avec armement conventionnel.

3. FONCTIONS OPÉRATIONNELLES

- ⊃ Pénétration aveugle par tout temps à très basse altitude avec protection envers les contre-mesures électromagnétiques et optiques.
- ⊃ Conduite de tir de missile air-sol ASMP (air-sol moyenne portée aérospatiale).
- ⊃ Conduite de tir des armements air-sol conventionnels : bombes, roquettes.
- ⊃ Conduite de tir pour missile de combat air-air à AD infrarouge.

4. FONCTIONS TECHNIQUES

- ⊃ Détection du terrain de haute résolution dans le plan vertical de la route (et dans des couloirs latéraux pour permettre l'exécution de virages programmés).
- ⊃ Visualisation du sol pour le recalage aveugle de la navigation.
- ⊃ Navigation inertielle hybridée avec les moyens de recalage par filtrage de Kalman et sécurisée par duplication complète.
- ⊃ Recalages de navigation : à vue par télémétrie radar, par corrélation d'image radar à haute et basse altitude, par corrélation d'altitude (comparaison du profil d'altitude de la sonde radioaltimétrique avec un profil enregistré), etc.
- ⊃ Présentation de la carte géographique sur écran TV couleur.
- ⊃ Alignement et transmission des données initiales et d'objectif pour le tir du missile ASMP.
- ⊃ Conduites de tir des armements conventionnels air-sol.
- ⊃ Conduite de tir pour missile air-air Magic 2, calcul des domaines de tir.
- ⊃ Détection des émissions radar et ECM bande large et bande étroite.
- ⊃ Brouillage des émissions radars impulsions et CW.
- ⊃ Pilotage automatique ; mode de base : tenue de pente et de route ; modes supérieurs de tenue de navigation horizontale en suivi de terrain ; mode "approche".

5. ARCHITECTURE MATÉRIELLE – LOGICIELLE

Le système du Mirage 2000 N, pour assurer la sécurité du vol à très basse altitude en suivi de terrain, comporte une structure en double chaîne avec comparaison des deux voies (voie fonctionnelle et voie de sécurité) et commande automatique d'une trajectoire de dégagement en cas d'écart. Les capteurs inertiels, aérodynamiques, les calculateurs centraux sont doublés. Le radar comporte des détecteurs de pannes pour les éléments d'émission et de rayonnement, tout le reste de la chaîne de calcul d'ordres étant doublé.

Le système de cet avion est remarquable pour la conception de sécurité permettant le vol à très basse altitude en suivi de terrain (200 ft en ligne droite). La démonstration de cette sécurité a été effectuée avec succès par l'équipe de développement comprenant des représentants de tous les coopérants concernés.

6. TECHNOLOGIES – PRINCIPAUX ÉQUIPEMENTS

La technologie des équipements est semblable à celle du Mirage 2000 DA.

- ⊃ Radar : Dassault Électronique Antilope.
- ⊃ Indicateur cartographique : Icare Thomson.
- ⊃ Brouilleur : Dassault Électronique.
- ⊃ ASMP : Aérospatiale.
- ⊃ Calculateurs numériques centraux et digibus/Dassault Électronique 2084.
- ⊃ Centrales à inertie : Sagem Uliss 52.
- ⊃ Pilote automatique : Sfena type 606.
- ⊃ Couplage suivi de terrain aux commandes de vol électriques : Dassault Aviation.
- ⊃ Centrale aérodynamique : Crouzet type 90.

7. MOYENS DE DÉVELOPPEMENT

- ⊃ Au sol, en plus des moyens déjà utilisés pour le Mirage 2000 DA, il faut noter un moyen particulier utilisé pour la mise au point de l'alignement du missile ASMP : "l'escarpolette" ; il s'agit d'une véritable balançoire instrumentée comportant tous les détecteurs et organes d'alignement concernés.
- ⊃ Avions de servitude (Mystère 20 Antilope, Mystère 20) et des contre-mesures électroniques, avion banc d'essai Mirage IV S2.

MIRAGE 2000 D

Le Mirage 2000 D est directement dérivé du Mirage 2000 N dont il utilise tout le système de base, en particulier pour la navigation aveugle à très basse altitude et la conduite de tir ASMP.

Contrairement au Mirage 2000 N dont la mission est essentiellement nucléaire, le Mirage 2000 D est exclusivement voué aux missions air-sol avec armement à charges conventionnelles : armement guidé laser (missiles et bombes), armement type missiles de croisière à guidage autonome après tir : SCALP, Apache, armement air-sol classique stand-off type AASM. Il permet le tir en aveugle d'armements air-sol classiques en suivi de terrain sur des objectifs de coordonnées connues au moyen d'une navigation améliorée (corrélation d'altitude continue et réception GPS).

Il bénéficie de l'expérience acquise sur d'autres versions de Mirage 2000 Export en récupérant des équipements ou des fonctions déjà développés (par exemple l'interface homme-système, l'architecture armement, la conduite de tir des armements guidés laser, etc.).

Cet avion, le plus avancé de l'armée de l'Air avant la mise en place des escadrons de Rafale, est destiné au remplacement des flottes de Mirage 5 F et Jaguar et a été utilisé systématiquement dans les missions en pays étrangers (Bosnie, Kosovo, Afghanistan).

Le système de navigation a été complété par un récepteur de navigation par satellite GPS (*global positioning system*).

Historique de la famille

MIRAGE 2000-3 - MIRAGE 2000-5 - MIRAGE 2000-9

M. Marcel Dassault avait constaté, dès 1982, que l'exportation du Mirage 2000 serait très difficile suite à certaines déficiences du système d'armes en comparaison avec son principal concurrent, le F 16.

La principale déficience concernait le radar car le radar RDI, outre qu'il n'était pas disponible à temps pour l'exportation, n'avait pas de fonctions air-sol et air-mer de performances suffisantes pour les besoins des clients export. L'autre point faible venait du manque d'équipements de contre-mesures passives et actives, tant en missions air-air qu'en missions air-sol et d'un interrogateur IFF indispensable dans les missions de défense et de combat aériens. Enfin, il était indispensable de compléter la définition du Mirage 2000 DA de l'armée de l'Air française par les conduites de tir air-sol : armement balistique conventionnel, armement guidé par laser avec caméra visible et caméra thermique, bombes et missiles, armement air-mer (AM 39), pod de reconnaissance photo haute altitude Harold (caméra OMERA).

Dassault décida alors de lancer un programme de développement parallèle au programme officiel français baptisé du nom de code "flex" (comme flexible) avec deux nouvelles versions : le Mirage 2000-3 et le Mirage 2000-5 (dénominations des prototypes internes à Dassault).

Le 2000-3 était équipé d'un radar de technologie classique à impulsions mais doté d'un moyen de filtrage des échos fixes lui conférant des possibilités de détection et de poursuite de cibles volant à basse altitude parmi les échos de sol : le RDM radar doppler multifonction de Thomson-CSF. Contrairement au radar RDI, le RDM avait des fonctions de visualisation du sol avec fonctions de pénétration type découpe "iso-altitude" ou "vecteur vitesse", de télémétrie air-sol et de détection air-mer permettant de développer toutes les fonctions et conduites de tir souhaitées par les clients. Le Mirage 2000-3 n'a pas existé effectivement car des versions export ont été rapidement commandées : Inde, Egypte, Pérou, Grèce, Abu Dhabi.

Le Radar RDM n'était encore qu'un "pis-aller" pour soutenir les ventes à l'exportation face au F 16 et au F 18 (pis-aller qui a quand même permis de vendre le Mirage 2000 à l'exportation en même temps qu'à la France et même de soutenir la sortie des premiers avions français par suite du retard du RDI).

Sur demande insistante de M. Dassault, Thomson décida alors de lancer un nouveau radar doté des haute, moyenne et basse fréquences de récurrence et capable de poursuite multicibles comme les concurrents américains ! C'est le radar RDY qui a été utilisé pour le développement du Mirage 2000-5.

Faisant suite à deux développements exploratoires engagés par les services techniques français pour le développement des conduites de tir air-air MICA du Rafale (DE "éjection" et DE "multicibles"), le Mirage 2000-5 a également été utilisé pour la mise au point de ces nouvelles fonctions.

L'ensemble de ces développements, résultats d'une coopération très étroite des industriels et des services de l'État, a finalement bénéficié au Mirage 2000-5 pour Taïwan, au Mirage 2000-9 pour Abu Dhabi et au Rafale.

MIRAGE 2000-5

1. INTRODUCTION

Le Mirage 2000-5 est l'avion de référence destiné à l'exportation, conçu pour utiliser les progrès du radar RDY et les nouveaux armements missiles air-air et air-sol ainsi que des moyens de contre-mesures passives et actives performants.

2. MISSIONS OPÉRATIONNELLES

Les missions air-air sont celles du Mirage 2000 DA, mais le missile air-air est le MICA à autodirecteur actif doppler avec capacité de tir multicible. Les missions air-sol sont dérivées de celles mises au point sur les premiers Mirage 2000 Export :

- attaque air-sol avec bombes classiques en CCPL et CCPI ;
- tir de missiles et bombes guidées par laser avec pod de guidage laser PDL et PDL-CT (caméra thermique) ;
- tir de missiles air-mer.

Les missions peuvent se faire après pénétration aveugle utilisant les fonctions d'aide à la pénétration du radar RDY : découpe iso-altitude et vecteur vitesse.

3. FONCTIONS OPÉRATIONNELLES

- ⤷ Conduite de tir air-air, multicible, pour missiles MICA, avec un guidage mi-course inertiel (liaison entre l'avion et le missile) et un autoguidage terminal (autodirecteur électromagnétique actif ou infrarouge).
- ⤷ Conduite de tir pour missiles de combat à autodirecteur IR Magic 2.
- ⤷ Conduite de tir canons air-air CCLT (calcul continu de la ligne de traceurs).
- ⤷ Conduite de tir d'armement air-sol conventionnel.
- ⤷ Conduite de tir de missile guidé laser AS-30 L et de bombes guidées laser avec caméra jour et caméra IR.
- ⤷ Conduite de tir de missile air-mer AM 39.
- ⤷ Emport de pod de reconnaissance photo haute altitude Harold.

4. FONCTIONS TECHNIQUES

- ⤷ Détection par radar des cibles volant à toutes altitudes et à partir de toute altitude (par sélection des fréquences de récurrence les mieux adaptées), accrochage automatique sur cibles prédésignées manuellement ou par transmission de données, poursuite et classification des cibles, poursuite simultanée de plusieurs cibles.
- ⤷ Interrogation IFF intégrée à l'antenne radar.
- ⤷ Calculs de navigation et de domaines de tir pour mise en œuvre des missiles MICA et Magic 2.

- ⊃ Harmonisation et transmission de données aux missiles air-air et compatibilité avec les moyens de contre-mesures embarqués.
- ⊃ Navigation autonome par système inertielle, récepteur pour navigation satellite.
- ⊃ Visualisation du sol toute altitude, recalage de la navigation inertielle.
- ⊃ Fonctions de découpe iso-altitude et “vecteur vitesse” du radar pour aide à la pénétration aveugle.
- ⊃ Détection des cibles marine par le radar et harmonisation avec le missile air-mer AM 39.
- ⊃ Système intégré de contre-mesures électromagnétiques passives et actives ICMS (Thomson).
- ⊃ Pilotage automatique.
- ⊃ Pilotage et navigation en tête haute pour toutes les phases d’attaque.
- ⊃ Désignation des cibles et éclairage par laser, en visible et en IR, pour tir des armements à autodirecteur laser.

5. ARCHITECTURE MATÉRIELLE ET LOGICIELLE PRINCIPAUX ÉQUIPEMENTS

La conception est la même que sur le Mirage 2000 DA, mais le cœur du système est constitué par deux calculateurs gérants de Digibus : Dassault Électronique type 2084 XRI associé à une mémoire de masse à bulles magnétiques Sagem MBM (Capacité 4 M octets).

Les caractéristiques principales du calculateur sont sa puissance de calcul (1,6 million d’instructions par seconde), sa mémoire de travail (512 kilo octets) et sa mémoire principale sauvegardée par piles (Lithium) de 1 M octets.

Le cockpit est très modernisé par rapport aux versions précédentes du Mirage 2000.

La visualisation tête haute à tube cathodique Thomson VEM 130 a une grande optique (130 mm de diamètre) permettant de mettre en œuvre le concept complet du pilotage tête haute dans toutes les phases de vol et de mission. Une visualisation tête moyenne Thomson VTM TMM 1410 C dotée d’une optique frontale permet des visualisations dans un angle solide important sans besoin de collimation pour passer de la tête haute à la tête moyenne : c’est le début du *full glass cockpit* qui n’avait pas alors son équivalent dans le monde. Cette visualisation est capable de présenter simultanément une image synthétique et une image TV (venant en particulier du pod de désignation de cible). Une visualisation tête basse à cristaux liquides polychrome, capable d’images synthétiques et de TV est implantée sous la VTM : Thomson MFD 55 (*multifunction display*) ; elle est plus particulièrement affectée aux présentations d’images provenant du radar. Sur la planche de bord, de chaque côté de la VTM sont implantées deux visualisations latérales FCD 34 C polychromes et multimodes à tube *shadow mask* (analogues aux visualisations utilisées sur les avions de transport civil en *Flight Director* et *horizontal situation*).

À noter, pour éviter la perche anémométrique à la pointe du radôme, l’avion est équipé de prises de pression pariétales, en arrière du radôme, alimentant un boîtier de capteurs de pression UMP 33 transmettant les mesures à un calculateur des paramètres air CPA 130, tout cela avec les redondances nécessaires à la sécurité des commandes de vol.

L’avion est équipé d’une centrale à inertie Sagem type 52, d’un Tacan et d’un VOR ; radioaltimètre TRT type AHV 6.

Contre-mesures passives : ensemble Thomson Serval (représentant un progrès très important par rapport aux premières versions de Mirage 2000).

Pilote automatique : Sextant 608.

RAFALE

1. INTRODUCTION

Le programme Rafale peut être considéré comme un aboutissement dans la reconstruction de “l’excellence” de l’industrie aéronautique militaire française après-guerre, et ceci dans toutes ses parties : cellule, motorisation, systèmes électroniques et armements. Cet avion, à lui seul, peut remplacer tous les avions monoplaces et biplaces précédents de l’armée de l’Air et de l’aéronavale : Jaguar, Mirage F1, toutes versions du Mirage 2000, Super Étendard.

Bien entendu, ce n’est pas une fin puisque de nombreuses évolutions, en particulier des systèmes, sont en cours d’étude et se traduiront par la production de nouveaux standards mais, à ce stade, les moyens de base sont au même niveau, en France et aux Etats-Unis. Encore faut-il pouvoir disposer – notamment pour les composants – d’approvisionnements aux États-Unis et que des programmes de recherche et d’études continuent à être financés par l’État.

Le Rafale A, démonstrateur, a été le support de nouveaux progrès importants dans le domaine des systèmes :

- les commandes de vol numériques ;
- le *full glass cockpit* : toutes les informations de pilotage et de conduite du vol et de la mission sont projetées en tête haute ou en tête moyenne ;
- le regroupement des commandes, contrôles et tests des “systèmes avion” (électricité-hydraulique-moteur, etc.) dans des organes centraux de traitement numérique et de visualisation.

Ces innovations résultaient d’études et de développements exploratoires soutenus par les programmes de recherche appliquée de l’État.

2. MISSIONS OPÉRATIONNELLES

Elles résultent du rôle de remplacement de tous les avions précédents et de l’apparition des nouveaux armements sophistiqués.

- ⤷ Interception de cibles aériennes pénétrant à haute, moyenne et basse altitude avec tir de missiles à autodirecteur actif avec capacité multicibles (désignation des cibles à bord ou par liaison de télétransmission).
- ⤷ Supériorité aérienne avec tir de missiles air-air de courte portée.
- ⤷ Missions air-sol d’attaque d’objectifs fixes et mobiles, après pénétration aveugle en suivi de terrain, tir à distance de sécurité et retour à très basse altitude ; tir sur l’objectif avec désignation à vue, sur image TV ou caméra thermique ou par radar ; armements : missiles, bombes guidées ou non-guidées.
- ⤷ Missions air-mer avec attaque de cibles marines par tout temps, désignation de cible par radar ou à vue.

3. FONCTIONS OPÉRATIONNELLES

- ⊃ Conduite de tir air-air pour missiles MICA à autodirecteur actif ou infrarouge monocible et multicible et ultérieurement missile Meteor.
- ⊃ Conduite de tir pour missiles de combat à autodirecteur infrarouge Magic 2.
- ⊃ Conduite de tir canon CCLT.
- ⊃ Conduite de tir armement air-sol conventionnel.
- ⊃ Conduite de tir pour armement à autodirecteur laser avec pods de désignation TV ou caméra thermique.
- ⊃ Conduite de tir de missile air-mer.
- ⊃ Conduite du vol et de procédures de préparation et d'alignement pour le tir d'armements air-sol du type ASMPA, missiles "de croisière" type SCALP, multicible air-sol avec l'AASM.
- ⊃ Emport de pods spécialisés de reconnaissance et de guerre électronique.

4. FONCTIONS TECHNIQUES

- ⊃ Détection par radar des cibles aériennes à toute altitude – accrochage automatique (*Track while scan* : accrochage en balayage) sur cibles prédésignées manuellement ou par transmission de données, poursuite et classification des cibles, poursuite simultanée de plusieurs cibles.
- ⊃ Interrogation IFF intégrée à l'antenne radar.
- ⊃ Calculs de navigation et de domaines de tir pour la mise en œuvre des missiles MICA et Magic 2.
- ⊃ Harmonisation et transmission de données aux missiles air-air et compatibilité avec les moyens de contre-mesures embarqués.
- ⊃ Navigation autonome par système inertiel doublé et récepteur de navigation par satellite. Visualisation du sol par radar à toute altitude et recalage de la navigation (performances améliorées par affinage doppler).
- ⊃ Suivi de terrain automatique par détection radar, en ligne droite et en virage : liaison directe avec les commandes de vol ; hauteur de vol : 200 pieds au-dessus des crêtes.
- ⊃ Détection des cibles marines par le radar.
- ⊃ Désignation d'objectifs par viseur de casque.
- ⊃ Système intégré de contre-mesures électromagnétiques actives et passives (détection et localisation par interférométrie grande base), contre-mesures passives optiques, détecteur de départ de missiles.
- ⊃ Désignation des cibles par imagerie optique, visible et caméra thermique, éclairage des cibles par éclairage laser.
- ⊃ Pilotage automatique assuré par les commandes de vol.
- ⊃ Commande vocale pour certaines fonctions, système d'alarmes par synthèse vocale.

5. ARCHITECTURE MATÉRIELLE ET LOGICIELLE

Le cœur du système de navigation et d'attaque est conçu sur le principe de la double chaîne avec comparaison pour toutes les parties nécessitant une garantie de sécurité. Les capteurs principaux sont soit simples avec comparaison à un modèle calculé pour les parties

ne pouvant pas être doublées (cas des antennes radar, par exemple), soit doublées et comparées entre elles, lorsque la sécurité du vol l'exige.

Les liaisons numériques sont assurées par un double bus conforme à la norme 1553 A adoptée dans le cadre OTAN.

Les logiciels sont écrits en langage temps réel ADA et en langage C++ pour les développements complémentaires spécifiés par programmation orientée "objet".

6. TECHNOLOGIE – PRINCIPAUX ÉQUIPEMENTS

- ⊃ Radar : RBE 2 à balayage électronique 2 plans.
- ⊃ Calculateurs principaux : Dassault Électronique CMR puis EMTI (ensemble modulaire de traitement de l'information) Thales.
- ⊃ Centrales à inertie à gyrolasers et récepteur GPS intégré de SAGEM.
- ⊃ Système d'alignement des centrales à inertie sur porte avions (l'alignement peut aussi être réalisé par GPS).
- ⊃ Moyens de communication OTAN et transmission de données (liaison 16).
- ⊃ Capteurs aérodynamiques.
- ⊃ Collimateur tête haute holographique couleur.
- ⊃ Collimateur tête moyenne grand champ, haute résolution.
- ⊃ Écrans CCD couleur.
- ⊃ Détecteur optronique de secteur frontal visible TV et infrarouge.
- ⊃ Viseur de casque.
- ⊃ Intégration de la compatibilité du standard 1760 pour missiles air-air et air-sol (interopérabilité).
- ⊃ Missiles air-air.
- ⊃ Missiles air-sol.
- ⊃ Ensemble de contre-mesures SPECTRA

7. MOYENS DE DÉVELOPPEMENT

- ⊃ Avions de servitude : radar, SPECTRA, optronique secteur frontal.
- ⊃ Bancs de simulation.
- ⊃ Bancs stimulables – banc de mise au point des logiciels prototypes.

8. MOYENS DE MISE EN ŒUVRE ET MAINTENANCE

La maintenance de 1er niveau de l'avion et de ses systèmes est entièrement intégrée et permet la désignation de l'unité remplaçable en piste à échanger ainsi qu'un premier diagnostic de l'élément de 2^e niveau défaillant. Certains de ces derniers éléments peuvent être échangés en piste.

AÉRONAUTIQUE NAVALE

ÉTENDARD IV M – SUPER ÉTENDARD
LES AVIONS DE SURVEILLANCE MARITIME
ATL1 – ATL2.

Les exemples de programmes qui ont été retenus permettent d'effectuer des comparaisons particulièrement représentatives pour les systèmes, entre deux générations.

ÉTENDARD IV M – SUPER ÉTENDARD

Les deux programmes offrent une base de comparaison saisissante en termes d'équipements et de systèmes, à moins de vingt ans d'intervalle. Pour des missions sensiblement voisines, on est passé d'un équipement très simplifié à un système de navigation et d'attaque entièrement nouveau, avec centrale inertielle, techniques numériques et une réalisation exceptionnelle et originale pour l'alignement sur porte-avions.

Dans ce qui suit, on rappellera brièvement les caractéristiques de l'Étendard IV M, puis plus largement celles du Super Étendard.

1. ÉTENDARD IV M

Appareil d'attaque et de chasse à basse et moyenne altitude, utilisable à partir de porte-avions de la classe Clemenceau.

Calendrier :

- commande prototype : décembre 1956 ;
- premier vol prototype : mai 1958 ;
- commande série : janvier 1959 ;
- en service jusqu'au début des années quatre-vingt.

Armement :

- 2 canons de 30 mm ;
- engins Sidewinder ;
- AS 30 ;
- bombes.

Équipement :

- centrale de cap ;
- viseur CSF type 92 ;
- radar AIDA ;
- calculateur de bombardement d'origine suédoise (SAAB).

Le viseur type 92, électromécanique, est le premier viseur de série où les réticules étaient utilisés à d'autres fins que pour la seule visée : le réticule mobile était asservi, à grande distance, à recopier la direction du but indiqué par le radar AIDA, ce qui facilitait l'acquisition du but sur cible aérienne et sur cible marine, et permettait l'approche et le tir en aveugle (pour les engins).

2. SUPER ÉTENDARD

Le choix du successeur de l'Étendard IV M n'a été fait qu'après beaucoup d'hésitations et l'examen d'un large éventail de possibilités françaises et étrangères ; il s'est porté en définitive sur une version améliorée du même avion.

Calendrier :

- décision du ministre 19/01/73 ;
- commande globale de 100 appareils de série 04/09/73, (réduite ultérieurement à 71) ;
- prototypes réalisés à partir d'Étendard IV M transformés : 1er vol en octobre 1974 ;
- livraisons série entre 1978 et 1983.

2.1. Missions opérationnelles

Le rôle principal de l'avion étant la couverture aérienne de la flotte, la protection contre les navires de surface et l'attaque d'objectifs terrestres, les missions étaient les suivantes :

- attaque air-sol de haute précision avec bombes conventionnelles ;
- attaque air-mer avec missile type Exocet ;
- attaque nucléaire avec missile type ASMP ;
- attaque air-air avec canons et missiles Magic ;
- reconnaissance photographique ;
- attaque air-sol avec bombes guidées laser et AS 30 guidé laser.

2.2. Fonctions opérationnelles

- ⊃ Recherche des objectifs au sol, en mer et en air-air.
- ⊃ Conduite de tir air-sol type CCPL (calcul continu du point de largage) et CCPI (calcul continu du point d'impact).
- ⊃ Conduite de tir canon air-sol.
- ⊃ Guidage pour tir du missile air-mer (acquisition de l'objectif, calcul du domaine de tir, guidage vers le point de tir, dégagement).
- ⊃ Guidage pour tir du missile ASMP (désignation d'objectif, calcul du domaine de tir, alignement du missile, guidage vers le point de tir).
- ⊃ Guidage pour le tir air-air avec canon et missiles Magic, calcul du domaine de tir.

2.3. Fonctions techniques

Les fonctions opérationnelles ci-dessus supposent toutes un système de navigation, de détection de verticale et de vitesse de grande performance. Le Super Étendard, après la démonstration du MILAN, va être le premier avion militaire français à exploiter les avantages des systèmes inertiels.

Les fonctions air-mer et air-air nécessitent une fonction de recherche d'objectifs, de détection et de poursuite par radar. La présence d'un radar permet de fournir une télémétrie air-sol pour les conduites de tir de bombardement et canon air-sol, ainsi qu'une télémétrie air-air pour la conduite de tir CCLT (calcul continu de la ligne de traceurs) avec canon : toutes ces fonctions techniques sont réalisées par un radar multi-fonctions installé dans le nez de l'appareil.

Pilotage et visée en tête haute pour la plupart des fonctions : des aides à l'approche et à l'appontage par pilotage du "vecteur vitesse" sont développées d'une manière originale pour cet avion.

Les fonctions de calcul des conduites de tir et d'échanges d'informations numériques sont regroupées dans un ensemble de calcul associé à la centrale à inertie et un générateur de symboles associé au collimateur tête haute. Les fonctions d'adaptation aux différents emports d'armement ou conteneurs spécialisés sont réalisées dans des boîtiers spécifiques.

2.4. Architecture matérielle et logicielle

Le système du Super Étendard n'a pas pu profiter des développements de liaisons numériques multiplexées (digibus).

Le "cœur" du système est constitué par le système inertiel et le calculateur d'attaque air-sol associé commandés par un boîtier de commande de navigation et un boîtier de commande d'armement. Les échanges avec les autres équipements se font par des liaisons numériques "point à point" ARINC.

Les calculs numériques de type universel sont regroupés dans le cœur du système et réalisés en langage assembleur.

Les symboles sont élaborés dans le générateur de symboles du collimateur tête haute.

L'exiguïté du poste de pilotage et la multiplicité des fonctions ont nécessité une très grande intégration des interfaces homme-système : c'est le premier exemple en France pour un avion militaire de série.

2.5. Technologies – principaux équipements

Le Super Étendard a bénéficié de la technologie américaine pour la centrale à inertie et les processeurs numériques associés. Ces matériels ont été réalisés en France par SAGEM sous licence Kearfott.

Mais le rôle de SAGEM s'est étendu bien au-delà et a été déterminant pour résoudre le problème particulièrement difficile de l'alignement de la centrale à inertie sur porte-avions. Compte tenu de l'importance de cette question, un développement spécial lui est consacré à la fin de cette monographie.

Le radar AGAVE, original par sa petite taille malgré le nombre important de fonctions réalisées et ses performances en détection air-mer, est le fruit d'une coopération entre Thomson et ESD.

Le collimateur tête haute VE 120, à tube cathodique, est le premier matériel de ce type réalisé en France par Thomson-CSF.

2.6. Moyens de développement

La mise au point du système a pu être accélérée et facilitée par l'utilisation de la stimulation au banc.

Cette technique originale inventée par Dassault consiste, comme indiqué précédemment, à faire "vivre" un banc de système en pilotant des générateurs de données par des enregistrements des paramètres d'un vol les plus "externes" : angles d'attitude, vitesses, pente, etc. Grâce à ce moyen les logiciels peuvent être entièrement testés, en statique et dynamique, dans des configurations représentatives de vols et de phases d'attaque réelles.

Les avions de servitude ont été des avions Étendard modifiés.

2.7. Complément sur la participation de SAGEM au programme⁽¹¹⁾

La participation de SAGEM ne se limite pas au capteur inertiel et aux calculateurs associés. Elle constitue un système en soi, comprenant aussi la référence inertielle du porte-avions et l'ensemble des dispositifs nécessaires à l'alignement initial de la centrale avion.

(11) A partir d'informations fournies par Daniel Dupuy (SAGEM).

La Marine nationale avait exprimé la demande d'une référence inertielle pour la navigation, mais surtout pour la précision du bombardement et de l'attaque au sol.

Il fallait pour cela résoudre le problème de l'alignement initial sur une base mobile, le porte-avions, et ceci en moins de 10 mn, compte tenu de l'encombrement du pont, pour une précision de navigation de 1 NM/hr (alors que l'alignement initial d'un système inertielle installé sur un avion immobile au sol restait un problème mal résolu : rafales de vent, temps d'alignement trop long).

Les États-Unis ayant refusé l'exportation de leur système, il était nécessaire de développer sans aucune aide une solution originale.

La solution proposée par SAGEM, et finalement retenue, présentait de nombreux avantages :

- elle était entièrement numérique (navigation et attaque) ;
- elle constituait la première application au monde du filtrage de Kalman dans un système complexe (l'US Navy y travaillait, mais était loin d'avoir abouti) ;
- elle constituait un système structuré conçu dans son ensemble autour des mêmes éléments : trois unités de calcul identiques et logiciels compatibles développés avec les mêmes moyens.

Cependant, cette solution très nouvelle n'était pas sans risque et l'avionneur n'était pas prêt à prendre la responsabilité de l'alignement sur porte-avions, sans une phase d'expérimentation préalable. Le STAé a donc mis sur pied, en liaison avec Dassault une formule contractuelle mixte, dans laquelle SAGEM a reçu deux contrats :

- l'un des AMD pour les équipements embarqués, hors logiciel ;
- l'autre du STAé, pour la référence porte-avions (RPA), le logiciel d'alignement (Alidade) et la transmission infrarouge (Télémir).

Description du système Sagem

Équipements avion

- ↳ L'unité inertielle UNI 40.
- ↳ L'unité d'attaque UAT 40.
- ↳ Un boîtier d'affichage PCN 40 et d'échanges UEC 40.
- ↳ Le récepteur infrarouge placé en haut de la dérive.

Dans l'UNI 40, le logiciel d'alignement est entièrement original. L'alignement initial (recherche du nord et de la verticale) est réalisé par un filtre de Kalman, à partir des informations de position, de vitesses angulaires de rotation du porte-avions, informations qui sont transmises en numérique par une liaison infrarouge (système Télémir de SAT). Les avions peuvent être disposés n'importe où sur le pont et leur orientation est indifférente. En moins de 10 mn, l'UNI 40 trouve le nord (1/10 de degré), la verticale, et, en prime, la position sur le pont, qui constitue un test de la qualité de l'alignement.

Dans l'UAT 40, dotée d'un sous-ensemble de calcul identique, le logiciel de bombardement, par la diversité de ses modes et sa précision, fait du Super Étendard le premier système numérique français de bombardement produit en série (précision typique 20 m CEP).

La référence porte-avions (RPA)

La RPA est constituée par une UNI 40 avion standard, travaillant avec un boîtier mémoire extérieur. C'est une référence de navigation hybride (filtre de Kalman) qui associait, à l'origine, Inertie, Loch et Oméga, complétés ultérieurement par le GPS. La similitude des

centrales Avion et RPA, outre les avantages de coût et de logistique, offrait pour le filtre l'intérêt d'avoir les mêmes modèles d'erreur.

La transmission infrarouge (TELEMIR)

Pour le système de transmission, un autre choix original a été fait, celui d'une technique infrarouge non cohérente, plutôt qu'une technique radio classique. La raison de ce choix est la plus grande simplicité que permet par principe cette technique pour la réalisation des principales spécifications : fiabilité, discrétion et immunité au brouillage.

Le système Télémir, réalisé par la SAT, comprend l'ensemble d'émission installé dans le porte-avions et des ensembles de réception installés dans chaque avion. Un ensemble d'émetteurs (portée 300 m) assure une couverture totale du pont.

Déroulement de l'opération

La décision de choix de la DTCA a été prise en octobre 1973 et les contrats à SAGEM passés en 1974. L'opération a été un plein succès et les validations de l'alignement sur porte-avions, toutes réussies, ont eu lieu en décembre 1978 et mars 1979.

LES AVIONS DE SURVEILLANCE MARITIME

ATL 1 – ATL 2

Environ vingt ans séparent les deux générations de systèmes d'armes et leur comparaison est d'autant plus intéressante qu'il s'agit pour l'essentiel du même porteur et de la même mission de base (lutte contre les sous-marins classiques et surtout à propulsion nucléaire de l'Union soviétique).

⇒ Octobre 1958 : choix du Breguet 1150, ultérieurement baptisé Atlantic.

⇒ Juillet 1977 : choix français de l'Atlantic nouvelle génération et lancement de la phase prototype en décembre 1978. En 1985, l'Atlantic nouvelle génération sera appelé Atlantique (ATL 2) et le sigle ATL 1 désignera l'Atlantic.

La première génération a été réalisée dans un cadre OTAN, tandis que la deuxième l'a été dans un cadre national, faute de coopération des autres pays possesseurs d'Atlantic. Mais, dans les deux cas, le rôle des équipes Breguet a été déterminant, même après la fusion AMD-BA. Ceci est particulièrement vrai pour les systèmes d'armes, dont la direction a bénéficié d'une remarquable continuité, sous la responsabilité de Marcel Berjon, directeur technique de la SECBAT, puis directeur du programme ATL 2 AMD-BA.

Dans ce qui suit, on a repris les principaux tableaux concernant les systèmes, extraits d'une étude comparative faite par Marcel Berjon en décembre 2001, sous le titre :
De l'ATLANTIC à l'ATLANTIQUE (deuxième édition, juillet 2002).

Ces tableaux permettent de voir :

- la place des équipements français, nettement accrue dans l'ATL 2 ;
- la numérisation des systèmes ;
- l'évolution de l'intégration du système et de l'organisation des postes d'équipage ;
- enfin, l'augmentation très sensible de l'efficacité opérationnelle (en termes de pistes qu'il est possible de suivre simultanément, on passe ainsi de 10 à 50).

Cette évolution illustre bien les capacités développées dans l'industrie et les services français pour réaliser un système particulièrement complexe.

1. LES ORIGINES

ATL 1	ATL 2
<p>Le programme Atlantic est né, à la fin des années cinquante, du besoin opérationnel de l'OTAN pour un nouvel avion de lutte contre les sous-marins, classiques et surtout à propulsion nucléaire, de l'Union soviétique. Voici un extrait du document officiel qui résume les caractéristiques souhaitées:</p> <p>"L'avion, partant d'une base, doit pouvoir se rendre sur une zone de patrouille en haute mer, à une vitesse de l'ordre de 300 nœuds (550 km/h). La surveillance doit se poursuivre durant de nombreuses heures et pouvoir être continuée sur un moteur. Une endurance de 12 à 18 heures à basse altitude est demandée. L'avion doit emporter tous les équipements les plus modernes de détection, et apporter à l'équipage de 12 hommes de bonnes conditions de travail. L'avion doit pouvoir emporter des armes offensives utilisées par les marines alliées. De plus, l'avion doit être le moins lourd possible, pour avoir le prix de revient le plus bas possible."</p> <p>Le choix du Breguet 1150 en octobre 1958, contre une vingtaine de projets concurrents, fut donc essentiellement celui du porteur le mieux adapté aux critères donnés ci-dessus.</p> <p>Le système d'armes fut ensuite constitué en utilisant les meilleurs équipements disponibles, en particulier pour les sous-systèmes acoustique, radio/navigation aux États-Unis, radar/ESM en France.</p> <p>La technologie des transmissions de données était analogique.</p> <p>Des innovations ont toutefois été réalisées, à l'initiative de Breguet, sur le cœur du système (table tactique et table de recherche) et sur les lanceurs de charges.</p> <p>Un développement particulier fut lancé pour le MAD (Thomson-CSF).</p>	<p>Le programme Atlantic nouvelle génération (ANG), devenu plus tard Atlantique (ATL 2) est né, vingt ans plus tard, des mêmes impératifs, mais en tenant compte de caractéristiques des sous-marins encore plus performants (silence, vitesse, profondeur) et du besoin opérationnel de lutte anti-surface qui n'était qu'une mission secondaire de l'Atlantic.</p> <p>Ceci obligeait à concevoir un système d'armes totalement nouveau, en tenant compte évidemment des avancées technologiques des senseurs et de la puissance des techniques digitales pour traiter beaucoup plus d'informations et beaucoup plus rapidement.</p> <p>Après une recherche de solutions de porteurs autres que l'Atlantic, et faute de coopération des autres pays possesseurs d'Atlantic, le gouvernement français a finalement décidé de lancer l'Atlantic nouvelle génération en 1977 sur un plan purement national en gardant donc la formule du porteur. Mais si la forme extérieure ne fut pas sensiblement modifiée, de nombreuses améliorations de détail furent apportées à la structure et tous les systèmes fonctionnels furent modernisés. Seule la propulsion, les deux moteurs Tyne, fut conservée.</p>

2. LES DATES CLÉS

ATL 1	ATL 2
<p>mi-1957 programme opérationnel de l'OTAN.</p> <p>21 mars 1958 spécification technique et demande de propositions aux industriels.</p> <p>21 juin 1958 remise des projets (une vingtaine).</p> <p>21 octobre 1958 décision du groupe d'experts de l'OTAN : choix du Br 1150. Dès cette date, les études détaillées et la mise en place de l'organisation industrielle commencent chez Breguet</p> <p>30 janvier 1959 approbation du choix par le Conseil de l'OTAN.</p> <p>11 février 1959 contrat phase 1 (deux prototypes) notifié à Breguet.</p> <p>2 octobre 1959 création du comité directeur, organisme de gestion étatique.</p> <p>22 octobre 1959 création de la Société européenne de construction du Breguet Atlantic (SECBAT) et présentation du maquetage d'aménagement au comité directeur.</p> <p>24 février 1961 pré-contrat de la phase II à Breguet (2 prototypes 03 et 04, liasse de série, deux cellules d'essais de structure, maquette grandeur de production), transféré sur SECBAT par avenant le 06/07/62 et complété par avenant du 27/09/62.</p> <p>21 octobre 1961 premier vol du premier prototype à Toulouse.</p> <p>3 novembre 1961 le Br 1150 est baptisé officiellement Atlantic.</p> <p>6 juin 1963 notification de la phase V : 20 premiers avions de série français et 20 avions RFA.</p> <p>10 décembre 1965 livraison officielle du premier avion de série français et du premier avion de série allemand sur la base de Nîmes-Garons.</p> <p>28 juin 1965 notification de la phase VI : 20 avions (41 à 60) pour la France.</p> <p>31 octobre 1969 notification de la phase IX : 9 avions pour les Pays-Bas.</p> <p>8 août 1969 notification de la phase X : 18 avions pour l'Italie.</p> <p>19 juillet 1984 livraison du dernier avion n° 87.</p>	<p>dès 1970, des projets de modernisation baptisés Atlantic Mk II sont étudiés, tant sur le plan officiel qu'industriel.</p> <p>1972 premier document complet de propositions de Breguet-Aviation.</p> <p>juin 1974 clauses techniques de l'Atlantic Mk II et proposition de contrat de développement (sans suite, du fait des problèmes budgétaires de la Marine).</p> <p>1975-1976 poursuite de la promotion de l'Atlantic Mk II auprès des services officiels.</p> <p>3 juillet 1977 lettre officielle demandant une offre de AMD-BA pour une phase de développement de l'Atlantic nouvelle génération ANG. Deux Atlantic seront mis à disposition d'AMD-BA pour servir de prototypes de développement du système d'armes.</p> <p>12 décembre 1978 notification du contrat prototype à AMD-BA.</p> <p>début 1981 redéfinition du système informatique central.</p> <p>8 mai 1981 premier vol de l'ANG-01 (ex Atlantic n° 42).</p> <p>26 mars 1982 premier vol de l'ANG-02 (ex Atlantic n°69).</p> <p>24 mai 1984 commande de l'industrialisation à la SECBAT.</p> <p>28 mai 1985 commande des premiers avions de série l'Atlantic nouvelle génération est désormais baptisé Atlantique (ATL 2). Le sigle ATL 1 désignera l'Atlantic.</p> <p>19 octobre 1988 premier vol du premier avion de série ATL 2.</p> <p>21 octobre 1989 livraison officielle du premier ATL 2 à la Marine sur la base de Lann-Bihoué.</p> <p>13 octobre 1997 livraison du dernier ATL 2 (n°28). Initialement, le besoin exprimé était de 42 ATL 2.</p>

3. LES ORGANISATIONS

ATL 1	ATL 2
ÉTAT	
<p>Comité directeur (CD) Responsables nationaux, eux-mêmes responsables dans leurs pays respectifs de la coordination de tous les aspects du programme : France, RFA, États-Unis (phase de développement), Pays-Bas, Belgique, Italie (à partir de 1969). Présidence à tour de rôle et pour six mois de chacun des représentants nationaux. Réunion une fois par mois. Décisions à l'unanimité. Exécution des décisions par l'agence exécutive française (DCAé) qui passe les contrats, surveille leur exécution et organise les essais et la réception des matériels.</p> <p>Sous-comité technique (SCT) Présidence française. Les représentants de la SECBAT participent régulièrement aux groupes de travail spécialisés : système d'armes, essais en vol, documentation, manuel pilote, simulateurs.</p> <p>Sous-comité administratif (SCA) Groupe de travail des experts de prix.</p> <p>Conférence internationale de modifications (CIM) Créée dès la phase d'industrialisation (1963). Présidence française : directeur du SIAR/DSO. Procédure CLM française. Réunion trois fois par an (au début), à tour de rôle, sur chaque site industriel de la SECBAT. Préparation : conférence technique préparatoire (CTP) et approbation du SCT.</p> <p>Centre international de gestion des matériels Atlantic (CIGMA) Basé au SAMAN à Toussus-le-Noble. Commandé par un officier supérieur de l'un des utilisateurs européens de l'ATL 1.</p>	<p>Le programme Atlantique ayant été lancé sur un plan purement national, les procédures françaises étaient applicables. Le programme était donc sous la responsabilité de la Direction des constructions aéronautiques (DCAé). Toutefois, la filiation avec le programme Atlantic était telle que certaines appellations n'ont pas suivi la coutume des programmes nationaux. Il y avait donc les désignations suivantes :</p> <p>Sous-comité technique ATL 2 (SCT/ATL 2)</p> <p>Sous-comité production ATL 2 (SCP/ATL 2)</p> <p>Commission technique préparatoire aux modifications Atlantique (CTPA)</p> <p>Commission de modifications de l'Atlantique (CMA)</p>

INDUSTRIE

Société européenne de construction du Breguet Atlantic (SECBAT)

En ce qui concerne le système d'armes, Breguet seul était impliqué.

Les spécifications des matériels B devaient obligatoirement être soumises à Breguet pour avis et remarques éventuelles. Les représentants des coopérants assistaient aux réunions de modifications pour les répercussions éventuelles sur les éléments de leur responsabilité.

La SECBAT a toutefois été impliquée dans les deux cas suivants :

- la modernisation des avions de la RFA faite hors des règles du comité directeur, "enregistrée" pour la forme par une modification S 661 à la 49 e CIM du 26 avril 1979 (radar, ESM, navigation).
- la modernisation des avions italiens faite en concertation avec les instances officielles et la SECBAT (modification S 711 groupant l'ensemble des travaux de développement des quatre modifications essentielles suivantes : S 706 radar Iguane, S 707 lance-bouées ATL 2, S 708 centrales Litton LTN 72, S 709 enregistreur acoustique Honeywell).

Un contrat de développement fut notifié à la SECBAT (25 mars 1986) qui prévoyait la modification de deux ATL 1 italiens, l'un par AMD-BA, l'autre par Aeritalia.

La maîtrise d'œuvre fut essentiellement AMD-BA, en particulier pour les essais en vol.

Phase prototype

Maîtrise d'œuvre AMD-BA : contrat de coordination industrielle.

Comme pour l'ATL 1, les spécifications des équipements B devaient être soumises au maître d'œuvre.

Les spécifications détaillées du logiciel opérationnel étaient de la responsabilité du maître d'œuvre, même si la réalisation était sous-traitée au CPM.

Mise à disposition de deux ATL 1 pour transformation en ANG et essais en vol.

Réalisation des différents bancs d'essais (cf. Moyens de développement et d'essais).

Phase industrialisation et série

La SECBAT interviendra dans la mesure où AMD-BA, dans un souci d'économie et de promotion de l'ATL 2, demandera à ses coopérants habituels (sauf Fokker, par décision de l'État français) d'assurer la fourniture des éléments de l'avion dont chacun avait la responsabilité dans le programme ATL 1, avec les modifications résultant des définitions ATL 2.

Avant de recevoir le contrat prototype (le 12/12/78) la SECBAT avait dû s'engager sur un prix plafond de l'industrialisation et de la série pour les fournitures correspondantes.

4. LES MOYENS DE DÉVELOPPEMENT ET D'ESSAIS

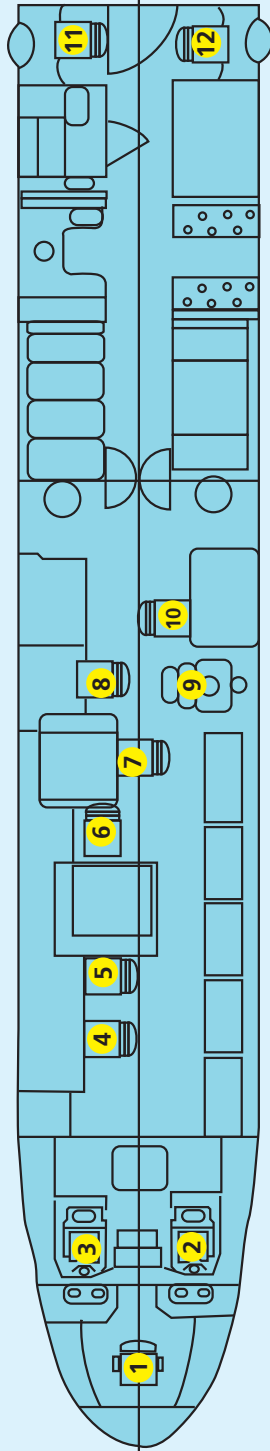
ATL 1	ATL 2
Développement	
<p>Maquettage grandeur sur maquette en bois du fuselage.</p> <p>Banc système d'armes simplifié, à Villacoublay, près du Bureau d'études systèmes, essentiellement utilisé pour la mise au point des tables (tactique et recherche) et leurs liaisons avec les autres sous-systèmes.</p> <p>Avions de servitude : – Nord 2502 au CEV (navigation). – Nord 2504 au CEPA (partie opérationnelle).</p> <p>Prototypes Atlantic O3 et O4 Les essais de système d'armes ont été effectués essentiellement sur le O3, puis sur le O4 qui était très proche du premier avion de série (réalisation des câblages en particulier).</p>	<p>Maquettage : sur la maquette série de l'ATL 1.</p> <p>Banc de conception et vérification du logiciel. Banc d'intégration des équipements du SNA.</p> <p>Ces deux bancs, dont AMD-BA était responsable, étaient logés dans les locaux du CPM, organisme d'État chargé de l'étude et de la réalisation du logiciel opérationnel, sous maîtrise d'œuvre AMD-BA.</p> <p>Banc d'intégration et d'aide aux essais en vol (AMD-BA Istres).</p> <p>Prototypes : – ANG-01 (ex ATL 1 n° 42). – ANG-02 (ex ATL 1 n° 69).</p>
Série (usine de Colomiers)	
<p>Maquette grandeur série, métallique tous aménagements et câblages conformes aux plans de série.</p> <p>Banc système d'armes de production, très complet, permettant le test de chaque jeu d'équipements avant montage sur la chaîne de production.</p>	<p>Maquettage série effectué sur le premier avion de série dont la cellule avait été réalisée en avance.</p> <p>Banc de test automatique des câblages.</p> <p>Banc système d'armes de production : dans un bâtiment à part, spécialement conçu pour ce rôle, tous les équipements sont testés interconnectés avant montage sur avion.</p>

5. CONFIGURATION DES POSTES D'ÉQUIPAGE

ATL 1	ATL 2
Poste pilote	
<p>La spécification de l'Atlantic demandait un pilotage à deux :</p> <ul style="list-style-type: none"> - premier pilote, commandant de bord, à gauche qui, dans les phases d'attaque, va à la table dans le poste tactique ; - second pilote à droite, ayant tous les moyens de pilotage. <p>Il n'y avait pas de siège mécanicien "installé". En fait, les utilisateurs, pour les phases à basse altitude, mettaient un mécanicien entre les deux pilotes.</p>	<p>Pilotage à trois :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pilote à gauche ; - commandant de bord à droite, disposant d'une visualisation tactique/FLIR simplifiée ; - mécanicien de bord, au milieu sur un siège pivotant, pour permettre l'accès d'un observateur dans le bulbe avant.
Poste tactique	
<p><i>Côté droit, de l'avant vers l'arrière :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - acoustique : deux opérateurs ; - table tactique (coordinateur tactique, plus siège mobile occasionnel pour le commandant) ; - navigateur, table de recherche ; - radio. <p><i>Côté gauche (en face du poste radio) :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - radariste ; - opérateur ESM/MAD. <p>Cette disposition du poste tactique résultait de la décision de mettre côte à côte la table tactique et la table de recherche, ce qui prenait beaucoup de place.</p>	<p><i>Les opérateurs sont tous côté droit :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - radio/navigateur, avec télétype et table de navigation ; - opérateur ESM/MAD ; - opérateur radar/FLIR ; - coordinateur tactique ; - deux opérateurs acoustique. <p>Cette disposition, permise par les encombrements moindres des postes coordinateur tactique et navigateur, a l'avantage de placer le radionavigateur près du poste pilote et les opérateurs acoustiques près des systèmes de lancement des bouées sonores et des antennes réceptrices. À gauche, il n'y a que des armoires d'équipements. La circulation dans le poste tactique est sans obstacle.</p>
Poste d'observation visuelle	
<ul style="list-style-type: none"> - Bulbe avant : observateur avec système de visée et tir des missiles AS 12. - Hublots latéraux arrière : 2 observateurs avec jumelles sur support. 	<p>Trois observateurs avec jumelles individuelles, dans le bulbe avant et devant les deux hublots arrière.</p> <p>Le confort de l'équipage a été sensiblement amélioré par un système de conditionnement plus performant et par un niveau de bruit plus faible.</p>

Configuration des postes d'équipage

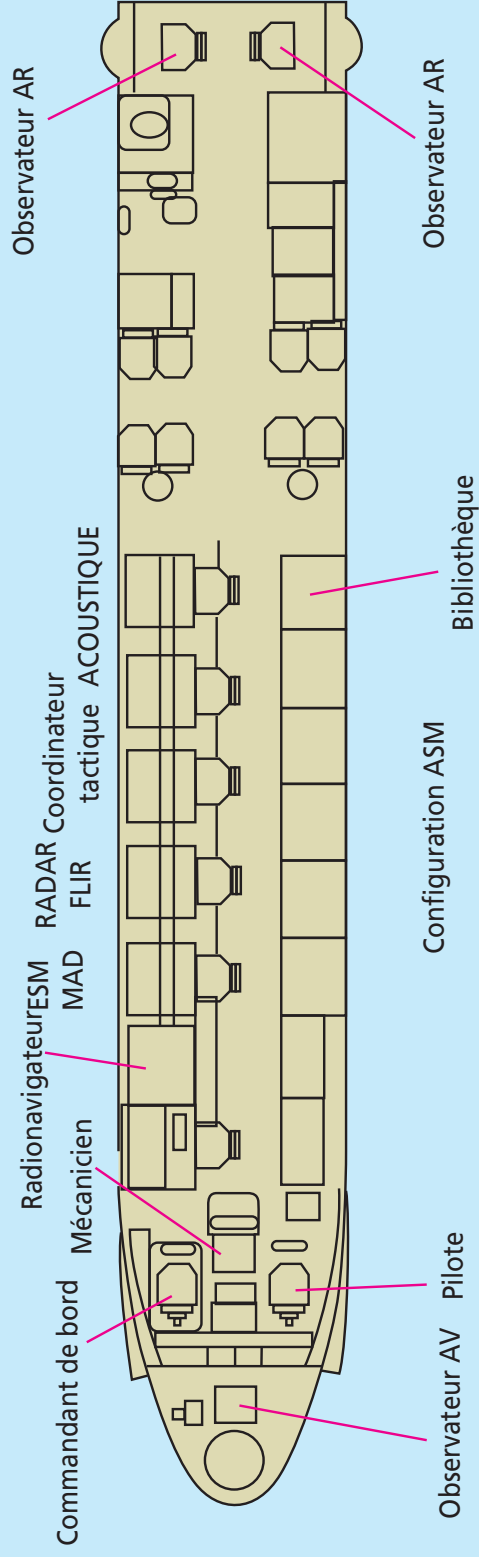
ATL 1



- 1 Observateur AV
- 2 Premier pilote
- 3 Deuxième pilote
- 4 Opérateurs bouées acoustiques
- 5 Opérateurs bouées acoustiques
- 6 Coordinateur tactique
- 7 Navigateur
- 8 Radio
- 9 RADAR
- 10 ESM, MAD
- 11 Veilleur arrière
- 12 Veilleur arrière

Configuration des postes d'équipage

ATL 2



6. SYSTÈME CENTRAL TACTIQUE

ATL 1	ATL 2
<p>Deux tables : projection de symboles lumineux par projecteurs situés sous les tables transmission des données analogiques. Conception Breguet, réalisation Crouzet.</p> <p>Table tactique Surface utile : 80 cm x 80 cm. Navigation tactique. Sept projecteurs : position avion venant du calculateur de navigation. Trajectoire de l'avion, trois vecteurs (acoustique ESM), un projecteur de tube électronique permettant de projeter trois cercles (bouées actives). Marqueur radar.</p> <p>Table de recherche Surface utile : 80 cm x 80 cm. Navigation géographique. Cinq projecteurs : un projecteur de canevas Mercator, position de l'avion. Trajectoire de l'avion, un marqueur, un vecteur (ESM). L'information aux pilotes est donnée par un IDI (relèvement et distance pour un but fixé par le coordinateur tactique).</p> <div data-bbox="178 1641 716 1989" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 20px;"> <p>Efficacité comparée des systèmes tactiques ATL 1 et ATL 2 L'efficacité se mesure par la capacité à détecter, identifier, puis classifier et poursuivre les mobiles - ou pistes - de la zone de patrouille. Dans les mêmes conditions d'environnement et activité des pistes, on peut suivre simultanément 10 pistes sur l'ATL 1 alors qu'on peut suivre 50 pistes sur ATL 2.</p> </div>	<p>Le calculateur tactique Calculateur MITRA 125X avec mémoires de masse à bulles magnétiques, relié aux deux bus de données à travers deux unités de gestion (normale et secours). Chaque sous-système est relié aux bus par un coupleur standard et un coupleur spécifique du sous-système. Les données sont exploitées essentiellement par le coordinateur tactique sur un écran cathodique de 36 cm de diamètre utile. L'opérateur radar dispose de la même console. Chaque opérateur dispose d'un terminal alphanumérique (trois au total) qui permet d'extraire les informations qui circulent sur les bus ou d'en insérer. Le commandant dispose d'une visualisation reproduisant une situation tactique résumée, sur laquelle il peut aussi recevoir l'image FLIR choisie par le coordinateur tactique. Le pilote et le commandant (secours pour lui) disposent d'un IDI comme sur l'ATL 1.</p> <p>Programmes Logiciels Logiciels de mission (dans le calculateur tactique). Programme opérationnel de vol (chargé pendant la visite pré-vol dans la mémoire de masse, ce qui permet un redémarrage rapide du calculateur en cas de déconnexion intempestive). – Réalisé par le Centre de programmation de la Marine (CPM). – Langage de haut niveau LTR2, facilitant la maintenance du logiciel. – Structure fonctionnelle modulaire (14 modules) permettant de greffer des extensions sans modifier le cœur du logiciel. Inclut le programme logiciel de maintenance intégrée du système.</p> <p>Programmes spécifiques au sol (exploitation des données tactiques et de maintenance enregistrées en vol dans la mémoire de masse). – Programmes d'analyse et de restitution au retour de la mission. – Programmes de test des équipements et des logiciels.</p> <p>Dans les calculateurs des sous-systèmes : Programmes spécifiques : aide des opérateurs permettant un fonctionnement autonome en cas de panne du système central, programmes de configuration et de mise en œuvre du sous-système, bibliothèque de renseignements, programmes de maintenance, etc.</p>

7. PILOTAGE, NAVIGATION, COMMUNICATIONS

On ne signale ci-dessous que les particularités des instruments et équipements spécifiques différents de ceux d'un avion civil.

ATL 1	ATL 2
Pilotage	
<p>Devant chaque pilote (ATL 1 ou ATL 2) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - IDI (Integrated destination Indicator). Relèvement/distance d'un but choisi par le coordinateur tactique ; - indicateur radiosonde avec alerte basse altitude. 	
<p>Pilote automatique (Sperry/SFIM) et directeur de vol (Bendix/Air Équipement).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Pilote automatique et directeur de vol intégrés (SFENA), sécurité basse altitude, en cas de panne, améliorée ; - Enchaînement automatique des buts pour décrire des figures-types (patterns).
Navigation	
<ul style="list-style-type: none"> - deux centrales de cap et de verticale AHRS Kearfott ; - un calculateur de cap SFIM alimentant les instruments de bord ; - un doppler (Canadian Marconi) ; - un calculateur de navigation Crouzet recevant les données de capteurs précédents et alimentant les tables tactique et de recherche ; - recalage de la position géographique par Loran C, remplacé plus tard par système Omega (couverture mondiale). 	<ul style="list-style-type: none"> - deux centrales à inertie ULISS 53 (SAGEM) couplées au récepteur Navstar(GPS), autonomes, ne dépendant pas, pour leur fonction propre, du calculateur central. Boîtes de commande et contrôle au radio navigateur ; - un calculateur de données aérodynamiques (Crouzet) ; - une table de navigation optique, surface utile 60 cm x 60 cm, avec cartes superposées de différents types, échelles de 1/ 50 000 à 1/ 200 000 (au poste radio navigateur), couplée aux centrales à inertie et au calculateur central.
Communications	
<p>Un V/UHF, un UHF. Boîtes de commande sur panneau central au poste pilote.</p> <p>Au poste radio :</p> <ul style="list-style-type: none"> - deux HF boîtes de commande au poste radio ; - télétype + crypteur ; - enregistreur magnétique ; - récepteur Loran C (remplacé plus tard par Omega). Voir "Navigation". 	<p>Un V/UHF, un UHF. Boîtes de commandes au poste pilote.</p> <p>Au poste radionavigateur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - deux HF boîtes de commande ; - radiotélétype et son crypteur en ligne permettant le trafic sur la liaison 14 de données tactiques OTAN ; - système liaison 11 permettant l'intégration de l'avion dans le réseau de données tactiques des grands dispositifs Marine OTAN ; - imprimante grande vitesse couplée aux communications et au calculateur central tactique ; - panneau de contrôle et scope : surveillance et traitement des messages. Mémoire auxiliaire pour enregistrement des messages.

8. ACOUSTIQUE ET SYSTÈME DE BOUÉES

Appareils primordiaux pour la lutte anti-sous-marine.

ATL 1	ATL 2
Les équipements	
<p>Ils étaient d'origine américaine, technologie 1960.</p> <p>Récepteur de bouées</p> <p>premier opérateur :</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ système "Julie", ASA-20 : analyse, sur papier, des réponses des bouées omni-directionnelles passives au largage de charges explosives spécifiques (lance-charge sur le flanc gauche) ; ↳ système AQA-1 Scope permettant l'exploitation des bouées actives (distance) ou directionnelles (relèvement). <p>deuxième opérateur :</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ système "Jezabel" AQA-5 : analyse spectrale, sur papier grande dimension, des signaux transmis par des bouées spécifiques, omnidirectionnelles. <p>Les deux opérateurs sont côte à côte, à l'avant droit du poste tactique</p>	<p>Équipements français (Thomson-CSF) répondant aux conditions de la lutte anti-sous-marine des années quatre-vingt, beaucoup plus exigeantes que celles de l'ATL 1 :</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ 4 x 4 récepteurs de bouées (99 canaux). ↳ Deux ensembles d'écoute audio haute fidélité. ↳ Deux stations identiques situées à l'arrière du poste tactique, comprenant chacune : <ul style="list-style-type: none"> – son propre système de traitement de données traitant toutes les bouées passives et actives de la panoplie OTAN ; – un système d'exploitation comprenant : <ul style="list-style-type: none"> – un enregistreur papier (4 canaux en parallèle) ; – un scope (avec mémoire de 2 pages) : 8 canaux ; – une boîte de commande digitale de configuration et de mesure ; – une boîte de commande alpha numérique. <p>Chaque opérateur placé devant sa console dispose d'une boîte de commande et d'un scope alphanumérique standard en liaison avec le système central tactique et le système de bouées.</p>
Le système des bouées acoustiques	
<ul style="list-style-type: none"> ↳ trois lanceurs électromécaniques de conception Breguet : "Norias" chargés au sol chacun de douze bouées taille A ; ↳ un lanceur universel : largage manuel après chargement en vol, capable de bouées jusqu'à la taille C ; ↳ stockage de bouées supplémentaires dans la zone non pressurisée, accessible en vol à basse altitude. <p>Les bouées de taille B ou C, mises en place au sol, peuvent être larguées à partir du portique AR dans la soute.</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ quatre antennes fouets, réception et commandes des bouées. 	<ul style="list-style-type: none"> ↳ quatre lanceurs électro-pneumatiques comportant chacun 18 tubes pour bouées taille A, sélection et commande digitales ; ↳ un lanceur rechargeable en vol en zone non pressurisée, capable de quatre bouées taille A ou F, sélection et commandes digitales ; ↳ un lanceur universel, analogue à celui de l'ATL 1 ; ↳ stockage de 36 bouées taille A, derrière le cadre 34. <p>Les bouées de taille B ou C sont larguées à partir du portique AR dans la soute (analogue à l'ATL 1).</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ quatre antennes fouets.
Radio compas	
<p>Radio compas V/UHF, avec indicateur de passage à la verticale de l'émetteur au poste pilote.</p>	<p>Radio compas V/UHF avec indicateur de passage à la verticale, équipement plus moderne et précis que celui de l'ATL 1.</p>

9. ESM ET MAD

ATL 1	ATL 2
ESM	
<ul style="list-style-type: none"> - Équipements ARAR-ARAX 10B (Thomson-CSF) ; - Bandes de fréquence S, C, X : 2,36 à 11,1 GHz ; - Adaptation d'équipements pour les bâtiments de surface. Les antennes sont groupées en haut de dérive ("arôme"). <p>Opérateur placé devant une console, à gauche, à l'arrière du poste tactique, à côté du radariste.</p> <p>Les informations de relèvements des émetteurs détectés sont transmises par l'opérateur sous forme analogique aux tables tactique et de recherche (vecteurs).</p> <p>Plus tard : installation du système ALR 8.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Antenne dans un radôme sous le fuselage, en avant du cadre 34 ; - Bande de fréquence : 0,55 à 2,6 GHz. 	<ul style="list-style-type: none"> - Équipements : ARAR 13-DR 4000 (Thomson-CSF) ; - Bandes de fréquence: 0,6 à 18 GHz ; - Antennes directionnelles dans des pods de bout d'aile ; - Couverture 360 °, sans masque de l'avion ; - Antenne omnidirectionnelle en haut de la dérive. <ul style="list-style-type: none"> - Équipement de performance très supérieure à l'équipement ATL 1, en particulier en présence d'une forte densité d'émetteurs. Détection simultanée et instantanée azimuth-fréquence ; - Console placée à droite du poste tactique entre le radio/navigateur et 1er radariste ; - Scope panoramique trois couleurs ; - Coordination azimuth-fréquence ; - Analyse de signal et poursuite automatiques ; - Propositions d'identification des types d'émetteurs (bibliothèque des cibles). <p>Transmission des données au système tactique central par le bus. L'opérateur dispose d'une boîte de commande et d'un scope alphanumérique standard.</p>
MAD	
<ul style="list-style-type: none"> - Détecteur magnétique très sensible basé sur le pompage optique ; - Développement spécial pour l'ATL 1 : DHAX 1 (CSF) placé dans un carénage plastique ("madôme") à l'extrémité arrière du fuselage ; - Boîte de commande et enregistreur spécifique au poste ESM ; - Transmission analogique de contact par l'opérateur à la table tactique (marqueur). 	<ul style="list-style-type: none"> - Détecteur magnétique ultrasensible basé sur la résonance magnétique nucléaire (IMG/Grenoble & Crouzet), placé dans un carénage plus long que celui de l'ATL 1 ; - Compensation calculée des interférences magnétiques dues à l'avion supprimant les reprises de réglage par l'opérateur ; - Boîte de commande et enregistreur spécifique au poste ESM. - Transmission commandée par l'opérateur à travers le système standard tactique.

10. RADAR ET FLIR

ATL 1	ATL 2
Radar	
<p>Équipement DRAA2 B (CSF), adapté du radar DRAA2 A de l'Alizé.</p> <p>Bande X.</p> <p>Antenne tournante, balayant 360 °, placée dans un ensemble support/radôme, escamotable, en avant de la soute d'armement (à notre connaissance, aucun autre avion ASM n'a cette configuration).</p> <p>Émission/réception IFF intégrée sur l'antenne.</p> <p>Console d'exploitation classique située à gauche dans le poste tactique. Transmission analogique des plots sélectionnés par l'opérateur vers les tables tactique et de recherche (marqueur radar).</p> <p>IFF : interrogateur NRAI 3A, répondeur APX77.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Équipement Iguane (Thomson-CSF), dérivé de l'Iguane conçu pour la modernisation de l'Alizé. – Bande I (désignation moderne de la bande X). – Installation de l'antenne pratiquement identique à celle de l'ATL 1. <p>Nouvelles fonctions :</p> <ul style="list-style-type: none"> – compression d'impulsion ; – puissance crête basse : discrétion ; – très courte longueur d'impulsion : détection de petites cibles, même par forte mer et à haute altitude. – agilité de fréquence : protection contre les brouilleurs et les retours de mer. – poursuite d'un écho en continuant le balayage (track while scan) : suivi d'un écho aidé par calculateur. <p>Console radar (scope bi-couleur identique pour le coordinateur tactique, permettant la superposition de l'image radar et de la situation tactique) placée en position optimale entre l'opérateur ESM et le coordinateur tactique.</p> <p>IFF interrogateur modes 1, 2, 3A/C, 4 associé à un décodeur effectuant :</p> <ul style="list-style-type: none"> – décodage automatique passif ou actif ; – signalisation automatique des pistes en situation d'urgence
FLIR (seulement sur l'ATL2)	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #e0e0e0;"> <p>L'ensemble des senseurs ESM, MAD, RADAR, FLIR de l'ATL 2 donne des capacités supérieures d'un ordre de grandeur à celles de l'ATL 1, en particulier en cas de situation tactique chargée ou face à des menaces discrètes, fortement défendues et très manœuvrantes.</p> </div>	<p><i>Reconnaissance et identification d'objectifs de surface, de jour comme de nuit à des distances sans risques.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Équipement TANGO (TRT). – Caméra infrarouge placée dans une tourelle sphérique située sous le bulbe avant. <p>Couverture en azimut : 200 °.</p> <ul style="list-style-type: none"> – Stabilisation de grande précision en azimut et en site. – Deux focales : petit champ et grand champ. – Pointage automatique, par calculateur, d'une cible sélectionnée. – Scope avec zoom plein écran, situé au-dessus et entre les postes radar et coordinateur tactique. – Enregistreur vidéo avec capacité de retour en arrière (play back) en vol.

11. VEILLE VISUELLE, PHOTO

ATL 1	ATL 2
<p>Trois postes d'observateurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Poste avant : <ul style="list-style-type: none"> – dans le bulbe en plexiglas : visibilité en gisement : $\pm 120^\circ$, en site : $>90^\circ$ vers le bas ; – dispositif optique de visée. Transmission du gisement par liaison analogique aux vecteurs des tables tactiques et de recherche ; – top de passage à la verticale vers le marqueur de la table tactique ; – caméra portative permettant photos "à l'opportunité". • Deux postes à l'arrière : <ul style="list-style-type: none"> – devant des hublots-bulbes en plexiglas. Visibilité en gisement : 180° de chaque côté, en site vers le bas : $> 90^\circ$. Chaque observateur dispose de jumelles Wild sur support permettant des mouvements en rotation horizontaux et verticaux. – transmission analogique du gisement à un vecteur sur la table tactique. • Lance-cartouches éclairantes pour visibilité de nuit situé sur flanc gauche du fuselage arrière. • Pod photo, sous un des points d'emport sous l'aile, qui comporte plusieurs configurations de caméras. • Le copilote dispose d'un petit viseur latéral permettant le déclenchement plus précis des caméras du pod. 	<p>Trois postes d'observateurs, comme dans l'ATL 1, mais ils n'utilisent que des jumelles portatives. Installation de caméras fixes dans l'avion.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caméra avant latérale oblique dans le nez avec hublot particulier (focales de 75, 150, 300 mm) : <ul style="list-style-type: none"> – commande par les pilotes ou l'observateur avant ; – annotations automatiques sur film commandées par le calculateur. • Caméra verticale arrière installée dans la partie AR du fuselage : <ul style="list-style-type: none"> – fonction reconnaissance et enregistrement des résultats de tirs ou largages d'armes (focales 75, 150, 300 mm). – contrôle automatique de l'ouverture et compensation du déplacement de l'avion ; – commande : par les pilotes ou par l'observateur avant mais aussi automatique, par le calculateur, en cas de largage d'armes ; – annotations automatiques comme pour caméra avant. • Lance-cartouches éclairantes : analogues à l'ATL 1.

12. ARMES ET CHARGES

ATL 1	ATL 2
La soute	
<p>Grandes dimensions : 9 m x 2,1 m. Portes coulissantes donnant le minimum de perturbations aérodynamiques quand elles sont ouvertes. Trois portiques coulissant sur des rails latéraux :</p> <ul style="list-style-type: none"> - les deux portiques avant portent les armes anti-sous-marines (torpilles, grenades) ; - le portique arrière reçoit les bouées de taille B ou C. 	<p>Configuration générale identique à l'ATL 1, mais 3 variantes, du fait de la mission anti-surface.</p> <ul style="list-style-type: none"> - mission ASM semblable à l'ATL 1 ; - mission anti-surface : deux missiles AM 39 (supportés par trois portiques adaptés) ; - mission mixte : armes ASM sous portique avant, un missile AM 39 sous deux portiques à l'arrière.
Sous l'aile	
<p>Quatre points d'emports capables d'une charge maximum de 500 kg : quatre missiles AS 12 (guidage par fil ; petit manche de commande à l'observateur AV et au copilote) ou quatre missiles MARTEL (anti-radars).</p>	<p>Deux points internes capables de 1 000 kg. Deux points externes capables de 750 kg.</p> <p>Armes diverses possibles.</p>
Les lance-charges	
<p>Les lance-charges :</p> <ul style="list-style-type: none"> - lance-charges explosives (système JULIE) flanc avant gauche du fuselage central ; - lance-marqueurs (colorants ou fumigènes) à l'arrière du fuselage central sur les flancs ; - canon rétro-lanceur, à l'avant du fuselage AR (verticale détection MAD). <p>Lance cartouches éclairantes (voir § Veille visuelle. Photo). Lance bouées (voir sous-système Acoustique).</p>	<p>Les lance charges de fonctionnalité analogues à ceux de l'ATL 1, sont adaptés aux technologies numériques de contrôle et commande.</p>
Commandes et contrôles	
<p>Les commandes et contrôles des armes et charges sont essentiellement au poste coordinateur tactique ; technologie analogique.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fonctions contrôlées par calculateur : l'inventaire et la configuration des armes et charges ainsi que les largages sont normalement sous le contrôle du calculateur central (mode on-line) avec possibilité de secours manuel (mode off-line). • Calcul continu du point de largage et données de guidage pour le largage automatique d'une torpille. • Calcul et transmission des données pour désignation du but aux missiles AM 39 et affichage de la zone de tir possible.
Chaînes SAR (sauvetage en mer)	
<p>La grande dimension de la soute permet d'emporter en mission SAR quatre chaînes SAR par portique soit en configuration courante (portique AV et portique AR) huit chaînes, et en configuration maximale douze chaînes. Comme la Marine utilise des chaînes N3 d'une capacité de 30 places, la capacité totale est de 360 naufragés !</p>	<p>Même capacité que l'ATL 1.</p>

13. MAINTENANCE, AIDE AUX UTILISATEURS

ATL 1	ATL 2
Maintenance	
<p>Bancs de tests individuels par sous-système et équipements.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Pas d’opérations de maintenance à des dates imposées du fait de MTBF élevés. – Bancs de tests automatiques (ATE) dans chaque base. – Logiciel de maintenance intégrée et concept BITE fournissant la localisation de l’unité remplaçable en ligne (LRU) sur l’avion, au sol et en vol, sans besoin d’équipements de test spécifiques.
Aide aux utilisateurs	
<ul style="list-style-type: none"> • Entraînement : <ul style="list-style-type: none"> – simulateur de vol (fuselage avant poste fixe) ; – simulateur tactique : ensemble de la partie tactique, sans le poste de pilotage. • Exploitation de mission : exploitation des échanges vocaux entre opérateurs enregistrés sur magnétophone de bord. • Centres d’analyses, spécialisés pour ESM et acoustique, exploitation des enregistrements spécifiques à ces sous-systèmes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Entraînement : <ul style="list-style-type: none"> – simulateur de vol mobile (6 degrés de liberté) ; – simulateur tactique complet y compris pilotes. • Préparation de mission : le logiciel opérationnel de la mission chargé dans le calculateur central permet de faire la visite pré-vol en 20 minutes. • Exploitation de la mission : au retour de l’avion, on dispose de l’enregistrement des données opérationnelles et de l’enregistrement des données de maintenance. • Centre tactique d’analyse complètement informatisé et protégé.

ARMÉE DE TERRE⁽¹²⁾

HÉLIPTÈRES



Gazelle et Tigre correspondent à deux générations successives d'hélicoptères pour l'armée de Terre française. Ils ont d'ailleurs en commun la mission antichar et le même missile (HOT), mais leurs caractéristiques sont très différentes, et pas seulement à cause du décalage dans le temps (vingt-cinq à trente ans suivant les repères considérés).

Il s'agit en fait de classes d'hélicoptères ayant peu de points en commun, car le premier s'inscrit dans la lignée d'hélicoptères légers (Alouette), tandis que le second est dès le départ conçu pour être un hélicoptère de combat très sophistiqué.

Pour ce qui nous intéresse ici, la différence est particulièrement flagrante : équipements séparés pour Gazelle, systèmes d'armes très élaborés, proches de l'avion de combat, pour Tigre.

(12) Texte préparé par Marcel Cado

GAZELLE

La Gazelle a été conçue pour prendre la relève de l'Alouette II qui avait connu un grand succès commercial. C'est dans cet esprit que Sud-Aviation a étudié un nouvel appareil, de même classe, modernisé, dans les années 1965. Cet appareil a ensuite été inclus dans la coopération franco-britannique (avec le SA 330 et le WG 13). Il répondait au besoin d'hélicoptère léger d'observation, avec notamment pour missions :

- reconnaissance ;
- liaison ;
- observation ;
- PC volant ;
- support d'armement léger ;
- support d'armement antichar ;
- évacuation sanitaire ;
- transport de fret léger.

Différentes versions ont été réalisées suivant les utilisateurs. On ne reprendra ici, à titre d'exemple, que les versions ALAT.

SA 341 (Astazou IIIC)

- ↳ Système d'augmentation de stabilité SFENA (SAS).
 - ↳ Équipement radio.
 - ↳ Lunette de visée ATHOS APX 334.
 - ↳ Viseur SFOM 80 ou T 200.
 - ↳ Armement : missiles HOT (2x2) canon de 20 mm.
- Cette version a été livrée à l'ALAT en 1971.

SA 342 (Astazou XIV M) mêmes équipements mais avec certains ajouts.

- ↳ Pilote automatique SFIM 85 G.
 - ↳ Navigation autonome.
 - ↳ Variante antichar nuit avec viseur nuit : viseur VIVIANE (Euromissile).
- Cette version a été livrée à l'ALAT en 1980.

TIGRE

Le Tigre a été conçu dès le départ pour être un hélicoptère de combat, dont une des caractéristiques essentielles devait être l'aptitude à la manœuvre et au combat de nuit. En effet, il devait être capable de contrer une attaque massive en provenance de l'Est. Cette caractéristique était à la base de la coopération franco-allemande sur le programme.

Cependant, pendant près de dix ans, des divergences d'appréciation entre les deux pays, concernant notamment le choix de l'optronique (américaine ou européenne) et le choix de la formule (tandem ou côte à côte) ont retardé le lancement effectif de l'opération. Dans ses grandes lignes, la définition de base a été acquise seulement en 1987.

La France, qui avait soutenu la formule tandem et l'optronique européenne, avait obtenu gain de cause. Elle avait été également à l'origine de la demande d'une version HAP (appui-protection), à côté de la version antichar (PAH2/HAC) demandée par les deux pays. Depuis, la menace extérieure a évolué, donnant plus d'importance, auprès des utilisateurs, à la version HAP.

1. LE SYSTÈME D'ARMES

Le système d'armes a été conçu autour de manière à faciliter l'adaptation aux différentes missions appui-protection et antichar. Il comporte : un système de base ; un système spécifique de la mission.

1.1. Le système de base

Le système de base comporte un calculateur central très performant, doublé pour des raisons de sécurité, qui permet de gérer et d'optimiser les données nécessaires aux principaux sous-systèmes :

- commande et présentation des informations à l'équipage ;
- navigation autonome (centrale strap-down à gyrolasers) ;
- pilotage automatique ;
- protection antimissile et antiradar ;
- avec un bus conforme au standard américain MIL 1553 B, l'ensemble bus/sous-systèmes étant également doublé. Sur ce bus double viennent se connecter deux terminaux, pour permettre l'interface avec les sous-systèmes non directement connectables au bus, tels que radiocommunication et servitudes (hydrauliques, électricité, circuit carburant...).

1.2. Le système spécifique

Le système spécifique de la mission (MEP) permet de s'adapter aux deux missions principales du Tigre, appui-protection et antichar.

Pour l'armée de Terre française, les deux versions du Tigre doivent couvrir les domaines suivants :

- appui-feu des unités au sol ;
- protection des hélicoptères ;
- reconnaissance armée ;
- lutte antichar.

Ces missions doivent s'accomplir de jour comme de nuit, y compris en conditions de visibilité réduite, en évoluant en vol tactique au milieu des obstacles caractéristiques du terrain. Les systèmes comportent la reconnaissance automatique d'emport des armements.

Équipement de mission HAP

- ↳ Tourelle canon de 30 mm à grand débattement.
- ↳ Missile air-air MISTRAL (4).
- ↳ Roquettes.
- ↳ Visionique de tir avec viseur principal de toit, comprenant : viseur clair HUD pilote ; viseur de casque ; caméra thermique ; TV ; voie optique directe ; télémètre optique.
- ↳ Pilotage de nuit par intensificateurs de lumière.
- ↳ Conduite de tir.

Les informations du viseur de toit, à travers ses différentes voies, permettent la détection et l'identification de la cible ; des calculateurs assurent la prédiction de la trajectoire de la cible et celle de la munition utilisée, et donnent les ordres d'asservissement au canon et ceux de pilotage pour l'équipage.

Équipement de mission HAC

- ↳ Système AC3G (antichar 3e génération) (prévu à l'origine et abandonné par la suite).
- ↳ Armement HOT ou TRIGAT (6 ou 8).
- ↳ Missile air-air MISTRAL ou STINGER (4).
- ↳ Visionique de tir avec viseur de mât, comprenant : caméra thermique (infrarouge IRCCD) ; caméra TV ; télémètre laser ; écartométrie HOT.
- ↳ Visionique de pilotage : caméra IRCCD ; viseurs/visuels de casque.

Les informations du viseur de mât sont transmises par liaison numérique aux postes de tir et au système de mission qui intègre les calculateurs de guidage et de poursuite du missile, ainsi que les autotests nécessaires à la maintenance du système. Cette architecture permet de faciliter l'évolution ultérieure du système et la prise en compte des progrès technologiques, sans dégrader le fonctionnement des sous-systèmes de base.

Principaux fournisseurs

Équipements de mission HAP

- ↳ Viseur principal de toit : SFIM-SAGEM.
- ↳ Viseur clair HUD pilote : THALES.
- ↳ Viseur de casque : THALES.
- ↳ Caméra thermique TV, voie optique directe : SFIM-SAGEM.
- ↳ Contre-mesures : THALES.
- ↳ Lance-leurres : THALES.

Équipements de mission HAC

- ↳ Viseur de mât : SFIM-SAGEM.
 - ↳ Viseur de casque : THALES.
 - ↳ Caméra thermique TV : SFIM-SAGEM.
- Tous les algorithmes de la conduite de tir sont EUROCOPTER.

2. CALENDRIER

- ↳ Signature de l'accord intergouvernemental : novembre 1987.
- ↳ Lancement de l'étude du système d'armes : décembre 1988.
- ↳ Premier vol : avril 1991.

Le premier hélicoptère TIGRE de série a effectué sa sortie d'usine chez Eurocopter en mars 2002. Il s'agissait d'un appareil destiné à l'armée allemande, en configuration UHT (Unterstützungs Hubscharauber Tiger, hélicoptère Tigre d'appui au combat) dont les missions ne sont plus exclusivement antichar (initialement PAH2).

Pour l'armée de Terre française, les premiers hélicoptères de série seront livrés en version HAP et les suivants en version HAC.

3. CONCLUSION

En termes de systèmes d'armes, le contraste est saisissant entre les deux générations d'hélicoptères, Gazelle et Tigre.

Avec le Tigre, on assiste à l'arrivée d'une nouvelle formule d'hélicoptère de combat, apte à de multiples missions et surtout capable d'opérer en vol tactique, de jour comme de nuit et par mauvaises conditions météorologiques, d'où l'importance prise par les systèmes et les équipements les plus sophistiqués. D'où l'importance aussi, comme pour les avions de combat, des possibilités d'évolution dans le temps, avec des standards successifs. D'où également l'importance toujours plus grande des facteurs humains (ergonomie, formation et entraînement).

AVIONS CIVILS

LA FAMILLE AIRBUS, DE L'A 300 À L'A 340

LA FAMILLE DES AVIONS FALCON

Le cas des avions civils n'a pas été traité par une suite de monographies, comme les aéronefs militaires. On s'est limité à illustrer l'évolution des systèmes dans le cas de la famille Airbus, de l'A 300 à l'A 340 et de la famille Falcon, ces exemples pouvant être considérés comme représentatifs des tendances qui se sont manifestées dans cette période.

LA FAMILLE AIRBUS⁽¹³⁾

LES AVIONS DE TRANSPORT CIVIL AIRBUS DE L'A 300 B2-B4 À L'A 340

1. INTRODUCTION

Durant la période 1960-2000, le transport aérien a dû constamment s'adapter pour faire face au nombre croissant de passagers (+4 % chaque année au niveau mondial), à la pression continue pour abaisser les coûts d'exploitation et enfin à l'amélioration du niveau de sécurité des vols.

Des transformations techniques majeures se sont imposées comme, par exemple :

- l'avènement des avions de très grande capacité à partir des années soixante : B 747, DC 10, L 1011 ;
- l'adoption de l'équipage à deux pour tout type d'avion à partir des années quatre-vingt ;
- la généralisation de la formule bimoteur et l'augmentation de ses capacités opérationnelles transocéaniques ;
- la percée des avions à réaction dans le transport régional.

Dans le même temps, l'avionique s'est considérablement transformée ; des systèmes nouveaux sont apparus, les fonctions sont devenues plus complexes et leur intégration s'est continûment développée. Citons pour exemple les transformations majeures suivantes :

- la capacité de vol automatique depuis l'envol jusqu'à l'atterrissage ;
- la généralisation de la fonction Gestion du Vol ;
- les planches de bord à écrans couleur (tubes cathodiques puis LCD) ;
- l'inertie à gyromètre laser ;
- l'obligation d'emport de systèmes de type "filets de sauvegarde" tels que l'anti-abordage entre avions (TCAS), la protection contre les cisaillements de vent, l'anti-collision sol.

Les progrès des systèmes avioniques ont été rendus possibles grâce à la disponibilité de technologies nouvelles telles que :

- la technologie numérique permettant la sophistication et l'intégration des fonctions ;
- les technologies de visualisation par tubes cathodiques couleur puis matrices à cristaux liquides, permettant une progression de l'interface homme-machine ;
- l'avènement des systèmes satellitaires pour la navigation (GPS) et la communication (SATCOM).

L'évolution de l'avionique entre les années soixante et 2000 sera illustrée principalement en considérant deux systèmes majeurs : d'une part, l'ensemble de conduite automatique et de gestion du vol et, d'autre part, le système de visualisation cockpit de la famille Airbus.

Les évolutions des méthodes de développement et de certification seront également abordées.

(13) Texte de Jean-Luc Sicre (directeur technique Avionique civile chez Thales Avionique).

2. DE L'ANALOGIQUE AU NUMÉRIQUE

2.1. La génération analogique (conduite automatique du vol)

Jusqu'aux années quatre-vingt, à quelques exceptions, les calculateurs de bord étaient réalisés en électronique analogique.

Ainsi, le pilote automatique du Boeing 707 utilisait des amplificateurs à lampes. Au début des années soixante-dix, les pilotes automatiques analogiques du Concorde et de l'Airbus A 300 B2/B4 tirent parti de nouveaux composants, les amplificateurs opérationnels, qui amènent un gain appréciable en poids/volume et fiabilité.

Néanmoins, le système de conduite automatique de vol de l'Airbus B2/B4 ne compte pas moins de 17 calculateurs (figure 1) pour remplir les fonctions suivantes :

Pilote automatique/directeur de vol

- auto-manette ;
- calculateur de régime moteur limite ;
- directeur de vol décollage ;
- trim de profondeur ;
- stabilisateur de lacet ;
- tests de sécurité.

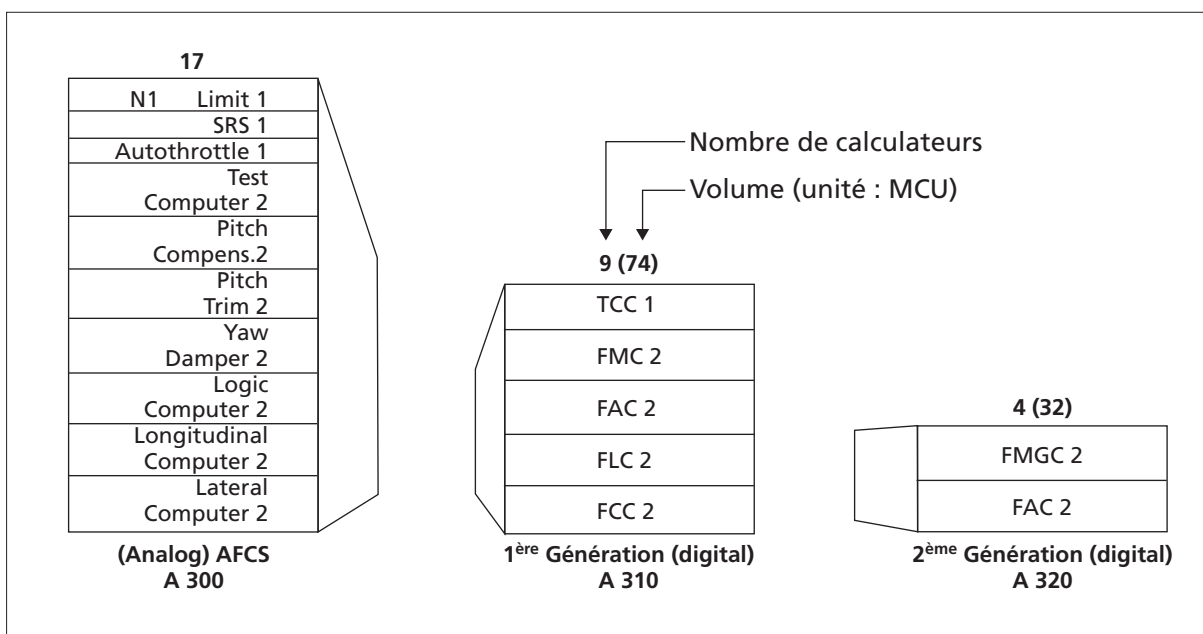


Figure 1. Évolution des volumes d'électronique pour la fonction Conduite automatique et gestion du vol

Le système comprend quatre voies de calcul distinctes pour les fonctions critiques ; il est certifié pour les atterrissages automatiques en catégorie 3 (opération sans visibilité).

En ajoutant aux 17 calculateurs, les postes de commandes, les servomoteurs et divers composants, on arrive à un total de 45 éléments pour l'ensemble de conduite automatique du vol de l'A 300.

2.2. L'avènement du numérique

Au début des années quatre-vingt, la technologie numérique remplace l'analogique pour la réalisation des principaux calculateurs et postes de commande embarqués. Le basculement s'opère à l'occasion du programme Airbus A 310 en Europe et des programmes Boeing 767 et 757 aux États-Unis.

Cette nouvelle technologie promet un gain de poids considérable, une fiabilité accrue, des rechanges moins nombreux et moins chers et une maintenance facilitée.

Début quatre-vingt, les puissances de calcul des microprocesseurs, les capacités mémoires et la maturité des produits disponibles sur le marché rendent possible la numérisation des grandes fonctions avionique civile. De plus, des travaux normatifs menés au préalable aux États-Unis (ARINC et RTCA) et en Europe (EUROCAE) facilitent cette mutation, en particulier :

- la norme ARINC 429 définissant en détail un bus numérique unidirectionnel de communication standardisant les échanges entre boîtes ;
- le document conjoint RTCA/EUROCAE (DO178/ED12A) traitant de la certification des logiciels embarqués.

À partir de 1980, les possibilités croissantes des techniques numériques sont à la base de la progression de l'avionique et de l'intégration des systèmes de conduite de vol et de gestion du vol. La figure 2 donne un aperçu des progrès, sur quinze ans, des performances des microprocesseurs embarqués et de l'intégration des mémoires programmables.

La *figure 1* présente l'évolution du volume d'électronique assurant les fonctions conduite automatique du vol et gestion du vol pour les avions :

- Airbus A300 B2/B4 (analogique : 1er vol en 1972) ;
- Airbus A310 (1^{ère} génération numérique : 1er vol en 1982) ;
- Airbus A320 (2^e génération numérique : 1er vol en 1987).

Le gain obtenu en quinze ans sur le nombre de calculateurs et le volume associé est spectaculaire ; il progresse à chaque nouvelle génération d'avion.

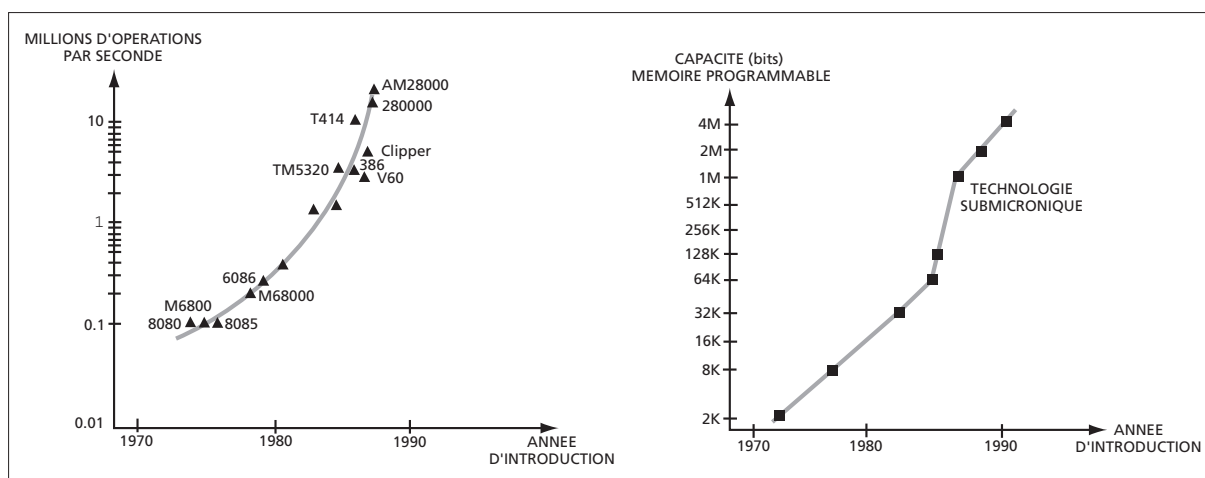


Figure 2. Microélectronique numérique. Performances des microprocesseurs et des mémoires

Première étape : de l'A 300 à l'A 310

Ici, le progrès provient essentiellement de l'intégration rendue possible par la numérisation des calculateurs du système de conduite automatique de vol ; par exemple, une seule boîte numérique (FCC) remplace quatre boîtes analogiques (PA latéral, PA longitudinal, PA logique et directeur de vol de décollage), et une autre boîte (FAC) regroupe les fonctions de trim de profondeur et d'amortisseur de lacet.

Une comparaison établie par l'avionneur en 1983 donne les valeurs suivantes à performances et fonctions égales (donc excluant du périmètre le FMS – calculateur de gestion du vol – qui apparaît seulement à partir de l'A 310).

Paramètres	A 300	A 310
Total d'éléments du système	45	29
Poids total (Kg) hors câblage	313	200
Câblage n(Kg)	142	128
Consommation (Watts)	1700	550
Volume d'électronique (litres)	195	88
MTBF global (heures de vol)	138	381
Number de composants élémentaires	32000	16000

La première génération numérique apporte un gain appréciable dans tous les domaines ; les coûts de maintenance diminuent fortement puisqu'il faut moins de rechanges pour des matériels plus simples (370 types de cartes analogiques contre 75 en numérique) ; une fonction de test intégrée propre au système permet d'isoler tout élément en panne et aussi de procéder au sol à des tests d'intégrité de l'ensemble de la conduite du vol.

Deuxième étape : de l'A 310 à l'A 320

Le gain est à nouveau très important et s'explique par :

- la décision d'intégrer dans un même calculateur (le FMGC) les fonctions pilote automatique, gestion du vol (FMS) et contrôle de poussée. L'architecture retenue est multiprocesseurs ; elle est intégrée avec l'ensemble commandes de vol électrique de l'A 320. Le système FMGS permet le contrôle automatique permanent de la vitesse, de la trajectoire latérale et de la trajectoire verticale calculées par le FMS ; le mode normal d'opération de l'avion est l'"auto-control" ; il est surpassable par action sur le poste de commande du pilote automatique, ce qui permet d'imposer des contraintes à court terme sur trajectoire ou vitesse ;
- les nouveaux progrès d'intégration de la technologie numérique. Deux éléments nouveaux contribuent à diminuer le volume d'électronique : la mise à portée des équipes d'étude d'une CAO (conception assistée par ordinateur) permettant le développement de circuits très intégrés prédiffusés ; les techniques d'assemblage des composants électroniques miniaturisés grâce à l'avènement des composants montés en surface (CMS).

Troisième étape : de l'A 320 à l'A 340.

Les FAC sont supprimés et leurs fonctions réparties entre FMGEC et commandes de vol électriques ; d'où à nouveau un gain de deux calculateurs.

Évolution globale de l'électronique sur les programmes Airbus

Pour le même ensemble de grandes fonctions, la figure 3 présente le volume d'électronique installé depuis le B2/B4 jusqu'à l'A 320. Ce volume est exprimé en équivalent MCU (unité modulaire standardisée d'environ 1,6 litre).

Systèmes	A 300	A 310	A 320
Commandes de vol	16,4	39,4	56
Pilote automatique et gestion du vol	138,9	75,4	44
Anémométrie, gyroskopie, accéléromètres, inertie	62,6	47,9	38,1
Radio NAV/COM	80	52,7	77,2
Radar météo	31,6	20	20
ATC	9,2	16	23,5
Conduite systèmes, visualisations, interface équipage machine	115,9	194,9	180,6
Maintenance embarquée	35,3	35,1	37,8
TOTAL (MCU)	489,9	481,4	473

Figure 3 : Évolution de l'électronique sur les programmes AIRBUS.

Résultat inattendu : le volume total reste pratiquement constant, malgré une intégration de plus en plus poussée. Ceci s'explique par la transformation de certaines fonctions (exemple des commandes de vol électriques) ou par la complexification de certaines autres telles que les visualisations électroniques. La diminution spectaculaire du PA/FMS et de la baro inertie contrebalance les augmentations sur les autres systèmes.

3. ÉVOLUTION DES VISUALISATIONS DU COCKPIT

3.1. De l'analogique au numérique

Dans les années soixante-dix, les cockpits d'avions civils sont constitués d'un grand nombre d'indicateurs, d'instruments et d'organes de commande électromécaniques qui occupent la quasi-totalité de la planche de bord, du pylône, du panneau plafond et d'une partie des panneaux latéraux. Les postes de pilotage analogiques ont un aspect dense et complexe (*voir figure 4 : cockpit Caravelle*) et sont conçus pour un équipage à trois : deux pilotes et un mécanicien.

La disponibilité simultanée de la technologie numérique et de tubes cathodiques suffisamment lumineux va permettre le remplacement des principaux instruments électromécaniques de pilotage par des visualisations plus intégrées et aussi d'introduire des informations d'alarme et d'état de système sous une forme nouvelle.

Cette avancée adoptée au début des années quatre-vingt sur Airbus A 310 et sur Boeing 757/767, associée à d'autres nouveautés telles que l'introduction du FMS, permet de passer en équipage à deux sur ces avions gros porteurs.



Figure 4 : Cockpit Caravelle

3.2. Les visualisations à tubes cathodiques Airbus

Sur l'A 310 apparaît un système de visualisation (EFIS) constitué de six écrans couleur shadow mask, de trois calculateurs et des postes de commandes associés qui fournissent les informations basiques de pilotage et de navigation pour pilote et copilote et des synoptiques sur l'état des systèmes avion et sur les alarmes.

L'interface homme-machine est significativement améliorée et de nouvelles fonctions sont réalisables telles que la présentation de cartes graphiques simples et de schémas systèmes. La surface utile de chaque écran est de 5"x5".

La simplification de la planche de bord de l'A 310 (figure 5) par rapport à un cockpit analogique est évidente bien que les indicateurs moteur de la zone centrale restent électromécaniques.



Figure 5 : Cockpit A 310 à 6 visualisations CRT 5"x5"

Pour l'A 320, l'adoption du mini-manche placé en position latérale libère totalement la visibilité de la planche de bord, ce qui permet un nouvel arrangement des six tubes cathodiques (voir figure 6) ; leur surface utile passe à 6''x6''.



Figure 6 : Cockpit A 320 à visualisations CRT 6''x6''

En fonctionnement normal le système de visualisation présente :

- les informations de pilotage et de navigation – dont les routes FMS – sur 2 surfaces disposées côte à côte devant chaque pilote ;
- les paramètres moteurs, les quantités de carburant et les messages d'alerte sur la surface centrale supérieure ;
- les synoptiques et l'état des systèmes avion sur la surface centrale inférieure.

Une logique de reconfiguration permet de conserver les fonctions essentielles en cas de panne d'une ou plusieurs visualisations.

Dans cette définition, le système de visualisation devient un élément majeur du cockpit civil.

L'implantation des visualisations A 320 sera reconduite pour la famille A 330/A 340, ce qui contribuera à réduire considérablement la durée des entraînements des équipages pour passer d'un type avion à un autre (concept *Cross Crew Qualification*).

3.3. Avènement des matrices à cristaux liquides

Introduites en 1994 sur le Boeing 777 et en 2001 sur Airbus, les matrices actives à cristaux liquides (AM LCD) remplacent les tubes cathodiques (CRT) ; cette nouvelle technologie apporte un gain en poids, volume, et fiabilité, améliore la lisibilité, et permet de générer des images plus complexes.

La figure 7 donne un aperçu des capacités graphiques des technologies successives.

Les matrices à cristaux liquides permettent la réalisation simple d'images vidéo ou d'images perspectives complexes 3D.

Les matrices LCD amènent une réduction de coût de possession significative (voir figure 8) ainsi qu'une amélioration de fiabilité dans un rapport supérieur à 2.

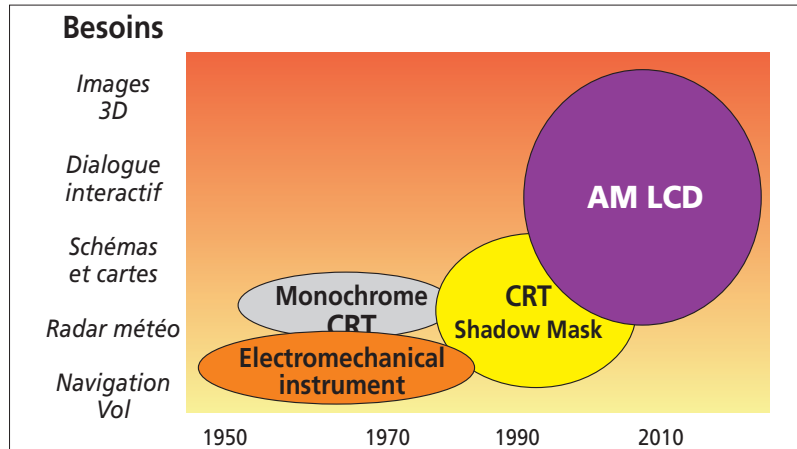


Figure 7 : Évolutions technologiques en fonction des besoins

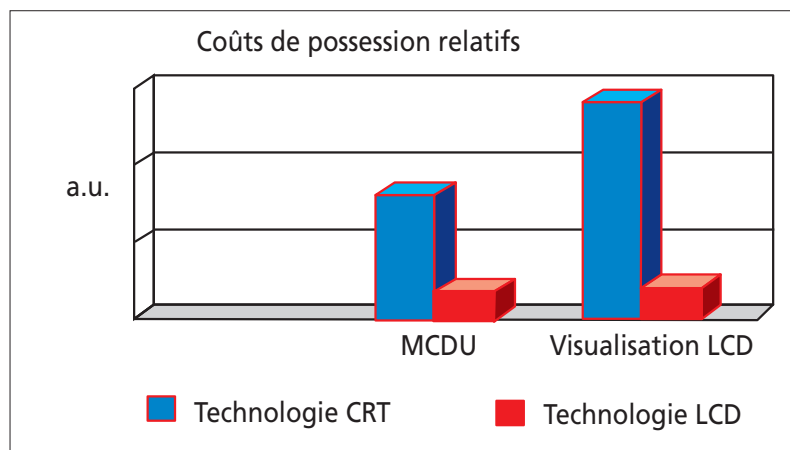


Figure 8 : Coûts de possession relatifs, selon la technologie CRT ou LCD, du panneau Multiple Control Display Unit et de la planche de bord

3.4. Intégration des instruments de secours

L'étape ultime du remplacement des instruments électromécaniques par des écrans LCD intervient au début des années 2000 par le remplacement des instruments de secours : horizon, altimètre, anémomètre, par un instrument intégré constitué d'un écran LCD d'une centrale de verticale à composants liés et de capteurs de pression solid state rassemblés dans un même boîtier installé à la place de l'ancien horizon de secours (*voir figure 9*).

Ainsi aujourd'hui, la planche de bord d'un A 340-600 ou d'un B 777 est entièrement LCD.



Figure 9 : Indicateur combiné de secours.

4. LE DÉVELOPPEMENT DES LOGICIELS EMBARQUÉS

L'importance du volet Logiciel dans les développements d'avionique, en terme de risques, coûts et certification n'est plus à démontrer.

Dans ce domaine spécifique, les évolutions ont été nombreuses.

4.1. La croissance des logiciels

L'augmentation de la puissance des microprocesseurs ouvre la voie à la sophistication des fonctions – ou à l'introduction de nouvelles fonctions – ce qui induit une croissance continue des logiciels d'application.

Ainsi, entre l'A 310 et l'A 320 (soit à cinq années d'intervalle) le logiciel d'une même fonction, la conduite automatique du vol, augmente considérablement (*voir figure 10*), soit :

- multiplication par 3,6 de la mémoire programmée (Ko) ;
- multiplication par 2,4 des lignes de code source.

	Mémoire programmée (kilo octets)	Lignes de code source	Nombre de modules
A310	135	27 500	233
A320	489	65 200	422

Figure 10 : comparaison des logiciels A 310 et A 320.

Une progression encore supérieure sera enregistrée entre A 320 et A 330/340.

La durée totale de développement du logiciel étant invariante d'un programme avion au suivant (trente-cinq mois environ), il a fallu trouver les outils et méthodes adaptés pour maîtriser coûts⁽¹⁴⁾, qualité et délais dans ce contexte d'inflation.

4.2. Le développement du Génie logiciel

Au début du numérique (A 310 en 1980), les outils de développement sont rudimentaires et se réduisent aux stations de travail fournies par le constructeur de microprocesseur cible. Une partie des tâches est automatisée mais les possibilités de gain de productivité sont faibles.

Les premiers outils conçus pour augmenter la productivité logicielle sont introduits pour le développement du pilote automatique A 320 et ils concernent la génération automatique de code et la gestion de configuration.

L'outil de génération automatique produit directement des programmes à partir de spécifications provenant de l'avionneur et exprimées dans un langage graphique particulier. Ce procédé réduit significativement les temps de développement, de mise au point et de test, et minimise les risques d'erreurs. Il est basé sur une étroite coopération entre équipementier et avionneur. L'outil de gestion de configuration permet un suivi précis des évolutions de chaque module et des versions livrées.

Pour l'A 340, l'interface entre avionneur et fournisseur s'est renforcée en automatisant le transfert des spécifications, conduisant à une réactivité accrue et à l'élimination d'erreurs de saisie.

(14) La formule de Putnam estime que le coût du logiciel varie suivant le cube de la taille en lignes de code, toutes choses égales par ailleurs.

4.3. Aspects certification et sécurité

Les méthodes classiques de démonstration de sécurité n'étant pas envisageables pour les logiciels, la communauté aéronautique internationale s'est entendue à la fin des années soixante-dix pour ouvrir de nouvelles voies.

Ainsi, pour chaque logiciel embarqué contribuant à une fonction, il est déterminé un « niveau minimum de qualité en développement » fonction de la gravité des pannes ou des erreurs associées à ce logiciel ; quatre niveaux sont définis, le niveau 1 étant le plus sévère (associable à la criticité « catastrophique »).

À chaque niveau de qualité en développement correspond l'application de processus qualité plus ou moins contraignants qui sont définis dans le document de référence ED-12B/DO-178B défini conjointement par l'EUROCAE (Europe) et le RTCA (États-Unis).

Ce document développe principalement une approche “processus de développement” mais autorise aussi des approches de substitution telles que :

- tests exhaustifs des données d'entrée,
- versions de programmes dissimilaires.

Les autorités de certification participent directement au processus d'approbation du logiciel ; en France, l'expertise de certification logicielle est assurée par le CEAT depuis le programme A 310.

LA FAMILLE DES AVIONS FALCON⁽¹⁵⁾

Depuis l'introduction du Mystère 20, premier avion d'affaires certifié en France et aux États-Unis en 1965, une amélioration continue a été réalisée grâce aux progrès de la technologie et de la connaissance du vol. Cependant une philosophie directrice a toujours guidé cette recherche et est à l'origine du concept de "famille Falcon".

Ainsi, ces avions ont toujours été conçus à partir du concept "pilote dans la boucle" plutôt que d'une recherche du tout automatique dont l'usage peut devenir ardu en cas de configuration dégradée. Les pilotes disposent à tout moment, de la manière la plus claire et la plus simple possible, des informations juste nécessaires au bon déroulement de leur vol, de l'état de la machine et des commandes pour exécuter sans délai les actions adéquates, en configuration normale comme après panne. Un effort de conception particulier a toujours présidé à la définition de l'architecture des systèmes et au dessin de la planche de bord vers plus de simplicité, de clarté afin de faciliter la mise en œuvre et l'emploi, et réduire ainsi la charge de travail de l'équipage. Les avis des pilotes et les leçons apprises en utilisation sur les avions précédents sont pris en compte dans la définition, dès l'origine.

Une caractéristique particulière à l'aviation d'affaires doit également être soulignée : cet avion doit pouvoir être opéré parfois longuement loin de sa base avec un support extrêmement réduit, voire inexistant. Sa définition doit donc être suffisamment robuste et redondante et sa maintenance élémentaire suffisamment simple pour être assurée par le seul équipage (à deux !) de conduite.

Dassault Aviation exerce sa maîtrise d'œuvre en définissant et réalisant en interne l'aérodynamique, la structure, l'architecture et les modes de commandes des systèmes. Les systèmes et équipements sont donc développés par les différents équipementiers suivant des spécifications détaillées fournies par le bureau d'études, en particulier pour leur présentation et leur utilisation au poste de pilotage.

La synergie totale chez Dassault Aviation entre les avions militaires et civils, tant au niveau de la conception bureau d'études qu'au niveau essais en vol, a permis d'utiliser très tôt sur avion civil des technologies avancées (en particulier au niveau des commandes de vol de Dassault Équipements) et des techniques employées sur avion militaire pour mettre le pilote dans la boucle en garantissant la diminution de sa charge de travail. Ainsi, le Mystère 20 et tous ses successeurs sont équipés de servocommandes hydrauliques sur les trois axes, et dès le Mercure en 1970, l'accent a été mis sur l'utilisation des Head Up Displays, pour conduire à la certification en approche par mauvaise visibilité Cat.III A manuelle au HUD du Falcon 2000 et 900 EX en 1998. De même, les planches de bord des Falcon 200, 50 et 10 ont vu le remplacement des instruments électromécaniques classiques par des tubes cathodiques EFIS dès 1982, à l'apparition de ces derniers chez Collins, puis leur simplification par l'augmentation de la taille des écrans et la réduction de leur nombre : entre le Falcon 900 EX de 1995 et le Falcon 900 EX EASY de 2003, le nombre d'écrans sur la planche de bord a été réduit de 17 à 5 tout en multipliant par deux la surface utile.

(15) Texte de M. Alain Picard, directeur délégué, Dassault Aviation.

Ces évolutions se concrétisent aujourd'hui autour d'une interface homme-machine nouvelle : le cockpit EASY (Enhanced Avionics System) défini à partir des études menées chez Dassault Aviation depuis 1995, maintenant certifiée sur Falcon 900 EX et sur Falcon 2000 EX, et auquel est adjoint un système de commandes de vol électrique numérique Dassault Équipements sur le Falcon 7 X en développement, basé sur l'expérience Rafale et adapté à la réglementation civile (dissimilarités introduites dans les chaînes *hardware* et *software*)

En effet, à partir de 1995, une réflexion d'ensemble a été menée au vu des statistiques mondiales d'accidents aériens montrant que le taux d'accident par heure de vol tendait vers une asymptote et qu'une part importante de ceux-ci était due à une mauvaise connaissance de la situation extérieure (*situation awareness*), une mauvaise identification de l'état des systèmes et de leurs anomalies par les équipages, ainsi qu'aux conditions d'emploi à proximité du sol (*CFIT : Controlled flight into terrain*). L'amélioration de la connaissance de la situation présente devient possible grâce aux synthèses qui peuvent être faites sur de grands écrans à cristaux liquides LCD, à l'utilisation du fenêtrage comme sur les PC et à l'intégration des différents capteurs et équipements dans de l'avionique modulaire autour de bus numériques rapides. Une plate-forme EPIC d'Honeywell permet d'accueillir un tel système.

Le cockpit EASY a donc été développé autour des cinq points suivants :

➤ Amélioration de la connaissance de la situation extérieure par utilisation d'une carte (de tous temps, l'homme s'est servi de cartes pour se diriger...) avec présentation de la situation dans le plan vertical, possibilité de présenter plusieurs couches d'informations comme les radiobalises, les pistes, les routes aériennes, les faisceaux ILS, le relief, la carte météo, les plots TCAS, bref tout ce qui peut avoir une influence sur la trajectoire suivie. Représenter à l'avance sur cette carte le plan de vol, ou le modifier avant d'effectuer cette modification.

Qui plus est, les paramètres de base utilisés pour le pilotage sont le vecteur vitesse et l'accélération, ce qui signifie qu'on pilote directement une trajectoire, et non plus une assiette et une vitesse.

➤ Interface homme-machine intuitive. Le curseur est la clé pour accéder de façon intuitive à toutes les informations, de telle sorte que le pilote puisse effectuer spontanément et logiquement toutes les opérations nécessaires.

➤ Meilleure coordination équipage : les quatre écrans sont disposés en forme de "T", ce qui crée un espace commun entre les pilotes, aisément accessible par chacun d'eux.

Ceci a deux conséquences immédiates :

- chacun peut voir facilement ce que fait l'autre ;

- toutes les modifications sont aisément visibles, donc vérifiables.

Il y a une seule source de navigation (les trois calculateurs FMS sont synchronisés).

➤ Réduction de la charge de travail.

La *check list* électronique intègre toutes les procédures, teste et vérifie pour l'équipage l'état des différents systèmes. Les procédures à effectuer sont affichées automatiquement en cas de panne.

Les informations FMS sont réparties sur seulement cinq pages graphiques simples (une par phase de vol) en face des pilotes (au lieu de plusieurs centaines sur de petits écrans sur le pylône). La modification d'un plan de vol est réalisée graphiquement et directement sur la carte.

➤ Pilote dans la boucle : en plus de ce qui a été décrit précédemment et qui y concourt, utilisation d'un code couleurs orienté objectif à atteindre.

Les avions FALCON sont donc caractérisés par :

- leur sécurité et leur agrément de pilotage (aérodynamique et qualités de vol naturellement saines, performances optimisées pour minimiser le pétrole consommé, commandes de vol avec servocommandes) ;
- des systèmes avion simples et intuitifs ;
- une structure d'une légendaire robustesse ;
- leur facilité d'emploi et leur flexibilité d'utilisation ;
- une mise en œuvre simple et un coût d'emploi faible ;
- une totale communalité avec les technologies, techniques et moyens de conception et de fabrication des avions militaires de Dassault Aviation.

LA FAMILLE FALCON

Dates du premier vol. Pour le Falcon 20, il faut préciser qu'il s'agit de la version du Mystère 20 modifié pour répondre aux spécifications de PANAM qui en effectua la commande, suite à la visite de Charles Lindbergh à Bordeaux-Mérignac en 1963, année du premier vol du Mystère 20.

Falcon 10	1970
Falcon 20	1965
Falcon 50	1977
Falcon 2000	1993
Falcon 900	1984





*Planche de bord
du Falcon 20.*



*Planche de bord
du Falcon 900 B SPZ 800*



*Planche de bord
du Falcon 900 B Primus 2000.*

CONCLUSION

Au cours de la période qui va de 1945 à 1995, non seulement la place des équipements dans les aéronefs s'est prodigieusement accrue, mais leur organisation en systèmes, eux-mêmes de plus en plus intégrés, s'est imposée dans tous les domaines.

Grâce à une attitude très volontariste et des efforts soutenus de l'ensemble des acteurs concernés, les progrès accomplis ont permis d'atteindre un niveau très compétitif au plan international. En particulier, le passage au numérique, avec toutes ses conséquences sur les équipements et les systèmes, a été l'occasion d'apporter des solutions à de multiples problèmes et de tirer le meilleur parti des possibilités qu'offraient ces nouvelles techniques.

Les difficultés n'ont pas manqué cependant. Le démarrage a été difficile dans certains domaines, où des décisions n'ont été prises que tardivement et des actions énergiques ont ensuite été nécessaires pour redresser des situations un moment compromises. Si, dans certains cas, l'apport des États-Unis a pu être bénéfique, dans d'autres, les interdictions rencontrées ont obligé l'industrie française de relever de véritables défis, ce qui a finalement contribué à l'acquisition d'une plus grande autonomie.

Les exemples de réussite technique sont nombreux, depuis le Mirage IV et Concorde jusqu'aux Mirage 2000, Rafale et Tigre et aux familles Airbus et Falcon, sans oublier des systèmes très complexes comme ceux de l'Atlantic/Atlantique ou qui mettent en œuvre des solutions tout à fait originales comme celui du Super Étendard et de l'alignement sur porte-avions.

Les résultats obtenus, tant en matière d'équipements que de systèmes, ont ainsi montré, à la fin de la période considérée, que l'industrie aéronautique française maîtrisait l'ensemble des techniques concernées. Ces résultats témoignent aussi de la valeur des méthodes de conception et de développement des équipements et des systèmes, sans cesse perfectionnées pour faire face à une complexité croissante. Ils témoignent également de la qualité et de la valeur des ingénieurs et des équipes qui se sont ainsi constituées, dans les services et dans l'industrie, dans des domaines dont l'importance n'est plus à démontrer.

Contribution :

*Georges BOUSQUET, Marcel CADO, François GONIN,
Michel HUCHER, Daniel LEROUGE, Jean MONFORT.*

Coordination :

George BOUSQUET et Michel HUCHER.

Contributeurs faisant l'objet de mentions particulières dans le cours du texte :

*Marcel BERJON, Jean CABRIÈRE, André DERRÉ,
Bernard LATREILLE, Charles MEYER,
Jean-Louis MICHEL, Alain PICARD, Jean-Luc SICRE.*

BIBLIOGRAPHIE

Le domaine des systèmes aéronautiques

- *L'industrie aéronautique et spatiale française (1947-1982)*, ouvrage GIFAS.
- *Le Centre d'essais en vol a cinquante ans (1944-1984)*. Co-édition Association amicale des essais en vol, Centre d'essais en vol, Union de publicité et d'édition.
- Arrêté du ministre de la Défense portant sur l'organisation de la Direction technique des constructions aéronautiques, 12 décembre 1979.
- Plaquette de présentation de la nouvelle organisation de la DTCA (prise d'effet 1er janvier 1980).
- Interview de l'IGA G. Bousquet, directeur technique des constructions aéronautiques, Air et Cosmos, n° 795, 12 janvier 1980.
- Pierre Mounier-Khun, "*Calculateurs électroniques et nouveaux systèmes d'armes. Interaction armées, recherche, industrie, 1946-1959*", La IV^e république face aux *problèmes d'armement*, actes du colloque organisé les 29 et 30 septembre 1997 à l'École militaire sous la direction de Maurice Vaïsse.

Arnaud Demichelis, "*L'avionique modulaire*", revue l'Armement, n°57, juin 1997.

Eric Bruni, "*Les logiciels du Rafale*", STTE Info, n°27, spécial Rafale.

Les programmes

- Claude Carlier, Luc Berger, Dassault 1945-1995, *Cinquante ans d'aventure aéronautique*, Édition du Chêne.
- Jean Cabrière, *Mirage IV 1956-1989*, janvier 1989 AMD-BA.
- *Système de navigation bombardement du Mirage IV A*, Électronique Serge Dassault, 15 décembre 1988.
- Jean Cuny, Pierre Larivière, *Les avions Breguet 1940-1971*, Docavia, Éditions Larivière, 1977.
- I.R. Yates, M.J. Berjon, "*Le programme Jaguar*", L'aéronautique et l'astronautique, n°59, 1976-4.
- Michel Tavernier, "*Au travers de deux programmes aéronautiques militaires en coopération internationale, Atlantique et Jaguar, constatations et réflexions*", janvier 1993.
- "*Mirage 2000 DA*", revue l'Armement, NS n°17, mai 1989.
- "*Spécial Mirage 2000*", STTE Info, n°24, octobre 1994.

- “*Mirage 2000-5*”, revue l’Armement, n°74, juin 2001.
- “*L’ère du Rafale*”, STTE Info, n°11, mai 1991.
- “*Spécial Rafale*”, STTE Info, n°27, juillet 1995.
- “*Spécial Mirage, Rafale*”, Air et Cosmos, supplément au n° 1801.
- “*Spécial aéronautique navale*”, STTE Info, n°31, juin 1996.
- L. Camberlein, J.P. Paccard, M. de Cremiers, “*Super Étendard ALLADE, optimisation coût performance de l’alignement d’un système inertielle sur porte-avions*”, *Symposium Proceedings*, AGARD, mai 1979.
- René Bloch, “*Le Breguet Atlantic et la coopération internationale*”, conférence au Centre de documentation historique de la Marine, le 10 octobre 1989.
- Patrick Baillot d’Extivaux, Jean-Claude Duchesne, *Le Breguet Atlantic, sa conception, sa vie opérationnelle*, Nouvelles Éditions Latines, 1994.
- Marcel Berjon, “*Du Vultur à l’Atlantique 2*”, conférence aux assises des Anciens de l’aéronautique, Toulouse, 11 avril 1987.
- Marcel Berjon, “*Atlantique 2, lancement en série*”, Bulletin Informations Dassault- Breguet, 3^e trimestre 1984.
- J.M. Boyer, P Palianof, “*Les systèmes du Tigre*”, Revue scientifique et technique de la Défense, n°42, 1998-4.
- R. Béteille, R. Chanut, “*Construction aéronautique civile*”, La Jaune et la Rouge, n°375, juin 1982.



Mirage IV en vol.

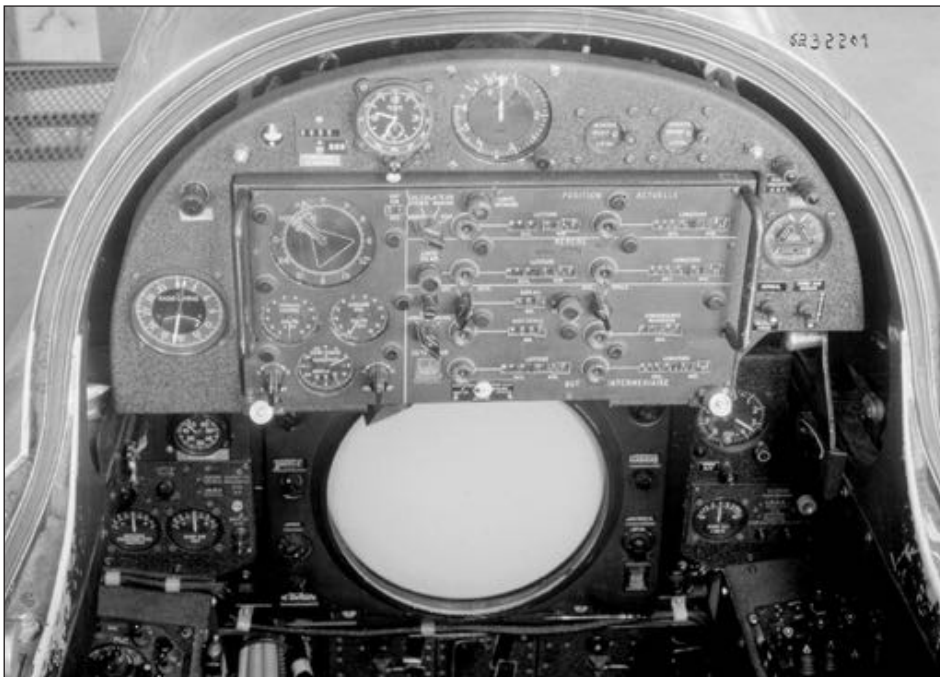


Planche de bord du poste navigateur du Mirage IV.



Mirage F1 en vol.



Planche de bord du Mirage F1.

Annexe C



Mirage 2000 en vol.



Planche de bord du Mirage 2000.



Rafale en vol.



Planche de bord du Rafale.

Annexe C



Bréguet 1150 Atlantic au sol.



Planche de bord du Bréguet 1150 Atlantic.



L'hélicoptère SA 341 Gazelle au sol.

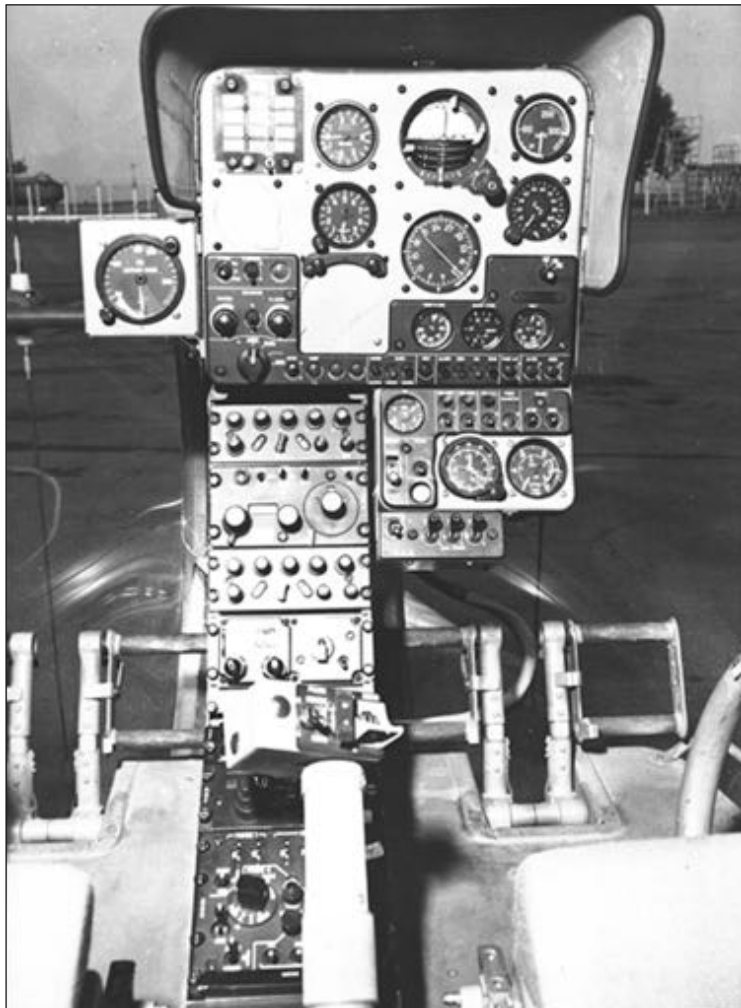


Planche de bord de l'hélicoptère SA 341 Gazelle.

Annexe C



L'Airbus A 300 en vol.



La planche de bord de l'Airbus A 300.



L'Airbus A 310 au sol.



Planche de bord de l'Airbus A 310 .

Annexe C



L'Airbus A 320 en vol.



Planche de bord de l'Airbus A 320 .

ANNEXE D
EXEMPLES DE PIONNIERS

Robert ALKAN

Raoul BADIN

Maurice BÉZU

Pierre CHOMBARD

Pierre FAURRE

Jean-Charles GILLE

Gilbert KLOPFSTEIN

Pierre LEROY

Gérard O'MAHONY

PRÉAMBULE

Dans le vaste domaine des équipements aéronautiques, nombreuses sont les personnalités qui jouèrent un rôle essentiel, notamment dans l'immédiat après-guerre. Il s'agissait alors de reconstruire une industrie totalement désorganisée, tandis que les équipementiers américains et britanniques avaient bénéficié, au cours de la Deuxième Guerre mondiale, d'un effort gigantesque, à la fois sur le plan technique et sur le plan de la production en grande série. Il fut ensuite nécessaire de se porter à la pointe du progrès scientifique et technique pour affronter une sévère concurrence, aussi bien pour les applications militaires que pour les applications civiles, tant pour les besoins nationaux que pour les exportations.

Il ne pouvait être question de citer toutes les personnalités qui ont défriché des voies nouvelles ou ont ouvert des perspectives innovantes dans des voies traditionnelles. Notre choix s'est porté sur certaines qui peuvent être considérées comme exemplaires à des titres divers, et dans des disciplines différentes :

- ▷ Historiquement, Raoul Badin est, sans doute, le premier équipementier français : il créa l'anémomètre "Badin", puis le contrôleur de vol "Badin" pour le pilotage sans visibilité et la planche de bord suspendue "Badin" qui rassemble tous les instruments nécessaires au pilotage et à la navigation. Raoul Badin fut le grand pionnier de l'instrumentation barométrique appliquée à l'aviation.
- ▷ L'excellence dans une discipline fondamentale, la mécanique, caractérise Robert Alkan. Ses réalisations en gyroscopes, viseurs de bombardement et pilotes automatiques étaient, dès 1936, très en avance sur les matériels étrangers. Les solutions mécaniques, puis électromécaniques, de Robert Alkan et de ses équipes trouvèrent de nombreux débouchés après 1950, jusqu'à l'avènement de l'électronique, puis de l'informatique. Encore maintenant, les horizons de secours conçus par Robert Alkan équipent les avions de transport, en raison de leur capacité à fonctionner correctement plusieurs minutes après une panne totale d'alimentation électrique. Rendre hommage à Robert Alkan, c'est aussi mettre en lumière la qualité de la formation dans les écoles des Arts et métiers ou à l'École Violet, c'est encore souligner la valeur des techniciens, qui, sur leur planche à dessin, traçaient, avec minutie, les formes des pièces constituant les mécanismes des instruments de bord et des pilotes automatiques Alkan. Il est remarquable de trouver, dans les réglages de ceux-ci, les dispositifs mécaniques d'avance de phase qui furent, sous une forme électronique, à la base des asservissements.
- ▷ Le souci de Robert Alkan d'exploiter au maximum les possibilités de la mécanique se retrouve chez Maurice Bézu et chez Pierre André Chombard. Leurs appareils, tels que les compas gyromagnétiques Bézu et les "boules" et "synthétiseurs" Chombard, ont fait jeu égal avec les meilleurs instruments américains. Maurice Bézu était un autodidacte, féru de belle mécanique, et le créateur d'une entreprise qui produisit des équipements de très haut niveau technique. Chez P.A. Chombard, il faut noter la qualité de sa formation initiale (dessinateur chez Schneider) et l'approfondissement tout au long de sa carrière : P.A. Chombard est un exemple de la promotion sociale effectuée avec plein succès au sein de la Direction technique et industrielle de l'aéronautique.

- ↳ Très différentes sont la carrière et l'œuvre de Pierre Faurre.
Major de l'École Polytechnique, ingénieur du Corps des Mines, Ph. D et Docteur d'État, créateur du Centre d'automatique de l'École des Mines, membre de l'Académie des Sciences, président de la SAGEM, Pierre Faurre s'est illustré dans le domaine des équipements aéronautiques par ses travaux sur la navigation par inertie, avec, notamment, l'alignement opérationnel des centrales inertielles des Super Étendard sur porte-avions, en application du filtrage de Kalman (qui avait été le sujet de sa thèse de Ph. D). Pierre Faurre a montré qu'un éminent scientifique pouvait aussi être un grand industriel.
- ↳ Exemplaire aussi est la personnalité de Jean-Charles Gille.
Père fondateur de l'automatique en France, il enseigna cette discipline nouvelle dès 1950, à son retour du MIT. Avec Marc Pélegrin, il forma des générations d'ingénieurs de Sup'Aéro et constitua des équipes de recherche qui développèrent les asservissements, en vue des applications en aéronautique, pour avions et pour missiles, mais également dans de nombreux autres domaines.
J.Ch. Gille était ingénieur militaire de l'air, mais il était aussi docteur en médecine et, de ce fait, était tout à fait apte à jeter des ponts entre les techniques des asservissements et les procédés de régulation physiologique. Expert de renommée mondiale en graphologie, il s'intéressait directement aux facteurs humains, tant au stade de la formation qu'à celui de l'optimisation du système homme-machine. Parlant couramment une dizaine de langues, J.Ch. Gille a fait rayonner l'école française de l'automatique dans de très nombreux pays, notamment au Québec où il enseigna dans la deuxième partie de sa carrière.
- ↳ Ingénieur militaire de l'air, mais aussi pilote de chasse (École de Meknès, de l'armée de l'Air), Gilbert Klopstein tira pleinement profit de cette double formation pour mettre au point des procédés nouveaux de pilotage, basés sur les concepts de trajectoire (vecteur vitesse et énergie totale). Il équipa, avec le soutien de Jean Forestier, alors professeur à Sup'Aéro, un avion de démonstration Nord 262 qu'il présenta, en 1972, à l'USAF et au MIT. Grâce à ces concepts et aux possibilités des dispositifs modernes de figuration des informations "tête haute" et "tête basse", Gilbert Klopstein a ouvert la voie aux nouvelles techniques de pilotage qui sont actuellement utilisées sur les avions d'armes, sur de nombreux avions de ligne américains, sur les avions d'affaires Falcon 2000 et sur les navettes spatiales. Il a formé des générations d'élèves de Sup'Aéro et de l'École nationale de l'aviation civile, à la mécanique du vol et au pilotage moderne.
- ↳ La créativité de Pierre Leroy, directeur technique de la société AÉRAZUR, est, elle aussi, exemplaire : elle s'est manifestée dans le domaine des dispositifs de sauvetage et de récupération. On lui doit notamment le concept du parachute en croix, alors sans équivalent dans le monde, qui a équipé les avions militaires français pour leur freinage à l'atterrissage.
- ↳ Dans toute sa carrière, Gérard O'Mahony a su associer continuité technologique et souci d'innover, dans un domaine essentiel pour le bon fonctionnement des équipements aéronautiques, celui de la génération électrique de puissance. Ingénieur de talent, c'était aussi un inventeur de nouveaux modèles d'alternateurs et un scien-

tifique qui savait mettre au point des méthodes de calcul du champ magnétique dans l'entrefer des machines électromécaniques tournantes ou encore exploiter les propriétés des aimants à terres rares pour réaliser des machines à grande puissance massive.

Ces quelques exemples de personnalités qui ont joué un rôle majeur dans le domaine des équipements aéronautiques ne doivent pas occulter le fait que les remarquables progrès de l'industrie française de ce qui est maintenant "l'avionique" ont été dus à la compétence et au dynamisme d'équipes, souvent pluridisciplinaires, qui entreprirent, avec enthousiasme et foi dans l'avenir, de rattraper le retard dû à la Deuxième Guerre mondiale et surent s'adapter, avec bonheur, aux techniques nouvelles.

Les échanges entre les services officiels (services techniques, centres d'essais, organismes de recherche) et les industriels furent incessants et très féconds. Ceci est valable, non seulement pour l'avionique, mais pour l'ensemble de l'aéronautique française, comme le montrent les autres fascicules du document COMAÉRO.

ROBERT ALKAN (1891-1957)

Robert Alkan portait en lui la marque du génie. Dans la prodigieuse évolution créatrice du monde moderne, les sommets déjà atteints dans les sciences, les arts techniques ou les beaux-arts laissent à bien peu d'hommes l'espoir de découvrir, la faculté d'inventer, de produire des nouveautés capitales pour leur vérité, leur utilité ou leur beauté.

La faculté créatrice a des sources inconnues. Si elle procède du concours d'un groupe d'hérités évoluant heureusement en un milieu favorable, ne croyez-vous pas, avec moi, que son nom déjà, Alkan, témoignait à l'ami que nous pleurons, les lointaines valeurs de la race des seigneurs, valeurs développées au berceau d'une famille française, laborieuse, unie en un foyer débordant de qualités, celles du cœur, et de patriotisme.

De 1891 à 1908, la jeunesse de Robert Alkan s'écoula studieuse : pendant que le progrès de la mécanique et de l'électricité bouleversait un monde heureux et ébloui, elle céda aux attraits des techniques nouvelles et le conduisit à l'École Violet.

Après un premier pas dans l'industrie, à la Société alsacienne de constructions mécaniques de Belfort, après le bureau d'études et la plate-forme d'essais, ce fut la guerre de 1914. Robert Alkan servait dans l'arme nouvelle, l'aviation. Sergent, puis bientôt lieutenant mécanicien, il était affecté à l'escadrille MS 12, celle du commandant de Rose.

En 1915, commencent les batailles aériennes. Le "temps des carabines" comme l'écrit René Chambe, est terminé. Robert Alkan va nous permettre de tirer au travers de nos hélices. Il conçoit et réalise un dispositif de synchronisation ; les essais sur Nieuport sont concluants, toute l'aviation, bientôt des milliers d'appareils en sont équipés. Perfectionnements de divers détails, modification des mitrailleuses Vickers – permettant de porter leur calibre à 11 mm – sont encore œuvres du lieutenant Alkan.

Mais, en 1917, l'heure est grave, il faut du matériel, des avions surtout, et nos usines s'es-soufflent ; une poignée d'ingénieurs, conduite par Lepère, est envoyée aux États-Unis. Elle va y organiser la fabrication, en grande série, des appareils qui gagneront bientôt la maîtrise de l'air. Robert Alkan assume là-bas toute la responsabilité de l'armement, des armes, des lance-bombes, des viseurs, et toute celle de l'aménagement électrique – 5 500 avions sont expédiés vers la France.

Une autre voix vous dira quelle fut, pour notre armée et dans notre victoire, l'importance des inventions de guerre de Robert Alkan. Si je les ai rappelées, c'est parce que j'ai pu relire les citations, le texte de la Légion d'honneur de 1917, les lettres de son chef de mission, les documents et les félicitations américaines, les témoignages officiels des ministres – et que avec les mêmes éloges, dans tous, j'ai retrouvé les mêmes phrases... "a fait preuve du plus grand désintéressement"... "non seulement ne cherche pas, mais se refuse à conserver ses droits personnels sur ses inventions"... "n'a pas voulu opposer à l'État des brevets qui eussent pu lui assurer une fortune"... Ce désintéressement personnel du jeune officier de 20 ans, nous le retrouvons dans toute la vie de notre ami.

À la Thomson, où il est entré, il a pris un brevet – un interrupteur Tumbler, la société n'a pas voulu l'exploiter – elle a eu tort car, depuis, ce matériel a été réalisé en milliers et milliers d'exemplaires, mais elle a cependant donné une prime dont Robert Alkan réserve tout le profit à son jeune frère.

Autre anecdote : le premier pilote automatique Alkan monté sur Léo XX emporte un succès et une prime assez importante en 1934 ; la prime est partagée intégralement entre les quatre collaborateurs du maître – et toujours il en est ainsi.

Ne sera-ce point encore une marque de sa généreuse nature que l'abandon en 1940, au profit de l'État français, sans redevance, sans la réserve d'aucune licence profitable, de tous ses brevets et du droit d'en concéder l'exploitation ?

Robert Alkan est un patriote, il n'est pas de ceux qui vivent et profitent des malheurs de son pays.

Autre trait, analogue, en 1943 quand il abandonne au gouvernement américain – au prix d'un dollar symbolique – le brevet qu'il vient de prendre pour couvrir une invention de capitale importance : un dispositif d'armement très évolué, réalisé bientôt aux États-Unis en milliers d'exemplaires.

L'entre-deux-guerres de 1918 à 1940 fut pour Robert Alkan et pour ses entreprises une brillante époque de prospérité ; jamais il ne travailla davantage. Maître de sa pensée, fort de sa science, il mit au point en de vastes mémoires, conçus en termes clairs et définitifs, les théories des appareils de navigation aérienne, dont la conception le hantait, car il fallait suivre le progrès des avions, adapter les instruments aux vitesses nouvelles, aux longs vols, aux évolutions sans visibilité, il fallait défendre les vies humaines, celles des pilotes et des passagers toujours plus nombreux.

Après les études, ce furent les multiples brevets et les réalisations successives d'équipements inédits, vite classés parmi les meilleurs du monde et venant doter bientôt tous nos avions de transport français et tous nos avions militaires. En 1938, Robert Alkan recevait la rosette de la Légion d'honneur.

Je ne dirai rien des contrôleurs de vol, des horizons, des stabilisateurs de cap, des pilotes automatiques Alkan construits, perfectionnés et réalisés dans la magnifique usine moderne de Valenton. C'est dans ce cadre prospère que j'ai connu Robert Alkan, admiré son œuvre, et je le crois, acquis son amitié. J'avais été frappé de voir la réelle dévotion des personnels qui l'entouraient ; il n'était point familier avec eux cependant et ne plaisantait point ; c'était, j'ai dit le mot, dévotion admirative, une foi absolue dans la parole du patron. Et quel patron ! Bien avant les lois sociales de 1936, Robert Alkan accordait à ses 400 ouvriers deux semaines de congés payés, leur assurait secours réguliers, sursalaires familiaux et primes sur les bénéfices de ses entreprises ! Si bien qu'en 1937, pendant quelques heures d'une grève ordonnée, ses ouvriers ne savaient guère où ils pouvaient faire porter leurs revendications.

La Deuxième Guerre mondiale mit en 1940 un terme brutal aux activités et à la prospérité remarquable de Robert Alkan ; pour la deuxième fois, il partit en Amérique, en mission encore, certes, mais mission dictée alors par le monstrueux ostracisme qui frappait certains Français. Il partit, abandonnant les siens, ses compagnons, ses ouvriers et ses chères études, et tous ses biens terrestres qui tombaient entre les mains d'un administrateur provisoire.

Dénué de tout, sans référence immédiate, il offrit en Amérique ses services d'ingénieur, son travail ; on le mit à l'épreuve, alors la partie était gagnée. Un bureau d'études dépendant des Établissements Pioneer lui était confié. Quand en 1945, il quitta les États-Unis pour rentrer dans notre France libérée, il emportait, avec une décoration rare, les félicitations officielles les plus élogieuses et aussi les souvenirs émouvants des 200 techniciens qu'il avait dirigés pendant quatre ans et avec lesquels il avait créé l'armement efficace dont purent être dotés tous les bombardiers américains.

Pouvait-il mieux servir son pays qu'il ne le fit alors ?

En 1945, Robert Alkan, retrouvant ses biens dispersés, ses usines bouleversées par la haineuse volonté de leur administrateur, subit une crise de profond découragement. Accablé encore par l'état de cette France qu'il ne reconnaissait plus écrasée par quatre années de la

plus odieuse occupation, il voulut abdiquer, renoncer à mener ses anciennes entreprises et il céda ses usines de Valenton.

Heureusement, cependant, le ressort n'était point brisé et il allait bientôt le rendre à ses études. Mieux que quiconque, en effet, Robert Alkan mesurait l'immense retard qu'avait pris notre aviation ignorante du vertigineux progrès technique que la guerre venait de susciter. Aussi, avec un cœur retrouvé, accepta-t-il de prendre la charge du GERIA, petite société d'études créée par l'Air sous une forme quasi clandestine et où, sous la vigilance d'un de ses anciens collaborateurs, étaient réunis la plupart de ses meilleurs techniciens.

Avec eux, il passait, en 1947, à la SFENA, nouvellement constituée en société nationale, et en assurait la direction, où je lui ai moi-même succédé, car il l'avait alors volontairement résignée pour se consacrer à la direction technique de notre filiale d'études et de recherches, le Groupe technique aéronautique GTA.

Depuis plus de six ans, Robert Alkan – Commandeur de la Légion d'honneur en 1952 – était devenu notre collaborateur précieux, notre conseil, notre ami. Jamais sa science ne fut plus constructive, jamais ses directives, ses interventions, ses conseils plus avisés et plus utiles.

Il poursuivait un but : rendre à la technique française des équipements la grande qualité et la première place où il l'avait portée lui-même en 1936. Il nous disait :

« Soyez inquiet, soignez les fabrications, n'en soyez jamais satisfaits, des vies humaines dépendent d'un contact fragile ou d'un montage délicat. Il ne faut pas travailler bien dans ce domaine, seule la perfection est valable.»

Ces dernières années du labeur de Robert Alkan ont enraciné dans notre maison une doctrine, la sienne, avec quoi nous nous efforçons d'exploiter le splendide patrimoine de découvertes et de brevets qu'il nous a apporté.

Je dois citer les horizons gyroscopiques 400-500-600, dont les brevets furent pris en 1949, le gyroscope directionnel et la référence baroaltimétrique conçus à la même époque, le marqueur de position breveté en 1950, le compas magnétique à distance en 1951, l'avertisseur de panne en 1953, tous les perfectionnements du pilote automatique type 13, la stabilisation des gyroscopes en 1954 et combien d'autres.

La SFENA, par ma voix, rend de tout ceci à Robert Alkan une grâce profondément reconnaissante.

Le chagrin ne nous a pas permis de mesurer encore l'immense perte que l'aviation vient de subir, les ingénieurs d'équipements, ses compagnons, ses élèves formés à son cours savamment et longtemps professé à l'École nationale d'aéronautique demeurent. Ils reprendront le flambeau, certes, mais la flamme en sera-t-elle aussi vive, aussi belle ?

Oui, si leur cœur est humain.

Oui, s'ils ne craignent pas le labeur et savent se vouer corps et âme à leur tâche et à leur pays.

Oui, si, en un mot, ils suivent le grand et généreux exemple de Robert Alkan.»

*Contrôleur Général HEDERER,
président-directeur général de la SFENA*

La France perd aujourd'hui un de ses plus grands ingénieurs. Je viens apporter ici à Robert Alkan un témoignage d'admiration et de reconnaissance, au nom du ministre de l'Air, au nom de l'aviation française, qu'il a servie passionnément tout au long de sa carrière.

Robert Alkan s'est révélé à l'aéronautique pendant la guerre de 1914 par la réalisation du tir à travers l'hélice. Il a vu que la synchronisation de l'hélice et du tir n'était possible qu'avec une arme possédant des constantes de temps bien définies, il a choisi l'arme en conséquence et, avec des moyens de fortune, il a dessiné et réalisé la première commande synchronisée.

Affecté alors à la Section technique de l'aéronautique, il y créa lui-même bien d'autres matériels d'armement, tels, par exemple, les déclencheurs de lance-bombes dont il a défini les principes rationnels.

Ce fut ensuite la mission aux États-Unis, si féconde, que M. le Contrôleur Général Hederer nous a retracée.

Après la guerre, il poursuit ses études d'armement à titre privé et fonde dans ce but les Établissements Alkan et Lesourd, qui deviendront plus tard la Société Alkan. Son activité y a été considérable. Elle couvre une gamme extraordinairement vaste de matériels et de réussites : matériels classiques d'armement, matériels de laboratoires, systèmes complets de pilotage, de navigation et de bombardement, instruments gyroscopiques, pilotes automatiques d'avions, etc.

De cette époque date l'appareil directeur T.A. 103, qu'il avait commencé à réaliser sur les idées du regretté lieutenant de vaisseau Thédénat et qui constituait un ensemble tout à fait remarquable, à la fois viseur de bombardement, compas de navigation, stabilisateur de cap et traceur de route. On est étonné d'une telle réalisation à une époque où l'on ne disposait pas de moyens perfectionnés de transmission électrique à distance et où la technique des asservissements n'avait encore donné lieu à aucune étude méthodique.

En 1936, il concevait un nouveau pilote automatique pour les trois axes ; cet appareil faisait appel à des mécanismes relativement simples et était, de ce fait, plus léger que la plupart des matériels analogues ; il comportait des correcteurs différentiels dont Robert Alkan avait établi, à cette occasion, une théorie particulièrement claire. Des dérivés de ce pilote équipent encore aujourd'hui nos avions de transport.

Parallèlement à ces travaux, Robert Alkan étudiait des matériels de tir, réalisant la première tourelle à moteurs, le premier collimateur à correcteur, une conduite de tir gyroscopique qui fut un précurseur des gyrogunsights de la dernière guerre.

Pendant l'Occupation, Robert Alkan fut envoyé en mission aux États-Unis pour faire profiter nos alliés de son avance technique. Il y a rendu des services considérables. Il a notamment beaucoup amélioré les matériels de bombardement américains et créé toutes sortes d'instruments nouveaux, portant très haut au-delà de l'Atlantique le prestige de la technique française.

Après la guerre, il reprend ses études en France, dans le cadre du GERIA, puis de la SFENA. Il continue à nous doter régulièrement, chaque année, d'instruments nouveaux et de perfectionnements les plus variés : horizons gyroscopiques, compas gyromagnétiques, transmission électrique à distance, marqueur de point, pilotes automatiques modernisés, instruments de navigation pour les avions rapides, etc.

Je n'en entreprendrai pas l'énumération, car il faudrait dresser un véritable catalogue. Je veux seulement ajouter que cette activité extraordinaire ne s'est pas limitée à l'aviation. On doit à Robert Alkan des tables vibrantes et des machines de flexion rotative dont l'usage est très répandu ; tout un matériel électrique industriel, des relais, des systèmes de minuteriers ; pensez à lui quand vous voyez des journaux lumineux sur les boulevards, car là encore il a mis sa marque.

Robert Alkan a donc été un ingénieur exceptionnel, électricien et surtout mécanicien de génie. Il avait un sens extraordinaire de la réalisation mécanique ; il y apportait une connaissance approfondie des principes ainsi qu'un jugement très sûr. Il dessinait lui-même et, en même temps qu'il concevait, il prévoyait le mode de fabrication, sachant toujours imaginer des solutions simples, adaptées aux moyens de réalisation disponibles.

Il a eu cette qualité, rare chez un inventeur, de savoir s'intéresser aux idées inventives des autres. J'ai évoqué tout à l'heure comment il a réalisé un appareil directeur à partir des idées du lieutenant de vaisseau Thédenat ; dans bien d'autres cas, il a contribué à développer des inventions, qui, sans sa compétence de mécanicien, auraient sombré dans des difficultés de mise au point insurmontables.

Il avait aussi, à un très haut degré, l'art d'enseigner, de rendre clairs et compréhensibles les principes les plus difficiles de mécanique ou d'électrotechnique. Il était ainsi un véritable maître pour ses collaborateurs ; il laisse à l'École nationale supérieure de l'aéronautique le souvenir d'un professeur très écouté ; bien d'autres, qui n'étaient ni ses collaborateurs, ni ses élèves à proprement parler, sont venus souvent lui demander conseil, s'éclairer à son contact, profitant de sa grande bienveillance.

Les ingénieurs des services du ministère de l'Air garderont le souvenir d'une collaboration très confiante avec Robert Alkan. Son objectivité était remarquable ; il faisait lui-même une excellente critique des projets qu'il présentait, toujours modeste et s'efforçant à l'impartialité. Sa conscience professionnelle n'était jamais satisfaite ; il ne manquait pas de contrôler lui-même les prototypes délicats ou d'aller voir lui-même l'installation sur avion.

Comment ne nous serions-nous pas attachés à une si belle figure !

Notre tristesse est immense de penser que nous ne verrons plus parmi nous notre cher Robert Alkan, avec son accueil si ouvert et son esprit toujours en mal de création. Il aurait pu nous apporter encore tant d'aide, alors que les engins que nous étudions nous posent d'immenses problèmes de sa compétence.

Notre consolation sera de penser qu'il nous laisse un magnifique exemple et qu'il a formé de nombreux disciples. On ne pourra remplacer, certes, la réserve d'expérience et d'intelligence qu'il mettait en toute occasion à notre disposition, mais son influence restera grande dans l'industrie française et je puis assurer sa famille que son souvenir restera profondément gravé dans nos cœurs.

Robert Alkan, durant sa vie, n'a jamais recherché la publicité. Mais son œuvre est là et sa réputation ne fera que grandir avec le temps.

*Ingénieur Général MEYER
directeur technique et industriel de l'Aéronautique*

Dans le grand ensemble d'éminents ingénieurs que j'ai eu à connaître, Robert Alkan occupe une place au tout premier rang.

Son intelligence puissante et subtile, son travail continu lui donnaient une vue particulièrement claire et complète des problèmes à résoudre.

Alors que les Allemands étaient à Noyon dans la Première Guerre mondiale, l'aviation française sut, en tête des aviations alliées, imposer sa loi. L'avion de chasse fut l'élément prépondérant de la maîtrise de l'air, dès que sa puissance de tir eût atteint une pleine efficacité, grâce au tir synchronisé à travers l'hélice. Robert Alkan fut le grand artisan de cette amélioration essentielle. Conception, réalisation précise et ordonnée, construction contrôlée, tout se suivait avec rapidité et sans heurt grâce à Robert Alkan et à ses collaborateurs.

Dans la vision moderne, la machine dépend d'un cerveau mécanique qui l'asservit pour la stabiliser et la diriger obligatoirement vers son résultat.

Robert Alkan a toujours excellé en tous domaines dans cette conception difficile. Après avoir été l'un des meilleurs ouvriers de la victoire de 1918, il ne ménagea ni son temps, ni sa peine pour maintenir la science française en tête du progrès aéronautique.

Je l'ai retrouvé en 1928, puis en 1938, animateur d'une puissante usine d'équipements qu'il avait créée pour réaliser, au fur et à mesure des besoins, tous les appareils de direction, de contrôle et d'asservissement, et nous avions pour lui la grande affection que mérite un fils de France désintéressé dont la haute culture se consacre au bien de son pays.

Je revois notre entrevue de 1940 à Loches où, après le désastreux armistice, il me disait sa volonté de rejoindre nos alliés pour continuer la lutte contre l'ennemi commun.

Alors qu'il faisait bénéficier l'Amérique de ses connaissances scientifiques et de son génie mécanique, son usine française sous séquestre était mise au pillage, et après la Libération, l'État français ne sut pas guérir le mal si injustement causé.

Sans une plainte, Robert Alkan se remit au travail avec des moyens réduits, mais avec la même clarté spirituelle.

J'eus la joie de le revoir, il y a quelques jours, dans les Journées Internationales au Bourget, et de m'entretenir avec lui de tous les problèmes posés par la croissance sans limite des vitesses réalisées. Nous prenions rendez-vous, pour nous entretenir des projets nouveaux qu'il envisageait.

Brusquement, il est enlevé, en pleine force, ayant conservé jusqu'au dernier jour, l'imagination puissante du génie créateur.

Nous perdons un ami incomparable, et la France, un des plus remarquables parmi ses enfants, par l'étendue de sa science comme par son dévouement sans limite à l'intérêt général.

Malgré une infinie tristesse, nous songeons que de tels exemples d'une belle vie, permettent de légitimer les plus hautes espérances dans l'avenir du pays.

Albert CAQUOT

Membre de l'Institut

(Extraits des allocutions prononcées aux obsèques de Robert Alkan, le 19 juin 1957)

RAOUL, ÉDOUARD BADIN (1879-1963)

Né à Champier (Isère), le 19 décembre 1879, Raoul Badin est reçu à l'École Polytechnique, au sein de la promotion 1900. Il en sort officier d'artillerie. Attiré par l'aviation naissante, dont les perspectives sont dégagées par le capitaine d'artillerie Ferdinand Ferber, il fait partie de la première promotion de Sup'Aéro (sortie en 1910).

À cette "époque héroïque", les avions ne disposaient pas d'instruments de bord. Le capitaine du Génie Albert Octave Etévé (qui termina sa carrière inspecteur général de l'aéronautique) conçut un indicateur de vitesse, constitué par une plaque mobile autour d'un axe vertical. Sous l'effet de la pression dynamique due à l'écoulement, cette plaque, également soumise à l'action d'un ressort antagoniste, tourne d'un angle proportionnel au carré de la vitesse par rapport à l'air. Rendu réglementaire à bord de tous les avions militaires en 1911, l'indicateur Etévé permit de sauver de nombreux pilotes qui, sans cet appareil, auraient été victimes de décrochage à basse altitude.

Cependant l'appareil Etévé présentait des inconvénients, liés à sa conception : sensibilité aux conditions atmosphériques, difficultés de transmission de l'information à distance.

Il revint à Raoul Badin (camarade de promotion d'Albert Etévé à l'École Polytechnique) de réaliser, en avril 1911, le premier indicateur de vitesse, par mesure directe de la pression dynamique (différence entre la pression totale et la pression statique) grâce à un tube de Venturi relié par un mince tube à un manomètre différentiel placé dans l'indicateur devant le pilote.

En 1911 également, Raoul Badin constitua un atelier-laboratoire pour produire son appareil qui remplaça rapidement l'indicateur Etévé. Directement liée à la portance aérodynamique, l'indication de l'appareil de Raoul Badin s'imposa comme essentielle pour le pilotage des avions, notamment lors de l'approche et de l'atterrissage. Elle était très importante aussi pour fixer les limites d'emploi des avions, en tenant compte de la résistance mécanique de leur structure. Les consignes de vol pouvaient être établies en précisant la plage des vitesses indiquées à respecter. La sécurité aérienne était née, au moins dans ses grands principes. Le succès fut tel que l'on adopta le nom de "Badin", aussi bien pour l'appareil lui-même que pour la vitesse indiquée.

D'autre part, Raoul Badin exploita la variation de la pression statique avec l'altitude pour réaliser le variomètre qui indique la vitesse verticale de l'avion.

Le laboratoire Badin devint, en 1923, l'appareillage aéronautique APA. La même année, Raoul Badin groupa, en un seul appareil, un indicateur de virage (gyromètre), un indicateur de verticale apparente ("bille") et un Badin. Ce fut le premier contrôleur de vol qui ouvrait la voie au pilotage sans visibilité (PSV).

En 1934, Raoul Badin rassembla dans un tableau de bord treize appareils fournissant à l'équipage les données nécessaires au pilotage et à la navigation. L'ensemble était fixé à l'avion par l'intermédiaire d'une suspension élastique, de façon à supprimer ou réduire les effets des vibrations et des chocs. C'était la planche de bord Badin.

Au cours des années trente, l'appareillage aéronautique de Raoul Badin ajouta, à la fabrication des instruments pneumatiques, celle des instruments gyroscopiques : horizons indi-

quant l'assiette de l'avion en roulis et en tangage, directionnels donnant l'indication du cap stabilisé, en complément avec le compas magnétique. L'entraînement de ces gyroscopes se faisait en alimentant en dépression les boîtiers des instruments, ce qui créait un jet d'air sur les rotors des gyroscopes. Ces appareils, très simples, permirent le pilotage sans visibilité pour les vols de nuit ou pour la traversée des nuages.

Mais ce type d'entraînement fut dépassé, dans les années quarante, par l'emploi de l'électricité, surtout avec le courant alternatif à 400 Hz (pour les appareils anglais et américains) ou à 500 Hz (pour les appareils allemands). La société Badin n'a pas suivi cette évolution, ce qui a entraîné progressivement la disparition de son activité "gyroscopique".

Après la Deuxième Guerre mondiale, la société, installée à Paris, près du parc Montsouris, était encore dirigée par Raoul Badin ; elle employait près de 1 000 personnes, pour fabriquer des appareils de mesure de pression, avec capsules barométriques et dispositifs entièrement mécaniques.

Raoul Badin décéda le 20 juin 1963. La société Badin fut reprise par Crouzet.

Raoul Badin figure, sans aucun doute, parmi les pionniers de l'aéronautique.

Il consacra sa vie à la sécurité aérienne. Le nom de Badin est familier pour tous les pilotes, depuis leur formation initiale.

Raoul Badin fut le premier "équipementier" français.

MAURICE BÉZU (1900-1986)

Maurice Bézu était un autodidacte et il en concevait une certaine fierté : il se déclarait lui-même diplômé ECP : école communale de Puteaux !

Maurice Bézu commença sa carrière comme technicien dans la mécanique et l'électricité automobile. C'était un véritable amoureux de la belle mécanique.

Après la guerre, en 1945, il créa, à Asnières, dans des ateliers loués à Marcel Dassault, les Établissements BÉZU, spécialisés dans la mécanique de précision.

Il créa ensuite, en 1956, la Société d'études et de réalisations électroniques, SERE-BÉZU, qui prit un véritable essor à partir de 1967. Cette société, dont les effectifs n'ont jamais dépassé 120 personnes, était destinée à l'étude d'équipements prototypes alliant mécanique de précision, électronique, puis optique, pour lesquels Maurice Bézu prit de nombreux brevets. Elle devint une filiale de la SFIM en 1970.

Dès le début, Maurice Bézu sut s'entourer de deux ingénieurs remarquables, MM. Ferrier et Weber, qui restèrent auprès de lui pendant toute sa vie professionnelle. Avec eux, Maurice Bézu constituait le noyau d'une équipe technique dont l'efficacité, la rapidité d'exécution, le sens pratique, l'imagination créatrice, la curiosité intellectuelle, le souci de se tenir constamment au courant des derniers développements en matière de techniques et de technologies de par le monde, étaient considérables et forcèrent l'admiration de tous ceux qui l'approchaient.

Les principales réalisations de Maurice Bézu sont le compas magnétique, le compas gyromagnétique, les centrales de cap et de verticale toutes positions à répétiteur sphérique types 150 et 180 (Mirage III C et Mirage III E), puis, à la fin de sa carrière, les viseurs gyrostabilisés pour chars, supportaient facilement la comparaison, au moment de leur sortie, avec les matériels étrangers concurrents.

*Léon VANDENBERGHE
ancien directeur technique de la SFIM*

PIERRE ANDRÉ CHOMBARD

Né au Creusot, en 1911, P.A. Chombard avait reçu aux écoles Schneider une excellente formation de dessinateur. Reçu au concours d'agent technique aéronautique, il fut affecté au contrôle des fabrications à l'usine de moteurs Gnome et Rhône.

Après son succès au concours d'ingénieur des travaux aéronautiques, il fut affecté, en 1937, à la Section équipements du Service technique aéronautique (STAé), où il fut chargé des études d'instruments gyroscopiques. Il entreprit alors l'étude approfondie de la gyroscopie, à partir d'une documentation diverse (ouvrages de Béghin, Bouasse, etc.), mais il ne se contenta pas d'enregistrer les résultats de la théorie : il procéda à un examen détaillé du phénomène gyroscopique et établit une explication simple et claire de ses paradoxes apparents.

En 1945, P.A. Chombard fut nommé chef de la Sous-Section pilotage, pilotage automatique, matériels d'entraînement et simulateurs de vol.

En parallèle avec ses responsabilités de service, il poursuivit sa formation personnelle, analysa les problèmes techniques qui se présentaient et développa, pour plusieurs d'entre eux, des solutions personnelles remarquables. C'est ainsi qu'il appliqua les méthodes vectorielles et la résolution graphique des équations différentielles à la représentation des erreurs, en virage, d'un horizon gyroscopique.

P.A. Chombard procéda à une étude critique du fonctionnement des horizons à présentation sphérique, réalisés pour les grands angles de montée ou de descente. Il démontra qu'on ne peut obtenir une disposition correctement interprétable, sans stabiliser la sphère autour de ses trois axes, c'est à dire en intégrant l'orientation en azimut à la sensibilité aux indications de tangage et de roulis. Cela n'était pas évident à l'époque.

Grâce à ses grandes capacités de dessinateur-concepteur, il établit le projet d'une sphère stabilisée par un système à deux gyroscopes (un gros horizon supportant un petit gyro directionnel) qu'il réussit à faire tenir dans le volume d'un instrument de planche de bord.

À la suite, il projeta un indicateur sphérique asservi à une centrale gyroscopique, avec inversion de l'indication longitudinale, de façon à respecter les habitudes des pilotes, solution qui fut préférée pour cette raison. La boule Chombard fut utilisée, d'abord comme instrument de planche de bord, puis dans une centrale gyroscopique, commandant un indicateur sphérique.

Le synthétiseur Chombard, comme l'indicateur à aiguilles croisées du *Zero Reader*, affiche une combinaison des données d'orientation trois axes de l'avion, ses vitesses angulaires autour de ses axes, ses écarts de position par rapport à un axe radioélectrique ou à une route et par rapport à une altitude de vol, mais il présente l'avantage, sur le *Zero Reader*, de ne pas imposer un instrument supplémentaire. Ce sont les repères fixes qui sont asservis de façon à définir rapidement, à chaque instant, l'action à exercer sur les gouvernes. Le synthétiseur Chombard équipa les avions Nord 2500, où il servit aussi de référence au pilote automatique.

Ces réalisations firent l'objet de brevets d'invention, au nom de l'État.

Plus tard, sur les Airbus, pour la visualisation de pilotage sur écran cathodique, on est revenu à l'indication classique à aiguilles croisées, sous forme de deux traits orthogonaux barrant l'écran. Même si, ensuite, on a remplacé ces traits par deux index à mettre en coïn-

cidence, moins encombrants, cette disposition n'est pas favorable, car on ne peut pas suivre simultanément plusieurs indications. Mais P.A. Chombard qui était alors à la SFENA ne s'est pas permis de défendre ses propres solutions, parce qu'il aurait été personnellement intéressé par les primes correspondantes.

Ses exceptionnelles capacités de concepteur de mécanismes furent ensuite appliquées aux horizons gyroscopiques Alkan-SFENA. Ces instruments, purement mécaniques et de petites dimensions, étaient utilisés comme éléments de secours, très utiles en cas de panne d'alimentation électrique. Après l'étude du mécanisme de suppression du rappel à la verticale pendant les virages, rendu indispensable pour l'adaptation aux plus grandes vitesses des avions, P.A. Chombard procéda à une analyse du fonctionnement des dispositifs de recentrage. Il démontra la nécessité de remplir une condition qui n'était pas toujours satisfaite par les matériels existants : il s'agit de la corrélation entre les actions exercées autour de chacun des deux axes de cardan. Pour la réaliser, la difficulté est de commander le calage de l'anneau intérieur de cardan par rapport à l'anneau extérieur, P.A. Chombard sut dessiner une liaison qui, en particulier, traverse un roulement.

Ces horizons ainsi perfectionnés ont été livrés par milliers, en France et à l'exportation; ils équipent notamment les avions Boeing. Quant au dispositif de recentrage, il a été également appliqué à des gyroscopes autres que SFENA.

Ces inventions font, elles aussi, l'objet de brevets État, avec prime à l'inventeur. L'État continue à percevoir des redevances.

Enfin, il convient de signaler une activité moins importante, mais non négligeable: il s'agit de l'étude d'un dessin amélioré des inscriptions à porter sur les cadrans des instruments, en vue d'éviter tout risque de confusion. Cette étude a été poursuivie par la société Jaeger, avec l'intervention directe de P.A. Chombard, elle a abouti à la rédaction d'une norme.

Après 1960, P.A. Chombard exerça les activités de directeur commercial à la SFENA, où il apporta encore ses avis d'ingénieur, en collaborant avec l'équipe de l'ancien bureau d'études Alkan, notamment sur les horizons gyroscopiques perfectionnés de dimensions réduites.

En marge de ses activités à la Section équipements du STAé, puis à la SFENA, P.A. Chombard a fourni un excellent enseignement, comme professeur à l'ESTACA et a publié un ouvrage, Les équipements de planeurs et d'avions.

Il est remarquable que P.A. Chombard ait pu obtenir de tels résultats à partir d'une formation due à ses seuls efforts. C'est certainement l'effet d'une grande rigueur intellectuelle, liée à sa rectitude morale, et aussi celui d'un travail considérable.

Pierre SCHNERB
ancien chef de la Section Équipements du Service technique aéronautique

PIERRE FAURRE (1942-2001)

Major de la promotion 1960 de l'École Polytechnique, après l'École des Mines, Pierre Faurre s'oriente vers la recherche et soutient brillamment, à Stanford en 1967, une thèse de Ph. D. sur le filtrage statistique auprès du Professeur R.E. Kalman. De retour en France, il passe une thèse de doctorat d'État et crée le Centre d'automatique de l'École des Mines.

Dans les années qui suivent, il concilie avec succès ses activités de chercheur à l'INRIA, de professeur à l'X et à l'École des Mines, et d'industriel à SAGEM.

En 1972, il devient secrétaire général de SAGEM. En même temps il forme à SAGEM des équipes d'ingénieurs qui, sous sa direction, réalisent en 1975 la première application de grande envergure du filtrage de Kalman : l'alignement opérationnel des systèmes inertiels des Super Étendard sur porte-avions. Ce succès sera suivi par d'autres premières mondiales dont la navigation hybride inertie-corrélation d'altitude du Mirage 2000 N et la navigation hybride inertie-GPS.

En 1985, à 43 ans, il est élu à l'Académie des Sciences ; il est alors le seul industriel dans cette institution.

Directeur général de SAGEM en 1983, il devient président en 1987.

Sous son impulsion, le Groupe SAGEM est devenu un des grands acteurs européens de l'électronique de pointe, utilisant efficacement les synergies entre l'électronique de Défense et la nouvelle électronique des télécoms et de l'automobile.

Il structure et façonne une société de taille moyenne, diversifiée mais intégrée, privilégiant quelques créneaux soigneusement choisis, dans lesquels les compétences technologiques de ses équipes, leur volonté d'innover et leur préoccupation pour la maîtrise des coûts conduisent aux premières places européennes et mondiales.

SAGEM intègre en 1998 sa filiale SAT et en 1999 la SFIM, et est alors n° 1 européen des systèmes inertiels, des systèmes optroniques, des systèmes de drones tactiques et aussi n° 1 mondial des systèmes de reconnaissance automatique d'empreintes digitales, des commandes de vol d'hélicoptères, des optiques spatiales.

Les multiples activités de Pierre Faurre, industriel et membre de conseils d'administration prestigieux, n'ont jamais nuit à ses engagements de professeur et de pédagogue.

Président du conseil d'administration de l'École Polytechnique à partir de 1993, il mène à bien une réforme des études et l'ouverture à l'international de l'École.

Le 6 février 2001, il décède brutalement à l'âge de 59 ans, laissant une œuvre considérable dans tous les domaines qu'il a marqués de sa personnalité.

JEAN-CHARLES GILLE (1924-1995)*

Extraordinaire figure que celle de Jean-Charles Gille !

Extraordinaire, au sens propre, par la multiplicité des facettes de son intelligence, extraordinaire par la marque qu'il laisse auprès de ceux qui ont eu l'occasion de le rencontrer et de travailler avec lui, étudiants, thésards, jeunes ingénieurs, et en tout premier lieu l'équipe fondatrice du CERA(1) qui devait être à l'origine du CERT(2). La plupart d'entre nous ne l'avaient pas revu depuis de nombreuses années, vingt-cinq ans, trente ans peut-être, depuis l'époque où il avait quitté la France pour s'installer au Québec à l'Université Laval. Alors qu'une si longue absence et un si grand éloignement amènent souvent l'oubli, n'est-il pas remarquable que le souvenir de Jean-Charles Gille soit resté si vivace parmi nous, à tel point qu'il ne se passait pas de mois sans que l'un ou l'autre d'entre nous n'évoque un souvenir, un trait de sa personnalité, et que l'annonce de sa disparition ne nous afflige à ce point ?

Jean-Charles Gille a été le père fondateur de l'automatique en France, une automatique à laquelle il avait été initié au MIT, après l'École Polytechnique, à une époque où, pour raccrocher la France à un développement scientifique que la guerre avait considérablement freiné, le ministère de la Défense envoyait aux États-Unis ses plus brillants jeunes ingénieurs militaires. Dès 1956, il créait à Sup'Aéro ce qui fut sans doute le premier enseignement de l'automatique en France, un enseignement dispensé avec un sens de la pédagogie tel qu'il est resté un modèle pendant des décennies. Lisant et parlant une dizaine de langues, toujours à l'affût des nouveaux développements de la discipline, il synthétisait tout ce qui se faisait, aussi bien en URSS qu'au États-Unis, introduisant en France aussi bien les travaux de Truxal que ceux d'Aizerman ou Cypkin, chose difficile à une époque où les liens entre les diverses parties du monde n'étaient pas si aisés à établir qu'aujourd'hui.

Si l'ENSAé (Sup'Aéro) en a été la première bénéficiaire, son action ne s'est pas limitée à l'École. Jean-Charles Gille été, avec V. Broïda, un des artisans de la constitution de l'AFRA (l'Association française de régulation et d'automatique) et l'un des premiers Français à participer à l'IFAC, dès la naissance de cette fédération et, en particulier, lors du premier congrès mondial organisé à Moscou en 1960.

Quant à ses enseignements, ils étaient dispensés hors de l'ENSAé, aussi bien à l'ENSEEIH (et ceci n'a pas été sans conséquence sur la composition du CERA !), qu'à l'Université Laval à Québec, aussi bien aux étudiants qu'aux ingénieurs déjà dans l'industrie, à travers la CEGOS puis la société des Amis de l'ENSAé.

C'est Jean-Charles Gille qui, avec Marc Pélegrin, devait créer le CERA en février 1962 concrétisant une idée en gestation depuis 1958. Avec une rare intelligence, il avait parfaitement vu la mutation radicale des progrès scientifiques et techniques dans les années cinquante-soixante et la nécessité d'associer, à une école d'ingénieurs, un centre de recherche performant qui fournissait l'essentiel du corps enseignant dans la discipline et effectuant aussi des travaux d'études et de recherches dans le cadre de contrats passés avec des organismes publics ou privés.

* *Ingénieur en Chef de l'Air, directeur adjoint et professeur à Sup'Aéro, professeur à l'Université Laval (Québec).*

(1) CERA : Centre d'études et de recherches en automatique.

(2) CERT : Centre d'études et de recherches de Toulouse – ONERA Toulouse.

Qu'on nous permette de reprendre les lignes suivantes tirées de l'introduction qu'il avait faite pour la plaquette du CERA, en 1965 :

“Le progrès scientifique et technique est un élément si caractéristique de notre monde actuel et si lourd de conséquences qu'on se condamne, en l'ignorant, à une incompréhension des grandes tendances de notre époque.

Or le progrès est en train de changer de visage. Faisant suite aux immenses développements dans le domaine de l'énergie, apparaît depuis trente ans un nouveau courant scientifique qui concerne exclusivement l'information.

Les sciences de l'Ingénieur en Énergie découlaient directement de la Physique, de la Chimie et de la Mécanique. Les sciences de l'Ingénieur en Information sont l'Électronique, l'Informatique et l'Automatique. Ainsi l'Électronique, rendue possible par la découverte de l'électricité a-t-elle trouvé un immense champ d'application sur la transmission de l'information. L'informatique est apparue ensuite avec les premiers calculateurs, lorsqu'il est devenu techniquement possible, non seulement de transmettre, mais de traiter l'information. En même temps le concept de « système » faisait effectuer un grand pas à la pensée théorique dans ces domaines.

L'Automatique, qu'on appellera peut-être un jour Systématique, est la conséquence de ces grands courants historiques. Science des Automatismes, son objet d'étude est l'identification et la commande des systèmes physiques ; l'identification, c'est l'établissement de modèles informationnels de systèmes physiques, et la commande, c'est finalement l'orientation de flux d'énergie à partir d'informations traitées à un niveau énergétique aussi bas que possible, en fonction de critères préétablis.

Située à la jonction des grandes tendances scientifiques d'aujourd'hui, requise impatiemment d'autre part par les innombrables applications qu'on attend d'elle, l'Automatique prend rang de science autonome ; nul ne peut prédire avec certitude quelles en seront les conséquences scientifiques, économiques et sociales”.

L'aventure du CERA a été, pour tous ceux qui l'ont vécue, une histoire scientifiquement exaltante. Jean-Charles Gille avait su appeler autour de lui des ingénieurs débutants, tout juste titulaires d'un diplôme d'ingénieur et d'une expérience nord-américaine (...mais formés par ses soins !), prêts à se lancer dans l'aventure de la recherche en automatique. Même si, pendant les deux premières années, il avait organisé une espèce de tutorat exercé par des ingénieurs militaires ayant un peu plus d'expérience (comment ne pas citer C. Bigot, G. Senouillet, Mignot et Thellier), très vite, il devait leur laisser toute liberté d'initiative, mais en exerçant cependant un pointilleux contrôle. Qui ne se souvient de la façon dont Jean-Charles Gille scrutait les rapports avant d'y apposer son visa, un visa qui ressemblait quelque peu à un nihil obstat !

Grâce à la politique avisée qu'il conduisait, grâce au dynamisme de jeunes ingénieurs conscients de leurs responsabilités, le CERA devait vite être reconnu, au milieu des années soixante, comme un centre de référence qui contribuait largement au développement de l'Automatique encore en enfance ; et il n'est que de se souvenir du nombre de livres écrits par Jean-Charles Gille lui-même – une dizaine, traduits en nombreuses langues et d'une pérennité hors du commun – puis, suivant l'exemple, par les ingénieurs du CERA, en commande optimale, systèmes séquentiels et logiques, systèmes multidimensionnels, identification...

Les événements ont voulu que Jean-Charles Gille quitte la France, au milieu des années soixante, pour s'installer au Canada, à l'Université Laval, où il avait déjà enseigné. Son passage au CERA aura donc été court, il est encore plus remarquable que, dans ces conditions, il ait laissé une telle marque ! Mais il faut dire que les liens de coopération qu'il avait instaurés entre l'Université Laval et les différentes écoles françaises d'automatique auront continué sa présence.

Deux choses ont frappé tous ceux qui l'ont connu : le prodigieux éventail de ses connaissances et la fidélité dans ses amitiés.

On a dit le rôle qu'il avait joué dans l'avènement de l'automatique en France, mais ce n'était là qu'un des aspects d'une activité hors du commun. Combien d'autres pourrait-on citer, dont aucun n'était fait en dilettante ! Jean-Charles Gille était aussi docteur en médecine. Ses élèves n'étaient guère surpris d'apprendre que leur professeur, alors même qu'il était directeur adjoint de Sup'Aéro, se trouvait tel ou tel après-midi à l'hôpital ; l'un de nous se souvient que, s'étant trouvé mal, Jean-Charles Gille avait dégagé son bureau directeur de tous les papiers qui l'encombraient, puis demandé à son élève de s'y allonger afin qu'il puisse l'examiner.

Assurément, ce n'est pas lui qui aurait confondu, comme on l'a vu écrire à l'époque dans certains journaux, "servomoteurs" et "cerveaux moteurs", mais il avait reconnu – bien avant que l'intelligence artificielle ne devienne à la mode – une analogie certaine entre les systèmes de régulation techniques et humains. Ne parlait-il pas, tout comme en médecine, d'homéostasie à propos de l'aptitude des asservissements à s'adapter à des conditions changeantes du milieu extérieur et à contrer des perturbations ? N'est-ce pas lui qui avait appelé au CERA M. Lévy qui travaillait sur la transmission de l'information par les synapses et tentait, déjà en 1965, une utilisation dans le domaine de la reconnaissance de formes tandis que J. Richalet s'intéressait aux régulations physiologiques ? N'est-ce pas lui, qui, en collaboration avec le canadien Claude Fortier, devait écrire nombre de publications dans lesquelles l'Automatique trouvait application dans le domaine de la régulation endocrine ?

Mais les limites de son savoir ne s'arrêtaient pas là. Très vite, il s'était mis à la graphologie, une discipline dans laquelle il devait devenir aussi un expert de renommée mondiale (et non seulement pour l'écriture latine, mais aussi l'écriture cyrillique et ... l'écriture musicale !).

D'autres pourraient en parler plus savamment que nous, mais beaucoup se rappellent, avec des souvenirs parfois mitigés, de son premier livre sur la matière, dans lequel il avait pris pour illustration les écritures de tel ou tel d'entre nous (Psychologie de l'écriture, Payot, 1969).

Automaticien, polyglotte (on a déjà dit qu'il parlait couramment une dizaine de langues ; il les connaissait suffisamment, sur le plan littéraire comme scientifique, pour devenir, à l'occasion, traducteur quand cela pouvait rendre service à un ami, comme il le fit du livre de Wegrzy en polonais), graphologue, psychologue... ; c'était aussi un pianiste accompli, capable de passer une nuit au piano à jouer du Chopin sans partition. Mais où arrêter l'inventaire de ses connaissances ? Un tel se souvient qu'en excursion avec lui au Grand Canyon du Colorado, Jean-Charles Gille lui décrivait toutes les couches géologiques apparentes, leur âge, les fossiles qu'elles contenaient... un autre, qu'il était inépuisable en histoire, un troisième...

On aurait pu craindre qu'une telle accumulation de savoir eût déshumanisé le personnage. Pourtant, pour tous ceux qui l'ont connu, au-delà de ses connaissances prodigieuses,

sa fidélité en amitié a été tout aussi remarquable ; une fidélité qu'il cultivait d'autant plus que l'ami était en difficulté ou dans la peine, indépendamment de tout ce qui pouvait en résulter pour lui, indépendamment des circonstances.

Personnalité hors du commun, scientifique exceptionnel, homme d'une rectitude absolue, Jean-Charles Gille n'a pas eu dans son pays la reconnaissance que ses qualités intellectuelles et morales exemplaires auraient méritée. Il restera une référence et un modèle pour ceux qui, comme nous, ont eu le privilège de le connaître.

André J. FOSSARD
ONERA-Toulouse

GILBERT KLOPFSTEIN

Formation

Sup'Aéro puis Sup'Élec.

Ingénieur Militaire de l'Air, recrutement par concours.

Formation pilote de chasse à l'école de Meknès.

Formation pilote et ingénieur d'essai à l'EPNER.

Caractéristiques personnelles

Passionné d'aéronautique et de tout ce qui est technique (de la mécanique à l'électronique, en passant par l'aérodynamique, la thermodynamique...).

Excellent pilote, major de sa promotion à Meknès, d'une très grande adresse manuelle au service d'une réflexion permanente sur tous les aspects techniques du vol.

Réfléchir, pendant qu'il maniait les commandes, à tous les phénomènes physiques concernant le comportement de son avion et de ses équipements était pour lui une seconde nature.

Compétence et culture technique approfondie ne l'entraînaient pas à des réflexions de type "savant cosinus", mais au contraire à une simplification aux aspects essentiels basés sur un solide bon sens.

Capacités didactiques remarquables : excellent formateur (très vivant même, avec certains aspects passionnels et provocateurs de son caractère !).

Sa carrière

Première affectation : le détachement du CEV à Colomb-Béchar, fin 1959.

Chargé des essais d'engins air-air et air-sol, il a, en particulier, participé aux essais du MATRA R 530.

Muté en 1962 à la Section avions du CEV, il y fut chargé, par Pierre Tamagnini, des essais du Breguet 941, puis du Mirage III E.

Lors du lancement du programme Concorde, il reçut la mission d'étudier, de faire modifier et de mettre au point le Mirage III B 225 à stabilité variable qui avait été lancé par STAé/EG (Pierre Lecomte) pour l'aide au développement du transport supersonique.

L'avion à stabilité variable, avec sa capacité remarquable de démonstration des paramètres de la mécanique du vol et de leur influence sur les qualités de vol et le pilotage, a sans doute été pour lui déterminant dans ses réflexions sur le pilotage qui l'ont conduit à développer les concepts d'utilisation du vecteur vitesse, de l'incidence et de l'énergie totale.

En 1969, il fut désigné (action de J. Forestier, en particulier) responsable de la conception et du développement d'un avion de démonstration pour les élèves de Sup'Aéro : le Nord 262 n° 55. Cet avion a servi à illustrer en vol, pour de nombreuses générations d'élèves, les divers aspects de la mécanique du vol.

Gilbert Klopstein a alors équipé cet avion d'un matériel destiné à étudier les principes de figurations d'informations en tête haute et en tête basse dont il avait été le concepteur.

En 1972, ces réalisations ont été présentées, avec cet avion, à l'état-major de l'USAF à Wright Patterson AFB et au Laboratoire d'essais en vol du Massachusetts Institute of Technology, à Boston. La réaction de ces deux organismes fut proche de l'enthousiasme, en préconisant l'équipement des avions américains avec du matériel basé sur les concepts présentés.

La suite des travaux consista à étudier l'impact que pouvait avoir l'apparition de la technologie numérique sur l'équipement des avions : il s'agissait en particulier de tirer le meilleur parti des nouvelles possibilités de mesure et de calcul. Le résultat de cette série d'études, comportant notamment le pilotage direct de la pente et de la route, a donné lieu à quatre rapports d'essais très positifs du CEV.

Son apport technique

Application des paramètres "vecteur-vitesse" et "énergie totale" en association en pilotage tête haute à travers un collimateur, à une figuration synthétique du monde extérieur (y compris et surtout la piste d'atterrissage) de façon à uniformiser la technique de pilotage quelles que soient les conditions météorologiques.

Ces concepts – qui ont mis beaucoup de temps à percer car ils choquaient les habitudes – sont maintenant appliqués sur des avions d'armes de part et d'autre de l'Atlantique, sur des navettes spatiales américaines, sur de nombreux avions de ligne américains et sur le Falcon 2000. Une partie l'est également sur les Airbus.

L'esprit entièrement focalisé vers ses réflexions techniques, G. Klopstein ne s'est jamais soucié de l'évolution de sa "carrière" au sens traditionnel du terme. Il quitta la DGA en 1982, pour se consacrer principalement à l'enseignement, en formant des générations enthousiastes d'élèves de l'ENSAé et de l'ENAC à la mécanique du vol et au pilotage moderne.

Jean MONFORT

PIERRE LEROY (1893-1969)*

“Pierre Leroy, à sa sortie de Sup'Aéro en 1914, fut envoyé comme instructeur à l'École de Dijon où il obtint les meilleurs résultats dans la formation rapide des pilotes et mécaniciens de l'aviation militaire française. Mais, désirant absolument partir dans une unité combattante, il fut affecté au Groupe d'escadrilles désigné pour la Russie. Il rentra en France en 1918, titulaire de la Croix de Saint-Georges, et rejoignit le Service technique de l'aéronautique. La plus grande partie de sa carrière s'effectua à la société AÉRAZUR dont il devint directeur technique.

Pierre Leroy était un travailleur acharné. Il était passionné par son travail et ne cessait d'y penser. Il était de ces hommes exigeants envers eux-mêmes et jamais satisfaits de leur ouvrage. Le soir et le dimanche, il emportait chez lui ses dossiers pour redessiner ou pour refaire ses calculs. Mais le travail intellectuel, chez lui, ne se séparait jamais de l'action, et l'action, pour lui, c'était d'être présent partout, à l'atelier, dans les bureaux d'études, aux essais. Et les essais, cela signifiait : Brétigny, Cazaux, les îles du Levant, Colomb-Béchar, ou le Centre d'Essais du Pacifique. Ces voyages épuisants ne le rebutaient jamais, malgré la fatigue considérable qu'il s'imposait encore ces dernières années et qui a altéré sa santé.

Pierre Leroy avait besoin de vivre les essais de ses prototypes ; il fallait qu'il s'assure personnellement de la parfaite préparation du matériel, il fallait qu'il le voie fonctionner, de ses yeux avertis et pénétrants, il fallait surtout qu'il puisse l'examiner après l'essai pour en tirer de précieux enseignements. Celui qui, comme moi, a pu observer Pierre Leroy examinant minutieusement un missile après sa récupération au sol, a pu assister à un étrange dialogue muet entre l'homme et la matière, où celle-ci, pressée et harcelée par son maître, doit lui raconter, par le menu détail, tout ce qui lui est arrivé pendant les quelques instants qu'a duré son aventure.

Par cette minutie dans le travail, cet esprit d'analyse sans complaisance, alliés à une vaste culture scientifique sans cesse tenue à jour, Pierre Leroy avait acquis dans sa spécialité une expérience unique. C'était l'expert qui faisait autorité et qu'on venait consulter pour tous les problèmes difficiles.

Il n'est pas possible de citer tous les missiles dont il a dessiné les dispositifs de récupération, les canots, les gilets de sauvetage, les ballons qu'il a conçus, mais il faut citer au moins le “parachute en croix”, dont il fut le premier à avoir l'idée et dont les applications sont illimitées.

Comme toujours quand il s'agit d'une idée féconde, le principe en est extrêmement simple : au lieu de construire un parachute dont la forme géométrique théorique est un disque plat ou une calotte sphérique, on utilise une forme en croix. Outre sa facilité de construction, il offre des propriétés remarquables vis-à-vis du choc à l'ouverture. Avec ce parachute qui n'a aucun équivalent dans le monde, on a équipé en parachute de freinage tous les avions français et on a obtenu, sur bombe freinée, des ouvertures à des vitesses jamais atteintes auparavant.

(*) Ancien directeur technique de la société AÉRAZUR

Cette masse de connaissances, cette expérience technique et humaine, il n'en était pas jaloux. Il ne demandait qu'à en faire profiter les autres. Il aimait parler de ses matériels aux jeunes de Sup'Aéro, "son école", à l'occasion des travaux pratiques et des bureaux d'études qu'il dirigeait, comme tout ce qu'il faisait, avec une conscience et une minutie infatigables. Mais, s'il savait enseigner, il savait aussi que, dans son métier, on reste toujours un élève et que l'on n'a jamais fini d'apprendre.

Il était d'une rare honnêteté intellectuelle et d'une exceptionnelle modestie. Quand il enregistrait des succès, il n'en parlait jamais et je devais toujours l'apprendre indirectement. Par contre, il lui arrivait de venir frapper à ma porte pour me raconter ses échecs. Je ne pouvais guère lui être utile car il connaissait son affaire infiniment mieux que moi, mais il avait besoin de me confier ses préoccupations et ses ignorances. A-t-il jamais réalisé combien j'étais touché et ému par ces marques d'amitié ? Je ne pouvais même pas prétendre à lui redonner confiance et courage, car sa volonté était sans défaillance.

Il avait 64 ans quand il me demanda de se joindre à mes élèves de Sup'Aéro pour faire son premier saut en parachute à La Ferté Gaucher, lui, le pilote de 1915 ! Je me souviens aussi des nuits que nous avons passées en mer, en naufragés volontaires, pour juger de la tenue de ses canots de sauvetage par grosse mer.

Pierre Leroy se dépensait sans compter, avec joie et enthousiasme, non seulement pour son travail, mais aussi pour ses amis. Aussi exigeant il était pour lui-même, aussi indulgent et prévenant il était pour les autres. Il aimait rendre service et savait trouver les attentions les plus délicates pour ses amis. Il avait le sens social et ce n'est pas par hasard qu'il était le délégué de sa promotion de Sup'Aéro. Une extrême sensibilité lui faisait apparaître instantanément la pensée et les sentiments de son interlocuteur ; la dialectique lui était totalement étrangère ; il appartenait à cette catégorie de gens qui sont paralysés, dans la contestation, par la faculté de saisir aussitôt le point de vue du contradicteur. Le seul défaut que je lui ai connu et que je lui ai souvent reproché, c'est d'être trop indulgent et trop modeste. Pour toute réponse, il avait alors ce bon sourire généreux et tranquille qui reflétait toute la pureté d'une âme d'élite.

Et c'est ce merveilleux sourire qui est gravé pour toujours dans notre mémoire."

*Allocution prononcée, lors des obsèques de Pierre Leroy, par l'Ingénieur Général de l'Armement
Robert MUNNICH.*

GÉRARD O'MAHONY

Gérard O'Mahony, né en 1924, débute en 1947 comme ingénieur navigant d'essais au CEV, avec la charge des essais des matériels électriques sur les avions prototypes de l'époque (Ouragan, Mystère, Nord 2500...) ou sur avions de servitudes sur lesquels il effectue plus de 1 000 heures de vol.

En 1954, il entre chez Labinal comme chef du service technique, où il développe d'abord une dynamo de 12 kW (un record pour l'époque) et une dynamo démarreur de 4 kW, puis il met au point les premiers vario-alternateurs Labamatic FC 4 et FC 15 qui seront montés sur les Mirage III C et Mirage IV, et sur lesquels deux brevets sont déposés en juin et décembre 1957.

Il entre à la Société Auxilec en 1958 comme directeur technique, et effectue la mise au point des alternateurs de 18 kVA pour la Caravelle et de 6 kVA pour le Transall et le Breguet Atlantic. Puis il conçoit un nouveau vario-alternateur, l'Auxivar 9 kVA, sur lequel un brevet est également déposé en mars 1959 ; cette machine équipera le Mirage III E et ses dérivés à l'exportation. Il développe ensuite les modèles de vario-alternateurs dérivés qui équiperont le Transall, le Breguet Atlantic, le Jaguar E et le TX japonais, et le Mirage F1. Il effectue également de nombreuses études pour la DRME : machines à grande puissance massique (50 000 t/mn, 30 kVA), à aimants à terres rares et solid-rotor.

En 1976, il entre au Centre de recherches de la CEM et met au point une méthode de calcul de champ magnétique qui fera l'objet d'une publication dans le Compte-rendu de l'Académie des sciences de Paris (t. 295, série II, 5 juillet 1982).

Il sera enfin, de 1984 à 1994, ingénieur conseil indépendant avec en particulier des travaux pour IRT, Précilec et Renault

Philippe MARTELLI

FIRMES CARACTÉRISTIQUES :

AÉRAZUR

Air Équipement

Auxilec

Crouzet

Intertechnique

SAGEM

SFENA

SFIM

SODERN

AÉRAZUR

La société AÉRAZUR a été créée en 1927 pour la fabrication de tout le matériel d'aérostation pour le ministère de l'Air. Elle a repris les activités de la société Tinsonnier, et a fusionné en 1928 avec les Établissements Claude et Hatton, eux-mêmes créés au lendemain de la Première Guerre mondiale, constructeurs automobiles, puis producteurs de matériels roulants destinés à l'aviation, treuils pour ballons et véhicules ateliers. En 1927, l'entreprise s'installe à Issy-les-Moulineaux.

La société fabriqua ainsi, à ses débuts, des ballons d'observation et de protection aérienne, des treuils mobiles pour ballons, puis des parachutes de sauvetage et des véhicules spéciaux. C'est à cette époque que furent également conçus les premiers canots de sauvetage pneumatiques qui équipèrent les célèbres hydravions transatlantiques Croix du Sud et Lieutenant de Vaisseau Paris.

En 1937, une nouvelle usine est créée à Gennevilliers, puis en 1938, dans le cadre de la décentralisation des industries de Défense nationale, une unité de production est implantée à Cognac. Pendant la guerre, l'activité déclina et s'arrêta totalement en 1940.

Après la guerre, les activités automobiles de Gennevilliers furent regroupées avec celles des Établissements Carrier. L'usine d'Issy-les-Moulineaux fut le siège des études et des fabrications mécaniques, tandis que la production principale était faite à Cognac.

De 1945 aux années soixante, la société, tout en continuant à développer des ballons, a eu une grande activité aéronautique du fait que les équipements de vol devaient rattraper les progrès qui s'étaient imposés dans les armées en opérations et, se renouveler à la suite de l'apparition du nylon qui s'imposait comme composant principal en ce domaine. Son directeur technique, Pierre Leroy, dirigea avec passion et réalisme toute cette activité de conception : pantalons anti-g et matériels de secours, parachutes, gilets de sauvetage et paquetage de survie comprenant le canot pneumatique.

Il y eut, d'autre part, à renouveler tout le matériel des troupes aéroportées, assurer les largages de charges lourdes, et permettre de nombreuses applications spécialisées de parachutes. AÉRAZUR créa dans ce cadre le parachute en croix qui est largement utilisé en parachute-frein à l'atterrissage et pour de nombreuses stabilisations.

Après 1960, les parachutes sportifs et à hautes performances n'ont plus été autant suivis par la DGA, car ils ne firent alors plus partie des matériels aéronautiques.

De remarquables combinaisons haute altitude permettant aux équipages de respirer avec de fortes surpressions d'oxygène par rapport à la cabine ont été faites, mais sont restées au niveau de l'expérimentation car le besoin en exploitation ne s'est pas confirmé.

En 1955, AÉRAZUR se lança dans la conception de barrières d'arrêt pour avions militaires, avec un filet multiple en nylon, qui fit l'objet d'un brevet en 1959, associé à un système de relevage. Elles furent adoptées par l'armée de l'Air, si bien que le centième engagement de barrière pût être fêté en 1964. Ces barrières furent installées à Toulouse et Filton (Angleterre) pour les essais de Concorde, mais le marché civil ne se développa pas.

En 1963, AÉRAZUR commença, pour les expérimentations militaires nucléaires du CEA, à Mururoa, la fabrication de ballons captifs géants, jusqu'à 15 000 m³. Ils étaient, à cette époque, les plus grands du monde.

En 1969, AÉRAZUR se scinda en une société holding, AÉRAZUR SA, et une société d'exploitation, filiale de la précédente, AÉRAZUR CA (constructions aéronautiques) réalisant un chiffre d'affaires de 60 MF(HT) avec un effectif de 600 personnes. AÉRAZUR CA, rachetée par Zodiac en 1978, est devenue d'abord AÉRAZUR-EFA après l'absorption d'EFA, puis a repris le nom unique d'AÉRAZUR. Cette filiale est à l'origine de la branche aéronautique du Groupe Zodiac.

AIR ÉQUIPEMENT

Cette société a été fondée en 1934 par Charles Waseige, ancien directeur général des Établissements Farman, pour développer des matériels originaux : trains d'atterrissage, relais d'accessoires pour moteurs, générateurs électriques et pneumatiques (c'est ce dernier équipement qui orienta le choix du nom de la société).

Dès la fin de la guerre 1939-1945, sous la présidence de René Lacoste, la société s'est dirigée vers l'obtention de licences étrangères (Bendix USA...), pour la réalisation de matériels divers : radio, instruments de pilotage, générateurs électriques, radar météo, équipements pour carburant...

Au cours des années soixante, des études puis des réalisations ont été entreprises dans le domaine des servomécanismes hydrauliques et électriques afin de parfaire la vocation généraliste qui paraissait être le destin d'Air-Équipement.

D'abord autonome, Air-Équipement devient rapidement la Division aéronautique du Groupe DBA, dont les deux autres divisions sont dans le domaine automobile : Ducellier (équipements électriques), Bendix (équipements mécaniques, freins).

En 1986, Air-Équipement fusionne avec Bronzavia pour devenir la Division Bronzavia – Air-Équipement du Groupe DBA, puis de Bendix France, dans le cadre du Groupe Allied.

En 1988, Bronzavia – Air-Équipement devient filiale de la société Thomson-Lucas, puis, en 1989, filiale et ensuite division de Lucas France, sous le nom de Lucas Air-Équipement. Par la suite, le nom d'origine disparaît, mais les lignes de produit issues de Air-Équipement poursuivent leur vie, au gré des fusions successives, dans les groupes Lucas Aerospace, TRW et Goodrich.

L'effectif de Air-Équipement a culminé à près de 2 500 personnes, dont 500 pour le secteur purement Études et a acquis, au fil des années, un caractère pluridisciplinaire affirmé, dû à la diversité des domaines couverts (mécanique, électricité, électronique, hydraulique, pneumatique) aussi bien qu'à la multiplicité des secteurs utilisateurs (avions, hélicoptères, engins, satellites, marine, industrie nucléaire).

Principales réalisations

Le caractère pluridisciplinaire signalé ci-dessus explique la difficulté à choisir les équipements jugés les plus significatifs. On se contentera donc d'énumérer ci-après les appareils ayant conduit à des réalisations importantes en qualité ou en quantité.

Relais d'accessoires pour moteurs

Ensemble mécanique actionné par le moteur et entraînant lui-même plusieurs équipements nécessaires au fonctionnement de l'avion : générateurs électriques, pompes hydrauliques ou pneumatiques...

Sur des principes conçus dès le début de Air-Équipement (brevets en 1937), ces relais ont donné lieu à des applications sur avions civils (Caravelle 1955-1959) et militaires (Alizé, Étendard IV, Super Étendard, Transall, Mirage III, Mirage F 1, Mirage 2000).

Treuils pneumatiques, électriques, hydrauliques

Naturellement destinés aux hélicoptères, ces treuils ont été utilisés, soit pour une fonction de maniement de charges, soit pour le problème spécifique du sauvetage.

On citera, en particulier :

- un treuil pneumatique pour les hélicoptères Alouette II (1955) et Alouette III ;
- des treuils électriques pour les hélicoptères Gazelle (1972), Écureuil, Dauphin ;
- un treuil hydraulique pour les hélicoptères Super Frelon, Puma, Super Puma ;
- d'autres applications concernant des hélicoptères étrangers : Sikorsky S 61, Westland Lynx, MBB BK 117, Agusta A 109.

Servocommandes pour avions et hélicoptères

Après une première étape (1955-1960) de construction sous licences étrangères de servocommandes de gouvernes, pour l'hélicoptère Sikorsky S 58 et pour l'avion Caravelle, Air-Équipement a conçu, à partir de 1960, et réalisé en série :

- une servocommande originale pour la Caravelle 10 B 3 ;
- le système de sensation artificielle et le dispositif de basculement de nez pour l'avion Concorde ;
- de nombreux types de servocommandes de gouvernes principales et de gouvernes secondaires ;
- un servomoteur de sensation artificielle ;
- un dispositif de bras de levier variable ;
- un servomoteur de pilote automatique ;
- un vérin de porte cargo ;
- plusieurs types de vérins de plan horizontal réglable, pour les Airbus A 300, A 300-600, A 310, A 320, A 330/340 ;
- les vérins et blocs hydrauliques d'aérofreins et d'entrées d'air du Mirage 2000 ;
- les servocommandes de rotor principal des hélicoptères Lynx WG 13 et Écureuil ;
- les servocommandes de pilotage de l'hélicoptère Dauphin
- les servocommandes de l'hélicoptère MD 900 Explorer.

Servomécanismes pour missiles

Air-Équipement a parallèlement développé et produit :

- les blocs de puissance à servocommandes électrohydrauliques, pour l'orientation des tuyères, sur la quasi-totalité des missiles balistiques SSBS et MSBS ;
- les servomoteurs électriques de pilotage du missile tactique nucléaire Pluton et du missile aéroporté nucléaire ASMP.

Autres équipements

Il convient de citer brièvement d'autres réalisations :

Systèmes à carburant pour moteurs :

- régulateur de post-combustion pour Atar ;
- pompes à carburant pour Tyne, Adour, M 53 ;
- turbopompe pour Olympus.

Instruments de pilotage :

- indicateur multiple de position de gouvernes ;

- indicateur de vitesse verticale, pour Concorde ;
- gyromètre, pour missile Roland.

Servocommandes pour plates-formes de tir :

- actionneur de rampe de lancement Hot, sur hélicoptère Dauphin ;
- actionneur de tourelle Mephisto, sur VAB.

Équipements hydrauliques :

- centrales/bâches, sur l'hélicoptère Super Puma ;
- relais de freinage, sur l'hélicoptère Dauphin.

Équipements pneumatiques :

- vannes pour sous-marins SNA et SNLE ;
- équipements pour systèmes dégivrage.

Électronique :

- calculateur de sensation artificielle pour Concorde et Airbus A 300 ;
- commande de puissance des moteurs électriques, pour les treuils et les actionneurs de missiles et de tourelles ;
- module associé au vérin de plan horizontal (concept "smart actuator") sur Airbus A 330/A 340 ;
- génératrices et alternateurs pour hélicoptères et chars ;
- dosimètres de radioactivité ;
- mécanismes pour centrales nucléaires.

Paul REYNAUD

Ancien directeur Stratégie et produits nouveaux, à Air-Équipement

AUXILEC

La Société Auxilec est fondée en 1957 par Laurent Moiroud, ancien ingénieur de Thomson Houston. Elle s'installe à Colombes, avec la vocation de concevoir et de fabriquer des équipements électriques et électromécaniques pour l'aéronautique et les applications militaires.

L'activité se développe, au départ avec des convertisseurs tournants pour l'aéronautique, puis Auxilec est, en particulier, retenue pour fournir les générations à fréquence constante des Mirages III E, avec un Auxivar. Une unité de production est alors créée dans l'Oise, à Méru, en 1962. L'Auxivar va ainsi équiper tous les avions militaires français : Mirage F1, Jaguar, Mirage 2000.

En 1973, Auxilec entre dans Thomson-Lucas, holding franco-britannique regroupant des sociétés constituées par Thomson-CSF et Lucas Aerospace.

En 1976, Auxilec se renforce en rachetant la Société Électrotechnique de Billancourt (SEB) et Ragonot, qui fabriquent également des équipements électrotechniques.

En 1989, Thomson-CSF se sépare de Lucas, mais conserve Auxilec comme filiale à 100%.

Parallèlement, l'export se développe : une licence d'Auxivar 12kVA est vendue au Japon à Shinko en 1971 pour l'équipement de l'avion F1, puis en 1979 en Inde, à HAL. En 1985, une filiale est créée aux USA pour assurer le service après vente en Amérique du nord, AUXILEC INC.

En 1988, Auxilec s'installe à Chatou où sont regroupées les activités précédemment implantées à Boulogne-Billancourt, Colombes et Malakoff, ainsi que celle rachetées à Bronzavia et Air-Équipement ; l'usine de Méru est rénovée et agrandie.

En 1990, Auxilec rachète encore la Société française de moteurs à induction (SFMI), spécialisée dans la fabrication de moteurs électriques de faible puissance, puis en 1991 reprend les activités d'Électronique Aérospatiale (EAS), lors de la création de Sextant avionique, joint-venture créé entre Thomson-CSF et Aérospatiale. En 1997, toutes les activités de production sont regroupées à Méru.

En 1998, une filiale asiatique est créée à Singapour pour l'après-vente des équipements en service en Asie du Sud-Est.

En 2001 enfin, Thomson-CSF devient Thales, et Auxilec devient Thales Avionics Electrical Systems (TAES).

CROUZET

1. UNE HISTOIRE LIÉE À L'AÉRONAUTIQUE

Pour comprendre comment s'est développée l'activité de Crouzet, il faut s'arrêter quelques instants sur l'histoire d'une société passée, en cinquante ans, d'un atelier artisanal à une entreprise de taille internationale.

La genèse

1921 : l'atelier de mécanique générale d'Édouard Crouzet est installé à Valence pour la réparation de machines et de voitures, puis se spécialise rapidement dans la fourniture de pièces détachées pour machines textiles. Activité alors florissante dans la région.

1934 : Monsieur Jullien-Davin entre dans cette petite structure pour y apporter ses compétences et les capitaux qu'elle recherchait. L'affaire était dans une passe difficile et ne comptait que 18 employés.

1937 : les effectifs montent à 60 personnes et l'activité progresse en volume et en qualité grâce à une position reconnue de sous-traitant de Michelin. Après le décès de M. Édouard Crouzet, M. Jullien-Davin prend la direction de l'atelier qui, soutenue par l'État, se lance avec succès dans l'étude et la réalisation de machines spéciales pour les établissements d'armement.

1939 : M. Jullien-Davin devient gérant directeur général de la SARL Crouzet nouvellement créée qui emploie 150 personnels à la veille de la guerre.

La guerre

1942 : une filiale de LIP, la société Saprolip, rachetée par le général Garnier, ancien directeur de l'atelier militaire de Puteaux, basée à Issoudun, se replie en zone libre à Valence.

Elle avait notamment réalisé en 1939 un calculateur mécanique de position pour aéronefs, sur les brevets du général Garnier. Fred Lipman, en désaccord avec ce dernier, dut quitter la société. Ayant alors des difficultés à retrouver du travail en tant qu'Israélite, il est accueilli par Crouzet en qualité d'ingénieur conseil.

Il est suivi par trois de ses collaborateurs dont Roger Crommen, futur DGA de Crouzet de 1954 à 1963, et Jacques Sapy, créateur en 1945-1946 du premier totalisateur d'estime. Devenu directeur technique puis administrateur, Roger Crommen se vit décerner la médaille de l'aéronautique, au titre de la Défense en 1963. Il en fut de même pour Jacques Sapy.

1944 : Fred Lipman regagne LIP à Besançon. En août, l'usine est anéantie par l'explosion, en gare de Valence, d'un wagon de nitroglycérine provoquée par les troupes allemandes en retraite. En septembre, la société se réinstalle dans des locaux loués rue Jean-Jacques Rousseau, qui abriteront plus tard les activités aéronautiques.

1945 : au milieu de difficultés de tous ordres, Crouzet se reconstitue par ses propres moyens et avec 70 personnes prennent naissance les trois futurs départements : machines-outils d'horlogerie, composants d'automatismes, aéronautique.

Pour faire face à ses besoins de capitaux, en 1948, Crouzet cède à l'industrie horlogère suisse, pour 40 millions de francs de l'époque, les brevets d'une machine automatique trois axes. Étudiée par Jacques Sapy, cette machine automatique ouvrait l'ère de l'horlogerie industrielle.

La croissance

1950 : ce sera une décennie d'expansion rapide. Partant en 1946 d'un CA de 200 KF (NF) avec 131 personnels, la société atteint en 1961 un CA de 54,5 MF pour un effectif de 1 560 employés.

La croissance sera marquée notamment en 1955 par la décision de créer des filiales à l'étranger dont la première en Italie.

Les différentes lignes d'équipements pour l'aéronautique apparaissent. Les anémomètres, puis les centrales aérodynamiques, les totalisateurs d'estime, puis les calculateurs de navigation, sont retenus pour les Vautour, Breguet Alizé, Mirage III R.

1960 : pour faire face au développement de ses activités, Crouzet acquiert un vaste site industriel, rue Jules Védrières, sur lequel sont construits de nouveaux bâtiments.

1966 : Crouzet est constituée en société anonyme, et en 1968 se structure en quatre divisions dotées d'une large autonomie technique et commerciale :

- division Aérospatial ;
- division Composants d'automatisme ;
- division Automatisation et Machines ;
- division Systèmes d'automatisation.

1969 : introduction de la société à la Bourse de Paris. Du fait de l'importance de ses effectifs sur le site de Valence, 3 360 personnes, Crouzet décide de décentraliser son développement en proche région à Alès et à Crest.

Le chiffre d'affaires consolidé est alors de 231 MF pour un effectif de 4 279 personnes, dont 70 MF et environ 800 collaborateurs pour la division Aérospatial.

Activité de la division Aérospatial

L'activité de cette dernière durant la décennie 1960 est marquée par plusieurs réalisations :

1962 : étude d'une centrale aérodynamique numérique, et essais en vol au CEV de Brétigny ;

1964 : système de navigation et de visualisation tactique ASM pour le Breguet 1150 Atlantic ;

1965 : centrale aérodynamique du supersonique Concorde, calculateur de navigation pour le Transall, calculateur et tables tactiques de l'hélicoptère Super Frelon ;

1967 : Crouzet est retenue pour étudier et réaliser le calculateur de navigation et l'indicateur associé de l'AMD-Breguet Jaguar, calculateur utilisant pour la première fois les techniques numériques dans ce type de système.

Le poids de l'aéronautique

1970 : la société consolide son activité et ses implantations en France et à l'étranger. Construction des usines d'Alès, de Crest et, à Valence en 1974, de l'usine de Briffaut pour

accueillir la production de la division Systèmes d'Automatisation dans les secteurs des télécommunications, péages, distribution des titres de transport.

Dans le secteur aérospatial et Défense, création par acquisition de deux filiales : Badin-Crouzet et Safare-Crouzet.

Rétrospectivement, les années soixante-dix à quatre-vingt s'avèrent déterminantes pour l'avenir de la division Aérospatial et, plus tard, peut-être de toute la société. Dans la suite du système de navigation du Jaguar, Crouzet étudie et réalise des calculateurs numériques de plus en plus exigeants en termes d'intégration des fonctions traditionnelles et nouvelles, mais aussi de performances, de coût et de délais.

Ces systèmes sont d'abord développés pour les avions d'armes, notamment à l'export, Mirage III, Mirage-Milan, Mirage F1, puis pour les hélicoptères : système de navigation Nadir pour Puma et Gazelle. Tous ces systèmes nécessitent une étroite coopération entre les avionneurs et les équipementiers concernés. Des étapes technologiques importantes sont ainsi franchies : capteurs miniaturisés et plus performants, intégration couches épaisses et couches minces de l'électronique, systèmes de navigation hybrides inertie-doppler.

Ces nécessaires évolutions techniques dans le développement de systèmes embarqués ont incité Crouzet à s'engager très tôt dans des structures de coopération : en 1973, au sein du GIE ISPENA pour l'intégration des systèmes de pilotage et de navigation, études et réflexions qui donneront également naissance au groupe de travail ITI pour l'intégration du traitement de l'information.

À ce stade, Crouzet confirme son engagement par une prise de participation au capital de plusieurs sociétés participantes, et pour la plus importante à hauteur de 25 % dans le capital de SFENA.

En 1978, par la création avec SFENA d'une filiale en nom collectif dénommée SV2, notamment pour le développement des systèmes de navigation inertielle, dits sans plateforme : ISP. C'est ainsi que le système Sextan, premier système hybride-ISP à gyromètres laser, volera pour la première fois sur hélicoptère au CEV de Brétigny le 27 décembre 1979.

Le regroupement

1980 : M. Jullien-Davin quitte la présidence de la société le 30 septembre et M. Roger Champt est nommé président-directeur général.

Le groupe Crouzet compte alors près de 6 000 personnes dans le monde, pour un chiffre d'affaires de 1,2 milliard de francs.

La division Aérospatial participe aux différents programmes avions et hélicoptères avec ses produits anémobarométrie, navigation, calculateurs, visualisation et commandes, magnétométrie. Il faut noter également les progrès des études et développements Navstar, reconnaissance et synthèse vocale, anémométrie laser.

Poursuivant ses efforts de rapprochement, Crouzet finalise les négociations dans le but d'accroître significativement sa participation au capital de SFENA.

1981 : L'opération est approuvée par l'assemblée générale du 14 avril 1981. Crouzet détient 83,3 % du capital de SFENA, l'État français, la CDC et l'Aérospatial entrant par ailleurs ensemble au capital de Crouzet à hauteur de 33,4 %.

Le nouveau groupe ainsi constitué représentera, fin 1981, une entité de près de 2,4 milliards de francs de chiffre d'affaires, dont plus de 1,2 milliard dans le secteur aérospatial et Défense, avec un effectif de 8 822 personnes. Il répond ainsi aux souhaits des pouvoirs publics de voir se constituer en France des groupes industriels capables de faire face à la concurrence internationale dans le domaine des équipements aéronautiques.

1982 : après les élections de mai 1981, cette opération faisait l'objet de diverses prises de position négatives et, en décembre, le conseil d'État se prononçait dans le sens de l'annulation des décisions administratives ayant conduit au rapprochement financier.

Aérospatiale et Crouzet durent trouver une solution qui préserve les motivations initiales et assure à l'avenir une politique industrielle cohérente, tout en permettant le retour de SFENA dans le domaine public et le maintien de Crouzet dans le secteur privé.

Il en résulta la constitution d'une société commune : SIELA détenue à hauteur de 50,3 % par Aérospatiale et 49,7 % par Crouzet, SIELA détenant 50,1 % du capital de SFENA. L'ensemble des opérations est achevé en décembre 1982. Du fait du rôle imparti à SIELA, le maintien de la filiale SV2 n'était plus nécessaire, et sa dissolution était prononcée dans le même temps.

1988 : au terme de sa dernière année d'existence, le groupe Crouzet réalise un chiffre d'affaires de 2 331 MF pour un effectif de 4 879 personnes.

Aérospatiale détient alors 41,2 % du capital de Crouzet dont la participation dans SIELA reste inchangée. La participation de Crouzet au capital de SFENA en direct est réduite à 23 %. La division Aérospatial de Crouzet a réalisé cette même année un CA de 672 MF avec un effectif de 1 070 personnes dont 370 ingénieurs et cadres.

Dans le secteur aéronautique, ses lignes de produits traditionnelles – systèmes de navigation et de gestion du vol, anémométrie, altimétrie, mesure de pressions, magnétométrie, commandes et visualisation – lui assurent une position reconnue particulièrement sur les hélicoptères et les avions militaires.

La division Aérospatial aborde avec succès le marché de l'aviation commerciale en anémométrie et mesure de pression. En radionavigation, elle est le seul concepteur et fournisseur européen d'équipements Oméga et Navstar.

La compétitivité de ses produits est assurée par un savoir-faire et une expérience très spécifiques dans les techniques et technologies des calculateurs, de l'intégration électronique et microélectronique et des capteurs. Les nouveaux capteurs micro-usinés dans le silicium ouvrent de prometteuses perspectives.

Fin 1988 la nécessaire et longue marche vers le regroupement de l'industrie des équipements aéronautiques aborde une nouvelle étape lorsque Aérospatial et Thomson-CSF décident de créer ensemble un pôle de taille européenne en électronique de vol.

Crouzet, société cotée en bourse, servira encore de structure d'accueil pour rassembler les différentes entités : Crouzet, EAS, SFENA et la division Avionique Générale de Thomson-CSF.

Le nouvel ensemble ainsi constitué prend le nom de SEXTANT Avionique.

C. VUILLEMIN

2. L'ÉVOLUTION DE CROUZET, FONCTION DES CHOIX TECHNIQUES

En 1958, Crouzet était une entreprise qui ne pratiquait que la mécanique. Le totalisateur d'estime, dérivé du totalisateur Garnier-Saprolip, en est l'illustration : un moteur électrique continu, régulé mécaniquement en vitesse, fournissait l'énergie nécessaire à l'entraînement des organes mécaniques de calcul.

Sous l'impulsion de Roger Bezaud qui avait pris conscience de l'indispensable association de l'électronique à la mécanique pour la technique des asservissements, Crouzet procéda en 1958 à l'embauche d'une équipe d'électroniciens des laboratoires Derveaux, dont l'ensemble du personnel venait d'être licencié. Cette équipe, conduite par Georges Chancel, comportait un ingénieur, deux agents techniques, un maquetiste.

Ce virage était absolument nécessaire à la poursuite des activités aéronautiques de Crouzet (anémométrie et navigation à l'estime). La maîtrise des asservissements ne pouvait se satisfaire de la mécanique horlogère. D'où une rapide mutation vers la mécanique de précision. D'autre part, l'électronique, d'abord avec tubes subminiatures, puis avec transistors en germanium et ensuite au silicium, pénétra l'ensemble des activités aéronautiques de Crouzet et permit une notable amélioration des performances ainsi que de nouvelles solutions.

Le début des années soixante fut marqué par la prise de conscience de la rupture technologique qui se profilait à l'horizon, dans le domaine électronique : l'association traditionnelle de composants élémentaires allait s'effacer au profit des composants intégrés fonctionnels. Il devint alors nécessaire de mettre en place un nouvel outil permettant le développement des technologies d'assemblage, assurant miniaturisation et fiabilité des liaisons entre composants fonctionnels. D'où l'investissement en moyens nouveaux permettant l'acquisition de connaissances spécifiques et la compétence pour l'étude et la production de l'électronique et de ses câblages (circuits imprimés multicouches, circuits souples, électronique couche épaisse, électro-formage, dépôts métalliques, etc.).

Cet important outil fut déterminant pour la reconnaissance de Crouzet par le CNES, dans le domaine de l'électronique spatiale. C'est aussi au début des années soixante que, afin de pérenniser l'activité anémométrique, fut décidé un important programme de développement d'un nouveau capteur de pression et que de nouveaux moyens spécialisés furent mis en place. Il en résulta un module capteur de pression très performant, à signal de sortie électrique. Ce capteur de pression fut reconnu par le Bureau national de métrologie en tant qu'étalon de transfert pour la comparaison des étalons primaires de France et du Royaume-Uni. Il fut utilisé par Dassault à partir du Mirage F 1 et par Aérospatiale sur Concorde (en remplacement du capteur Bendix).

Au cours de la deuxième moitié des années soixante-dix, Crouzet Aéronautique maîtrisait le domaine des techniques anémobarométriques (capteur de pression performant, à sortie analogique électrique, capteur à sortie numérique, en développement). Par contre, le secteur navigation autonome était, à terme, préoccupant du fait de l'inévitable abandon, sur avion, du doppler au profit de l'inertie.

D'où :

- une action commerciale et technique soutenue dans le domaine hélicoptère, vraisemblablement fidèle, pour un temps encore, au doppler ;
- une volonté d'examiner les solutions industrielles possibles dans le domaine des techniques inertielles.

Cette préoccupation pesa lourdement au sein de la direction général de Crouzet qui accepta alors des rencontres en vue de la recherche d'une solution de coopération, solution également souhaitée par les pouvoirs publics.

André DERRÉ

INTERTECHNIQUE

La société Intertechnique, proche des Avions Marcel Dassault, fut créée en 1951, en vue de renforcer les moyens de la branche équipements.

Pour les nouveaux besoins, elle suivit une démarche logique, par pas successifs :

- acheter du matériel, le plus souvent aux États-Unis, lorsqu'il n'y avait pas d'équivalent français ;
- fabriquer sous licence ;
- entreprendre un effort soutenu de recherche et développement en vue de l'indépendance technique, avec le soutien actif de la DGA.

Elle agit ainsi principalement dans deux domaines.

1. LA CIRCULATION DE CARBURANT ET LE JAUGEAGE

Ce dernier demande un effort particulier pour donner des indications valables de carburant restant malgré les formes complexes des réservoirs des avions. On est arrivé ainsi sur Concorde à exploiter plus de 70 points de mesure dans les réservoirs, dont on coordonne et rassemble les indications.

2. L'OXYGÈNE

Au moment de la création de la société, les inhalateurs français n'avaient pas les capacités des régulateurs étanches et à la demande utilisés normalement aux États-Unis. Aussi la société se fit importatrice de régulateurs A 14 et les installa sur avions, notamment sur les Ouragan.

Elle réalisa ensuite, pour les militaires, des régulateurs plus petits, mais assurant un emploi pleinement équivalent, ce qui en permettait l'installation dans les cockpits très chargés.

Pour les civils, l'évolution a porté plus sur les masques, et les dispositifs pour en assurer une mise en service sûre et rapide, en quelques secondes, en cas d'incident le demandant.

Dans ces deux voies, elle obtint de très bons résultats, se traduisant par une large exportation, y compris dans les États soviétiques.

SAGEM

En 1924, M. Marcel Môme fonde une petite société de mécanique employant quelques dizaines de personnes. En 1962, à son décès, SAGEM est une importante société réputée dans les domaines de la mécanique de précision, l'optique et l'hydraulique.

En 1938, SAGEM était entrée dans le monde de la gyroscopie à la demande de la Marine nationale, dont elle était un fournisseur important. À cette époque, tous les bâtiments de la Marine étaient équipés de gyrocompas allemands.

En 1956, Marcel Môme, ayant pressenti que les compétences de SAGEM en mécanique seraient précieuses pour la navigation inertielle naissante, investit dans une première salle blanche et recrute des ingénieurs d'études et des électroniciens. C'est le début de l'épopée inertielle qui allait faire de SAGEM la première société au monde, en dehors des États-Unis, pour la navigation et le guidage inertiels.

Au début des années soixante, SAGEM se voit confier par la DMA le développement et la réalisation de la navigation inertielle des sous-marins nucléaires lanceurs d'engins et du guidage inertiel des générations successives d'engins balistiques. Ces programmes capitaux pour la force de dissuasion seront des succès complets et apporteront à SAGEM un know-how et des moyens technologiques uniques en Europe.

Au début des années soixante-dix, un autre programme ambitieux, celui du système inertielle de navigation-attaque du Super Étendard, capable d'alignement initial sur porte-avions grâce à la technique nouvelle du filtrage de Kalman, ouvre à SAGEM le marché des équipements inertiels pour avions d'armes en France (Mirage 2000, Rafale...) et à l'étranger (notamment rétrofits).

SAGEM s'était lancée, quelques années plus tôt, dans les téléimprimeurs électromécaniques, qui allaient devenir électroniques à partir de 1964, avant d'être remplacés par le fax, dont SAGEM sera le N° 2 mondial.

SAGEM, qui s'était développée dans les années trente avec l'aide de la CSEE (Compagnie des signaux) et qui avait pris en 1939 une participation dans la SAT, formait, avec ces deux sociétés, le groupe G3S, triangle équilatéral presque parfait quant aux participations financières mutuelles.

Concrétisant un esprit maison très fort, en 1978, le triangle est ouvert et 3SCadres, détenue par les cadres du groupe, vient se placer en amont de CSEE dans la chaîne des participations.

En 1985, un RES (rachat de l'entreprise par ses salariés) est réalisé et COFICEM, holding financier détenu par le personnel et dont 3SCadres est actionnaire, vient se substituer à CSEE dans l'actionnariat SAGEM. Le RES SAGEM est le plus important RES réalisé en France, ce sera un succès total.

En 1987, Robert Labarre, second président de SAGEM depuis sa création, prend sa retraite. Pierre Faure, directeur général, élu à l'Académie des Sciences en 1985, le remplace.

S'appuyant sur de fortes synergies entre l'électronique de Défense et les nouvelles technologies des télécommunications et de l'automobile, les activités de SAGEM se développent rapidement.

En 1993, afin d'utiliser ses compétences développées dans la Défense en matière de reconnaissance d'images, SAGEM rachète la société Morpho Systèmes, spécialiste et pionnier de la reconnaissance automatique d'empreintes digitales. SAGEM est aujourd'hui leader mondial de ce secteur qui se développe rapidement (cartes d'identité, passeports, contrôle d'accès).

En 1996, les activités optroniques de SAT sont intégrées dans la division Défense et Sécurité de SAGEM et, en 1998, la SAT est absorbée en totalité par SAGEM.

En 1999, après l'acquisition de SFIM et son intégration dans sa division Défense et Sécurité, SAGEM prend la première place en Europe pour les systèmes optroniques.

Dans le secteur Défense et Sécurité, la politique de recherche d'une présence forte et innovatrice sur des créneaux de haute technologie a permis, malgré un environnement général déprimé, à SAGEM une croissance soutenue et des positionnements de premier plan.

En 2001, SAGEM est le n° 1 européen des systèmes inertiels, des systèmes optroniques, des systèmes de drones tactiques et aussi n° 1 mondial des systèmes de reconnaissance automatique d'empreintes digitales, des commandes de vol d'hélicoptères, des optiques spatiales.

Le principal actionnaire de SAGEM (41 % du capital) est alors COFICEM, elle-même détenue, à hauteur de 64 %, par le personnel de SAGEM.

Daniel DUPUY

LA SFENA

La Société française d'équipements pour la navigation aérienne a été créée en 1947 à l'initiative des services officiels, particulièrement le Service technique aéronautique, autour d'un noyau de spécialistes formés par Robert Alkan.

ÉVOLUTION DU CAPITAL

Statutairement, la SFENA a pour objet "l'étude, l'adaptation, la mise au point et la construction d'appareils pour la navigation aérienne et de tous accessoires et équipements pour aéronefs et engins spéciaux".

Son capital de départ est réparti entre l'État (48 %), Sud-Aviation (31,6 %), Nord-Aviation (16,3 %), SNECMA (3 %) et la Société des avions Marcel Dassault (1 %). Ces pourcentages resteront inchangés jusqu'en 1967.

À cette date, et toujours à l'initiative des services officiels, une augmentation de capital par souscription réservée à la société DBA (Ducellier, Bendix, Air-Équipement) porte la participation de cette dernière à 45 %, les parts des autres actionnaires étant proportionnellement réduites : État 26,4 %, sociétés nationales et Dassault 28,6 %. Un apport en nature, un terrain du domaine privé de l'État en 1971 à Vélizy-Villacoublay va légèrement modifier ces pourcentages, mais sans incidence sur les orientations des actionnaires. En revanche, la volonté ministérielle exprimée par Michel Debré en 1971 de restructurer l'industrie des équipements va aboutir à la vente par DBA de ses parts à Crouzet, SFIM et SAGEM qui entrent pour 25 %, 10 % et 5 % respectivement au capital de la SFENA en 1973.

Le rapprochement entre Crouzet et SFENA s'accélère avec la création en 1977 de SV2, société en nom collectif filiale commune à 50-50, chargée de coordonner les études dans le domaine du gyrolaser et de l'armement terrestre.

La suite devait conduire à la prise de contrôle de SFENA par Crouzet. Toutefois, le feu vert ministériel n'est pas donné, une "dénationalisation" exigeant un vote du Parlement, dont l'accord n'était pas assuré.

La fin de mandat par limite d'âge du président Dupré, en avril 1980, va accélérer le processus grâce à une procédure conduisant à éviter un éventuel écueil parlementaire : une augmentation de capital de la SFENA est officiellement décidée par son conseil et approuvée par une assemblée générale extraordinaire en novembre 1980, de 22 MF à 51 MF ; l'État ne souscrit pas directement à l'augmentation de capital de SFENA, mais prendra une participation, directe ou indirecte, à hauteur de 34,2 % dans Crouzet. En final, Crouzet détient 85 % du capital de SFENA, juste avant les élections présidentielles de 1981.

Le président Pagnard, successeur de M. Dupré, va se trouver dans une situation inconfortable : le comité d'entreprise de la SFENA a déposé un recours pour inconstitutionnalité auprès du Conseil d'État ; consulté par lettre avant le scrutin, le candidat François Mitterrand s'est engagé auprès des représentants du personnel à faire revenir la société au sein du secteur public ; la Cour des Comptes a exprimé des réserves quant à la constitu-

tionnalité des opérations capitalistiques intervenues entre l'État et Crouzet ; aucun accord n'a pu être trouvé entre les dirigeants des sociétés sur une organisation et une structure communes.

Le président de l'Aérospatiale, Jacques Mitterrand, chargé de mission, va trancher en prenant la majorité d'une espèce de holding, la SIELA, elle-même majoritaire dans le capital de SFENA. Par la même opération, l'Aérospatiale renforce sa position dans le capital de Crouzet. Joseph Millara, directeur général adjoint de l'Aérospatiale, est nommé président. Ainsi, la SFENA, qui a vu siéger à son conseil pendant près de dix ans les présidents de ses principaux concurrents français, se trouve avec un actionnaire majoritaire qui est aussi son plus important client.

En 1988, l'Aérospatiale se rapproche de Thomson-CSF pour trouver un autre avenir à ses filiales et participations dans le secteur Équipements (SFENA, EAS et Crouzet). Il fut finalement décidé de constituer une société cotée en Bourse, utilisant la base juridique de Crouzet, et dont l'actionnaire majoritaire serait une holding, ATEV, détenue à 50/50 par Aérospatiale et Thomson-CSF, en ajoutant aux trois sociétés apportées par Aérospatiale la Division avionique générale de Thomson-CSF. Dénommée SEXTANT Avionique, cette nouvelle société fait disparaître la raison sociale SFENA en 1989.

LES ACTIVITÉS ET LES PRODUITS

La conduite automatique du vol

Dès avant la guerre, vers la fin des années trente, Robert Alkan avait développé un pilote automatique simple comprenant, pour chaque axe de pilotage roulis, tangage, cap, un ensemble monobloc constitué par un gyroscope électrique, un détecteur à air déprimé et un amplificateur-servomoteur à air comprimé. L'étude d'une version améliorée de ce pilote automatique a constitué la première commande du marché de régie attribué à la SFENA par le Service technique aéronautique, Section équipements. Le pilote automatique Alkan équipa les avions de transport de la fin des années quarante et du début des années cinquante, la version pour le Nord 2501 comprenant la stabilisation en altitude et en cap.

La stabilisation des mouvements rapides fut ensuite abordée à l'aide des technologies électriques, pour lesquelles l'apport des équipes d'ingénieurs des sociétés allemande, Askania, Patin, Siemens, recrutés dès 1945, fut très apprécié.

Les études en régie ont constitué pendant la première décennie la principale activité de la SFENA. Les sujets étaient définis par accord entre les bureaux d'étude et les services, avec un objectif commun de combler le retard résultant de la guerre. Les besoins nouveaux issus des programmes d'avions et d'engins, amortisseur de lacet pour le Vautour, autocommande de profondeur pour le Super Mystère B2, pilote automatique pour le Breguet Alizé et les missiles de Sud-Aviation, nécessitaient des travaux théoriques, la maîtrise de nouvelles technologies en électricité, magnétisme, composants électroniques, des moyens industriels à définir et implanter, et des ingénieurs et techniciens à recruter et à former.

La première commande de série fut celle de pilotes automatiques Alkan modernisés pour l'équipement des N 2501, suivie des contrats pour les avions d'armes déjà cités.

La nouvelle technologie électronique analogique, première révolution dans la conception des automatismes de pilotage, fut utilisée dans l'auto-commande du Mirage III et le pilote automatique du Mirage IV, dont les études et la série se sont étendues sur près de quinze ans, du milieu des années cinquante à la fin des années soixante-dix. Pendant la même période, la SFENA équipe les Mirages F1 d'un véritable pilote automatique, les hélicoptères Super Frelon d'un régulateur de vitesse rotor et Alouette III de servo-amortisseurs, en utilisant la même technologie.

Le programme Concorde va donner une nouvelle impulsion technologique avec l'emploi de circuits intégrés analogiques tels les amplis LM101, d'une architecture de calculateur originale utilisant un connecteur central de Bendix et initiera la SFENA aux problèmes de la coopération internationale. En effet, Aérospatiale avait exigé que le tandem franco-britannique SFENA-Elliott soit techniquement supervisé par "le maître américain Bendix". Il faut mentionner que le premier vol de Concorde, le 2 mars 1969, a utilisé les calculateurs de stabilisation artificielle sur les trois axes.

C'était la première fois qu'un premier vol était effectué avec une aide électronique sur les commandes de vol.

L'année 1969 marque une étape importante : SFENA est retenue comme maître d'œuvre des systèmes de conduite automatique du vol de l'Airbus A 300, en collaboration avec Smiths Industries en Grande-Bretagne et Bodensee Geräte Technik en Allemagne, et amorce le virage technologique majeur des cinquante dernières années en expérimentant un calculateur numérique de pilotage.

La position de la SFENA s'est maintenue dans le domaine de la conduite automatique du vol sur tous les programmes d'avions militaires et civils de la fin du siècle : versions du Mirage 2000, famille des Airbus 310, 320, 330 et 340 grâce à une bonne maîtrise de l'utilisation de calculateurs numériques temps réel faisant appel, pour la première fois, à des microprocesseurs Intel et à la création d'ateliers logiciels aux normes de haute sécurité exigées par les applications avions.

Les annexes A2, "Commandes de vol", et A3, "Pilotes automatiques" développent les réalisations de la SFENA.

Les instruments

Les horizons artificiels construits en France après la guerre étaient encore à dépression, alors que Sperry produisait déjà un modèle à gyroscope entraîné électriquement. Prolongeant un brevet Alkan, la SFENA va en quelques années mettre au point un modèle révolutionnaire, utilisant un érecteur entraîné mécaniquement par le rotor, ce qui permet une figuration correcte de l'horizon pendant plus de cinq minutes après coupure de l'alimentation électrique. Cette disposition unique et bien brevetée, fondamentale pour un instrument de secours, a conduit la société à devenir le leader mondial de l'horizon de secours, dont les modèles de 2, 3 et 4 pouces ont été fabriqués sous licence aux États-Unis, en Allemagne, en Inde, pour ne citer que les pays les plus importants. Ils ont été montés sur tous les chasseurs américains, et le Boeing Air Force One du président des États-Unis en est équipé.

Les études ont également porté sur la figuration des instruments répéteurs de pilotage et de navigation intégrant plusieurs informations dans un même cadran. Par exemple, le Mirage IV utilise “une boule” donnant à la fois l’horizon et le cap, Concorde vole encore avec des ADI (Attitude Director Indicator) et des HSI (Horizontal Situation Indicator) conçus et fabriqués par la SFENA. Les premiers Airbus ont utilisé des instruments similaires avant l’apparition des écrans cathodiques.

Les capteurs et les centrales à inertie

Accéléromètres et gyromètres mesurent des grandeurs nécessaires aux fonctions de stabilisation et de pilotage. La SFENA a étudié et produit ces équipements, non seulement pour leur intégration dans les ensembles de conduite du vol, mais comme composants isolés.

En particulier, la SFENA a étudié et fabriqué les gyros de verticale et axiaux qui ont équipé les engins MM38, AM39, Kormoran et Pluton.

Sa réalisation la plus originale et importante a été le développement de centrales inertielles à gyrolasers (voir Annexe A 5)

Les systèmes de test automatique

Le très haut niveau de fiabilité et de sécurité exigé par les moyens de conduite automatique du vol ont amené la société à développer des méthodes et des architectures permettant de tester, en fonctionnement opérationnel, le bon état ou les défaillances des calculateurs aéroportés. Depuis Concorde, le système de conduite automatique du vol (CADV) comprend un calculateur de test informant l’équipage et le système, de l’état d’intégrité des calculateurs en fonctionnement, afin de faire jouer les capacités de reconfiguration liées aux redondances.

Fort de cette expérience ancienne, la société a créé, dans les années soixante-dix, une division spécialisée qui a développé des moyens de test automatique à vocation générale pour le contrôle en production et surtout en exploitation de l’électronique en général.

Ainsi est née une famille de produits dénommée SESAME, dont le plus gros client fut l’armée de Terre pour la maintenance en ligne du système de communication radio RITA, du premier au troisième degré, cartes comprises.

Le soutien logistique aux clients

Pendant la période où l’activité principale comprenait des études soumises au verdict des essais en vol, la société s’est attachée à former ingénieurs et expérimentateurs à l’École du personnel navigant d’essais et réception, qui accompagnaient les expérimentations à Brétigny. Ce soutien s’est maintenu, tout en évoluant vers la localisation d’équipes SFENA auprès des constructeurs au moment de la série.

L’arrivée des programmes civils a entraîné de nouvelles formes de soutien compte tenu d’exigences particulières des clients compagnies aériennes : instruction du personnel, permanence de mise à disposition de rechanges 24 heures sur 24, 7 jours sur 7 et 365 jours par an.

La SFENA proposa, dès la fin des années soixante, la constitution d’un GIE entre les sociétés d’équipements impliquées dans l’aviation civile, le SAVE. Implantées à Orly, ces activités d’après vente ont fédéré jusqu’à 15 sociétés. Les regroupements ultérieurs n’ont fait que pérenniser ce type de structure.

Les mesureurs acoustiques d’écart, les télécommandes et les télémesures

Les mesureurs acoustiques d'écart (MAE) permettent de donner instantanément le score d'un tir au canon réel sur cible tractée, le MAE SFENA a été construit à des milliers d'exemplaires et utilisé dans plusieurs pays, dont les États-Unis.

Le Département Radio de la SFENA a participé aux études de télémessures de programmes d'engins spatiaux et a développé et fabriqué en série les télécommandes de l'engin-cible CT 20 et celles du Malafon.

LES MOYENS INDUSTRIELS

La SFENA a été installée, au départ, dans les anciennes écuries des pompiers de Neuilly, rue du Pont. Le développement de ses activités a conduit à la création en région parisienne de deux annexes de production à Puteaux et à Colombes, en 1961. En 1963, la conjonction de besoins accrus de fabrication mécanique avec le plan de fermeture de plusieurs Arsenaux de la DEFA se traduisit par l'apport de l'Établissement de la Brelandiaire, à Châtellerault, assorti d'un plan de réemploi du personnel de l'ancienne Manufacture d'État. Enfin, pour remédier à la dispersion des moyens d'étude de la région parisienne, une grande partie de la production étant concentrée à Châtellerault, un nouveau site industriel a été construit en 1970-1971 sur un terrain cédé par l'État en bordure du terrain de Villacoublay. Les activités d'après vente s'installaient sur l'aérodrome d'Orly à la même époque.

LES PRINCIPAUX ACTEURS

Présidents : 1947-1965 Fernand Hederer

1965-1980 Pierre Dupré

1980-1982 Jacques Pagnard

1982-1983 Joseph Millara

1983-1989 Alain Guigue

Directeurs :

– directeurs général-adjoint puis directeur général :

1965-1982 puis 1982-1986 Michel Hucher

1982-1989 Jean Monfort

– Études et recherches :

Bernard Hamel

Jacques Pagnard

Pierre-André Chombard

George Bonfils

– Commerce :

Roger Larrieu

– Après-vente :

Pierre Gravelle

Lauréats du Prix Alkan :

1982

G. Bonfils

1964

J. Charlier de Chilly

1981

B. de Salaberry

Michel HUCHER

LA SFIM

La SFIM est née en 1947 de l'urgence de la réalisation d'instruments de mesure pour les essais en vol.

L'ingénieur en chef Hussenot, en activité au Centre d'essais en vol depuis 1935, était de ceux qui voulaient que la renaissance de l'aviation française après 1945 soit basée sur une politique de haute qualité assise sur des résultats sûrs, matériellement vérifiables. Ceci entraînait que les mesures en vol soient enregistrées.

À la suite de l'utilisation, avant 1939, des enregistreurs sur bande de papier photographique, soit d'altitude, soit de vitesse, réalisés par l'ingénieur en chef Gunther, il fit construire par les Ateliers de construction de Bagneux, dès le début de 1940, un premier prototype Hussenot-Beaudouin (HB), qui enregistrait jusqu'à une douzaine de mesures distinctes. Ce prototype fut suivi d'une série après la libération. En 1967, le CEV possédait plus de 500 HB, dont un bon nombre étaient prêtés à des constructeurs pour assurer le développement des essais.

C'est avec la certitude tirée de ce succès que l'ingénieur en chef Hussenot et les ingénieurs du CEV poussèrent à la création de nouveaux moyens industriels pour disposer des capteurs adaptés, car les Ateliers de construction de Bagneux, ou d'autres, n'avaient pas les moyens de se développer pour ces fournitures.

Aux États-Unis étaient utilisés des enregistreurs de bord, appelés CEC, qui ne possédaient cependant que des oscillateurs électriques, à alimenter par des détecteurs, alors que les enregistreurs français possédaient en interne leurs détecteurs, plus précis à l'époque.

Ainsi la SFIM (Société de fabrication d'instruments de mesure) fut fondée en mai 1947 par M. Ramolfo-Garnier, sur des ressources diverses, dont des participations d'ingénieurs du CEV sur leurs propres deniers. Elle s'installa dans un petit bâtiment, au Sud de la gare de Massy-Palaiseau, pour se spécialiser dans ces réalisations. L'effectif atteignit 71 personnes fin 1947 et 140 personnes fin 1948.

La SFIM développa son activité dans les divers instruments d'enregistrement pour les essais en vol, et créa des enregistreurs plus petits, adaptés aux diverses applications, allant de l'analyse de phénomènes très rapides à des surveillances longues, dont l'emploi s'est généralisé.

Elle sut diversifier les appareils et veilla à la disponibilité des divers capteurs nécessaires pour permettre les mesures en vol, ou surveillances, voulues. Elle s'est maintenue tête de file de ce domaine, qui a toujours représenté plus de 15 % de son activité.

Dès ses premières années d'existence, la SFIM fit d'importantes ventes à l'étranger, en particulier aux services officiels britanniques, ainsi qu'aux Belges et aux Canadiens.

En suivant l'expression des besoins, elle prit aussi une place majeure dans la télémesure, pour les matériels sur avions et les stations de réception au sol.

La SFIM s'installa vers 1950 dans un bâtiment qu'elle fit construire, toujours près de la gare de Massy-Palaiseau. Tout ceci se fit dans une excellente entente : l'avenue qui borde cette implantation et débouche sur la gare de la RATP s'appelle maintenant Avenue Ramolfo-Garnier.

En 1952, M. Ramolfo-Garnier fut remplacé par M. Féat, ingénieur équipement à Air-France. Connaissant bien le domaine aéronautique, il fut ainsi conduit, pour développer l'entreprise, à assurer la fabrication d'instruments de vol. Il acquit les bâtiments qui sont en face de ce qui fut la première implantation. L'effectif atteint 820, fin 1957.

En 1962, M. Larpent succède à M. Féat. Il est assisté, de 1964 à 1986, par l'ICA Vandenberghe, venant du CEV, où il avait tenu un rôle essentiel dans le développement des aides au pilotage.

En 1992 M. P. Poquin succède à M. Larpent.

Le développement de la SFIM est marqué par des stades successifs que l'on peut citer :

- la fabrication de l'horizon de bord Sperry HL 5, qui équipait tous les chasseurs français de l'époque ;
- la fabrication en série et la maîtrise d'œuvre industrielle du compas gyro-magnétique Bézu et du régulateur d'oxygène Eyquem 116 ;
- la maîtrise d'œuvre, en 1961, sous licence, des pilotes automatiques Sperry choisis par la DTI pour les Atlantic et Transall ;
- depuis 1961, la conception et la réalisation de pilotes automatiques, orientés principalement vers les hélicoptères. La première série fut, en 1967, pour le Super Frelon.

La SFIM équipa ainsi successivement tous les hélicoptères d'Aérospatiale au cours des années soixante-dix/quatre-vingt/quatre-vingt-dix.

Fidèle à sa vocation première (essais et mesures), elle développa, dès 1965, les techniques numériques appliquées aux systèmes d'installation d'essais en vol, capables d'enregistrer et de traiter plusieurs centaines de paramètres (Airbus A 320).

La SFIM fabriqua en série, dans des ateliers super propres réalisés à cet effet, les centrales gyroscopiques toutes positions d'origine Bézu (les boules Bézu) qui équiperont les Mirage III C.

Elle développa ensuite, avec l'aide de la DTCA, de nouvelles centrales gyroscopiques de grande précision (les centrales de cap et de verticale 250) qui équipèrent les avions Jaguar et différents types de Mirage III, notamment pour l'exportation.

La SFIM racheta la société SERE-Bézu qui, après les centrales gyroscopiques pour avions, se convertit dans l'étude, avec l'aide de la DTAT, de viseurs gyro-stabilisés pour chars. Ces viseurs furent ensuite fabriqués en série dans les ateliers de la SFIM. Celle-ci reprit également la division Orientation-Viseurs de la Compagnie des compteurs et fabriqua les compas gyroscopiques de cette société.

À partir de 1980, la SFIM étudia et réalisa des viseurs gyro-stabilisés jour, puis jour-nuit, pour hélicoptères. Ces viseurs équipent les hélicoptères fabriqués par Aérospatiale. Cette activité viseurs pour les chars Leclerc et pour les hélicoptères, pour les besoins français et pour l'exportation, constitua rapidement à partir de 1980, une part importante du chiffre d'affaires de la SFIM. Ses effectifs sont alors de 1 600 personnes (plus de 2 000, avec ses filiales).

En 2000, la SFIM est devenue division de SAGEM, division dirigée par M. P. Bloch.

Léon VANDENBERGHE
Ancien directeur technique de la SFIM

LA SODERN

La SODERN (Société anonyme d'études et réalisations nucléaires) a été créée, à l'initiative du ministère de la Défense et du Commissariat à l'énergie atomique, pour développer et produire les sources neutroniques des charges nucléaires de la Force nucléaire stratégique (FNS).

En 1962, le CEA et le LEP (Laboratoires d'électronique et de physique appliquée du groupe Philips) apportent leur savoir faire à la société nouvellement créée comme filiale du groupe Philips.

Au-delà des réalisations nécessaires à la FNS que la SODERN assure avec succès, la société entreprend en 1968, à la demande du CNES, une diversification dans le spatial et ses capteurs infrarouges pour satellites de télécommunications et d'observation représentent en 1979, 30 % de son chiffre d'affaires.

À partir de 1980, la SODERN aborde le domaine de la visée stellaire pour satellites, missiles et périscopes de sous-marins de la Marine nationale et réalise, avec succès, des capteurs pour la DGA/DCN, la NASA et l'ASE (Agence spatiale européenne).

Pour les satellites d'observation SPOT et HELIOS, SODERN réalise les boîtiers de détection à haute résolution dans le visible et l'infrarouge.

Enfin, vers 1985, la SODERN entreprend, à partir de son expérience en neutronique, une nouvelle diversification dans les sources de neutrons à usage civil, pour le contrôle non destructif des peintures, collages, matériaux composites ainsi que la détection des déchets radioactifs et la localisation des explosifs (contrôles dans les aéroports).

La SODERN est une société de développement pour la mise au point de produits industriels dont le caractère commun est le haut degré de technicité et de fiabilité. Son effectif comporte 40 % d'ingénieurs et 30 % de techniciens. Maître d'œuvre de ses produits, SODERN sous-traite, dans la plupart des cas, la production à des PME partenaires, se réservant la conception, l'industrialisation et la construction de la qualité.

En 1987, SODERN réalisait un chiffre d'affaires de 200 MF avec un effectif de 340 personnes. Depuis octobre 1997 elle a quitté le groupe Philips pour le secteur Espace et Défense du groupe Aérospatiale (maintenant EADS). Son effectif, en 2000, était sensiblement le même en nombre et en structure.

SODERN est certifiée ISO 9001 pour la conception, le développement et la réalisation de ses différents produits.

Daniel PICHOU

*Un témoignage personnel sur l'évolution des équipements et des systèmes des avions de combat,
au cours des cinquante dernières années.*

Jacques VEDEL

ÉLECTRONIQUE ET INFORMATIQUE, leur apport à l'équipement des avions de combat français et à leurs conditions d'emploi depuis cinquante ans.

J'ai rédigé ce texte en tant que témoin du passé, 1953-2003. Mon souhait est de produire un témoignage personnel sur l'évolution des équipements et systèmes électroniques des avions de combat de l'armée de l'Air au cours de ces cinquante ans, en faisant appel à ma seule mémoire. Je n'ai aucune prétention à faire œuvre d'historien, ceux-ci exploitent de nombreux témoignages et plongent dans les archives, je ne l'ai pas fait et ne prétends pas à l'exhaustivité.

À titre d'avertissement, et je m'en excuse à l'avance auprès de nos amis de l'aéronautique navale et de l'Aviation légère de l'armée de Terre, j'ai donc volontairement limité mon exposé aux matériels qui ont été mis en service dans l'armée de l'Air, et, de surcroît, sur aéronefs développés en France, à l'exclusion des avions achetés à l'étranger. J'ai jugé l'exercice assez compliqué dans ces conditions et n'ai évoqué d'autres aéronefs que lorsque c'était nécessaire pour illustrer les progrès de nos équipements électroniques et informatiques. J'ai également fait presque totalement abstraction des conditions d'environnement financières, politiques, opérationnelles... et de leur évolution qui mériteraient de longs développements d'une autre portée. Centré sur le "temps réel" des utilisateurs, mon exposé n'aborde pas non plus l'apport si important de l'informatique et de l'informatique à la conception des avions, à leur fabrication et à leur maintenance.

En 1953, j'avais dix huit ans, je rêvais depuis toujours d'être pilote et j'étais en Math Sup au lycée de Toulouse, ville hautement aéronautique. Cet été-là, en prélude sans doute au Salon parisien du cinquantenaire, il y a eu un "petit" Salon à Toulouse et nous pouvions entendre et voir, par les fenêtres de la classe, les patrouilles de Vampires qui faisaient grand bruit au-dessus de la ville. J'ai eu l'occasion de voir en exposition au sol une cabine de Vampire, avec toutes ses manettes et cadrans, j'ai trouvé que c'était petit et compliqué. Cinq ans plus tard, en 1958, j'ai été breveté pilote sur Vampire. Je l'ai trouvé petit mais pas si compliqué. Avec le recul du temps on peut dire cependant que, du point de vue ergonomique, l'aménagement de sa cabine prêtait parfois à confusion...

À cette époque entraient en service dans l'armée de l'Air les Super Mystère B2 et bientôt les Vautours.

Ces avions possédaient la plupart des fonctions essentielles indispensables pour remplir une mission opérationnelle : conduite du vol, pilotage et navigation, communication, conduite de tir.

Mais chaque fonction, chaque sous-fonction, la localisation par exemple, dépendait de un ou plusieurs instruments totalement indépendants (carte, radio compas, cap, montre... pour la localisation) et la synthèse des informations devait être effectuée par le pilote (ou plus généralement l'équipage) dont le rôle dans la performance était essentiel. Chaque

équipement avait son capteur, son traitement de mise en forme des données, son câblage et son cadran sur le tableau de bord.

L'environnement pris en compte pour l'établissement de la mission (météo, défenses, contre-mesures...) était certes plus simple que celui que l'on considère aujourd'hui, mais quelques efforts d'intégration réalisés à cette époque reculée, avec les moyens analogiques dont on disposait alors, ont été particulièrement appréciés :

- l'implantation de l'aiguille du VOR ou du radio compas sur une rose des caps – tournante pour faire apparaître le cap en haut – permettait d'appréhender immédiatement le gisement de la balise par rapport à la trajectoire, au lieu de son relèvement par rapport au Nord, information primaire de cet équipement ;
- la "boule", apparue avec le Mirage III, combinait astucieusement les informations d'attitude, assiette latérale et longitudinale, les informations de cap et les informations de guidage, ILS par exemple pour les avions qui en disposaient.

Ces dispositifs et autres synthétiseurs facilitaient la tâche du pilote en lui évitant des calculs intermédiaires, pouvant être causes d'erreurs, et mettaient à l'ordre du jour les préoccupations ergonomiques.

Longtemps, il a été de bon ton chez les "moustachus" de ne faire confiance qu'aux informations primaires des capteurs en amont des calculs de synthèse, "les seules fiables"... Où irait on chercher les informations primaires dans un cockpit de Rafale ? La fiabilité des systèmes est un des grands progrès de ces cinquante dernières années, elle peut même provoquer des excès de confiance.

Du point de vue technique, on était à l'analogique dans toute l'acception du terme : du pneumatique, des cames, des gyroscopes et gyromètres mécaniques. La mémoire, élément si important pour la conduite de la mission avec ses éléments de préparation de mission, de renseignement... était constituée par la mémoire du pilote assisté par ses cartes, check lists et son roule-notes.

L'électronique était pratiquement limitée aux moyens de radio, de communication, de localisation et de détection. Les transmissions électriques par selsyn permettaient de loger les capteurs gyrométriques ou magnétiques aux endroits les plus appropriés et de ramener les données au niveau de l'utilisation, calculateurs ou cadrans.

Ces améliorations progressives se sont poursuivies jusqu'aux années soixante-dix, avec également le développement de nouveaux capteurs, notamment les radars de bord, l'intégration des missiles... Je reviendrai là-dessus plus tard.

La grande rupture a été, au début des années soixante-dix, l'apparition du numérique dont les conséquences ont été très vite perceptibles sur l'agencement des avions et des systèmes d'armes proprement dits, mais aussi sur leurs relations avec l'environnement, intégration interne et externe de l'avion de combat, et également sur le tissu industriel.

En effet, au fil des ans, à mesure que de nouvelles technologies émergeaient dans notre monde aéronautique, un nombre relativement important de sociétés se créaient pour développer et fournir les divers équipements indépendants dont étaient dotés les avions : viseurs, centrales de cap et de verticale, gyromètres, anémométrie, visualisations...

Le numérique a très vite montré l'intérêt de calculateurs puissants et centralisés pour traiter et fusionner les données des différents capteurs, au détriment de calculateurs implantés au niveau des équipements et dédiés à une seule application. Cette réduction de la fourniture des équipementiers, aggravée par l'augmentation de la productivité, a conduit

progressivement à un regroupement de l'industrie des équipements et à une limitation pas totale mais néanmoins importante des dualités que nous avons dû gérer jusqu'aux années 1985-1990.

Je reviendrai sur l'évolution dans le temps de quelques-uns des composants essentiels du système d'armes, commandes de vol, radars et conduites de tir, visualisations, liaisons...

Je voudrais d'abord évoquer le phénomène d'intégration des données et de traitement des informations qui, à mon sens, fait la grosse différence cinquante ans après.

L'intégration des données à bord en temps réel et leur présentation plus synthétique avec un grand souci d'ergonomie ont préservé la charge de travail de l'équipage et lui ont permis de maîtriser une mission de plus en plus complexe dans un environnement également plus exigeant. Cet environnement, ami et ennemi, est, lui aussi, présenté au pilote sous une forme directement compréhensible et mis à jour en temps réel grâce à des liaisons spécialisées avec les centres de contrôle et de commandement. La coopération entre les différentes composantes d'une force ou entre les avions d'un groupe qui ne reposait guère autrefois que sur des procédures assez rigides et quelques liaisons radiophoniques est devenue beaucoup plus souple, rationnelle et efficace.

À ce stade, il me paraît important d'évoquer le rôle important joué par la simulation d'étude dans la mise au point de ces processus d'intégration, de présentation des données et d'exploitation par l'utilisateur. Nous le verrons sur quelques exemples, l'utilisateur a une culture et des habitudes qui peuvent provoquer chez lui des réactions de rejet des novations mal comprises, surtout si elles lui sont présentées dans de mauvaises conditions techniques. Les simulations sur des plates-formes très réalistes permettent la mise au point rapide des modes et commandes des différents systèmes et de leurs visualisations grâce à une programmation très souple. Cette mise au point, réalisée en faisant participer un large échantillonnage de pilotes, a le mérite d'optimiser le système en tenant compte des capacités des utilisateurs qui doivent adhérer à des procédures en opération quelques années plus tard.

Je voudrais maintenant décrire sommairement les étapes qui, en France, ont conduit lentement à la réalisation des avions, systèmes d'armes d'aujourd'hui. Les travaux effectués de façon continue ont généré des applications concrètes pour chaque nouvelle génération de systèmes d'armes, c'est-à-dire à peu près tous les dix ans pour la période considérée. Cette durée était beaucoup plus courte avant 1960, elle tend à s'allonger considérablement depuis quelques années.

Commandes de vol

Les commandes de vol électriques – ou plus exactement électroniques – que l'on trouve aujourd'hui sur les avions modernes permettent au pilote d'imposer à ces avions des évolutions précises et des consignes à moyen ou long terme en matière de paramètres de vol : facteurs de charge, assiette, route ou cap... Sur les avions antérieurs, le pilote agissait sur le braquage des gouvernes, directement ou par l'intermédiaire de servocommandes de puissance, et la fonction de transfert de l'avion au point de vol considéré déterminait les évolutions. L'art du pilote, assisté souvent de dispositifs de restitution d'efforts ou de limitation d'action, consistait à apprécier ces évolutions par lecture des indicateurs de bord ou par appréciation de ses propres réactions physiologiques et à faire les corrections nécessaires.

Les commandes de vol électriques simplifient la tâche du pilote qui peut se consacrer pleinement à l'exécution de la mission proprement dite. La bande passante des commandes

de vol électriques à des fréquences plus élevées que celles accessibles au pilote humain permet également de créer une “stabilité artificielle”.

Dès le SM B2 et le Vautour sont apparus les amortisseurs de lacet. C'étaient des dispositifs automatiques de faible autorité : une petite gouverne incluse dans la gouverne de lacet commandée par un détecteur gyrométrique et un amplificateur. Cet équipement détectait les oscillations à haute fréquence (trop hautes pour la “bande passante” du pilote) et les contraignait. Il était sans effet sur les évolutions commandées par le pilote qu'il se contentait de filtrer.

Le Mirage III, mis en service en 1963, avait des amortisseurs sur les trois axes et une “auto-commande”, servocommande à gain variable en fonction des conditions de vol destinée à faciliter le pilotage dans tout le domaine, en particulier dans le transsonique.

Le Mirage IV et le Mirage F1 ont été les premiers avions de combat français à être dotés de pilotes automatiques stabilisant le vol à moyen/long terme.

Les premiers essais de commandes de vol électriques à pleine autorité, c'est-à-dire capables de déplacer les gouvernes primaires dans tout leur domaine de braquage et à des fréquences inaccessibles au pilote ont été effectués dans les années 1972-1973 sur un Mirage III biplace dont le deuxième pilote était toujours prêt à reprendre le pilotage par une timonerie classique. Développé initialement comme un simulateur volant, capable d'imiter les réactions au pilotage d'autres avions, il a été aussi utilisé pour montrer à de nombreux responsables les capacités de cette technologie et éclairer leurs décisions.

Le Mirage 2000, lancé en 1975, mis en service en 1983, a été conçu avec des commandes de vol électriques. Elles ont, à ma connaissance, toujours donné satisfaction.

Les commandes de vol électriques du Mirage III B étaient analogiques, celles du Mirage 2000 également, mais avec un calcul numérique des gains, variables en fonction du point de vol. Celles du Rafale, entré récemment en service, sont entièrement numériques, la particularité de cet avion par rapport aux précédents est que les commandes agissent sur une plus grande diversité de gouvernes, bords d'attaque, canards, en plus des gouvernes classiques (en attendant les tuyères orientables et autres gouvernes latérales des prochaines générations) pour optimiser le pilotage et la configuration de l'avion à chaque instant. On est très loin de l'action directe du pilote sur les surfaces de contrôle.

Navigation

Dans la droite ligne de la navigation à l'estime (le cap et la montre) recalée sur des données externes, points de repères physiques ou balises radioélectriques, le système de navigation mis en service sur Mirage IV, Mirage III E, plus tard sur Jaguar dans les années 1963 à 1973, était fondé sur l'intégration, dans le temps, de la vitesse sol mesurée par un radar doppler assisté par une centrale de cap et de verticale. À cette époque, des centrales à inertie équipaient déjà des avions étrangers, c'était notamment le cas des F 104 allemands entrés en service au début des années soixante.

Le Mirage III E naviguait à basse altitude sur un itinéraire prédéterminé et parcourait des segments horizontaux dégagés du relief, avec l'aide des informations de son radar de détection du sol ; pour se recalculer, le pilote comparait la carte du sol fournie par le radar sur le scope et une carte prévisionnelle préparée à l'avance.

On ne peut séparer la navigation proprement dite de l'attaque au sol, bombardement par exemple, qui en est le prolongement naturel. Déjà sur le F 100, fourni par les États-Unis avant 1960, existait un calculateur de portée de bombe basé sur des minuteriers et surtout des évolutions et une vitesse de consigne très précises. Sur Mirage III E et sur Jaguar, malgré le remplacement des minuteriers par des calculs basés sur les données de navigation doppler, la précision en bombardement classique était insuffisante, à cause notamment de la mauvaise qualité de l'information de verticale.

L'adoption des centrales inertielles à partir des années soixante-dix sur les Super-Étendard de l'aéronautique navale puis sur les différents Mirage 2000 a comblé cette lacune. Une centrale inertielle, bien alignée en direction et bien recalée en position, donne un point précis, une vitesse précise, un cap et une verticale précis. L'inertie permet des évolutions très bien maîtrisées de certaines phases de vol, je citerai par exemple l'approche ILS où la centrale se recalcule avec précision sur les informations de la station sol ; elle permet aussi l'orientation d'un désignateur laser, par exemple vers un objectif prédéterminé.

Les centrales à inertie à plate-forme mécanique ont été remplacées à partir des années quatre-vingt-dix par des centrales gyrolaser à composants liés (à la structure de l'aéronef) dont les premières études ont commencé en France avant 1980 et dans lesquelles un calcul plus complexe rétablit en quelque sorte la position d'une plate-forme virtuelle avec le bénéfice d'une fiabilité bien plus grande du fait de la disparition des éléments mécaniques. On les trouve donc sur le Rafale, sur des avions plus anciens modernisés, ainsi que sur les hélicoptères.

Naturellement, depuis les années quatre-vingt, le GPS est apparu dans nos systèmes de navigation. Équipement de base de l'ATL 2 (Atlantique) de l'aéronautique navale, il a été rajouté sur certains avions en service sans trop de soucis d'intégration. Il est un complément à l'Inertie dans beaucoup de systèmes actuels.

Air-air : radars et missiles

Il y a cinquante ans, l'avion de combat ne disposait guère que de mitrailleuses ou de canons de petit calibre (12,7 à 30 mm) pour attaquer d'autres avions ; avec la roquette, auto-propulsée mais non guidée, on se heurtait à une dispersion importante des trajectoires et à un problème de conduite de tir. Des missiles autoguidés à détection infrarouge étaient déjà en service sur les avions américains, les missiles à guidage radar se préparaient partout. Le premier radar aéroporté mis en service en France, après ceux des *Gloster Météor* et des F 86, a été celui du Vautour II N.

Le radar air-air permettait, après une désignation d'objectif externe, le plus souvent par une station radar sol qui assurait la première partie du guidage par liaison radio, d'acquiescer l'hostile et d'assurer la deuxième phase de guidage pour mettre l'avion en position de tir, dans le domaine d'action des canons ou des missiles. Dans le cas du tir canon, une troisième phase de visée précise sur but futur faisait appel au calculateur du viseur.

Radars et missiles air-air à guidage électromagnétique, très interdépendants, se sont développés et perfectionnés quasiment en parallèle : Thomson Cyrano I bis et MATRA R 530 sur le Mirage III C en 1963, Cyrano IV et Super 530 sur Mirage F1 en 1973, RDM puis RDI et Super 530 D sur Mirage 2000 en 1983 et 1986, RDY sur Mirage 2000-5 et enfin RBE 2 sur Rafale.

Ces deux derniers radars sont associés aux missiles MICA, plus autonomes que leurs prédécesseurs et moins dépendants des radars de bord avec lesquels ils constituent des systèmes multi-cibles.

À chaque étape, des progrès importants ont été accomplis en portée, et surtout en capacité de détection et de discrimination dans un environnement complexe, voire pollué par des actions de guerre électronique.

Les grands progrès technologiques ont été liés à l'utilisation de l'effet doppler, d'abord sur les radars classiques BFR (basse fréquence de récurrence) pour effacer les échos fixes, puis en traitement primaire sur les radars à haute fréquence de récurrence (RDI) et haute et moyenne fréquence de récurrence (RDY et RBE 2), ce qui permet la détection directe des objets mobiles, voire leur identification.

Un autre progrès considérable est venu de la numérisation appliquée au traitement du signal et au traitement des informations à partir du RDM et du RDI qui leur donne, en particulier, la capacité de poursuivre plusieurs cibles simultanément.

Enfin, une autre rupture technologique, aux conséquences importantes sur les performances des radars aéroportés, a été l'introduction du balayage électronique deux plans qui permet au faisceau radar d'explorer rapidement tout l'espace devant l'avion. La technologie Radant du RBE 2 du Rafale, qui a fait l'objet de longues études depuis le début des années soixante-dix, présente un bon niveau de performance en attendant les modules actifs émetteurs récepteurs de la prochaine génération.

Ainsi est-on passé progressivement du duel "un contre un", avec le canon ou les premiers missiles de combat, au combat "un contre plusieurs", avec les radars multi-cibles et les autodirecteurs autonomes et même au combat "N contre P", moyennant une organisation interactive au sein de la patrouille de N avions.

Je reviendrai sur la façon dont ces novations se sont intégrées dans le système tactique, lui aussi, parallèlement en constante évolution.

Ces progrès, ces innovations n'ont abouti qu'après un travail patient d'équipes compétentes, motivées et assidues. Avoir l'idée et réaliser un prototype de démonstration ne suffit pas, il faut aboutir à un produit industrialisé qui supporte les contraintes opérationnelles, fiable et capable d'être mis en œuvre dans les unités pendant de longues années. Conforme aux spécifications actuelles des utilisateurs, il doit être accepté sans réticence. Chaque développement technique a fait intervenir les équipes des constructeurs bien entendu, mais aussi les équipes des centres techniques étatiques, le Centre d'essais en vol (CEV) notamment, garants de l'objectivité des essais et des jugements. En cours de développement, on a dû également faire appel à la critique constructive de spécialistes opérationnels pour préciser certaines spécifications, orienter les développements, voire modifier les projets.

Cette remarque est naturellement valable non seulement pour les radars mais pour tous les matériels que nous avons dû installer sur nos avions. Il y a peu de génération spontanée et il est rare que le "il n'y a pas de problème" énoncé a priori se vérifie ; même des matériels importés et censés fonctionner parfaitement sur d'autres aéronefs nous ont coûté de longs délais de mise au point dans un milieu technico-opérationnel adéquat. Nous ne sommes pourtant pas exagérément difficiles en France et les exigences de nos clients étrangers valent bien les nôtres.

Dans ce domaine où l'action, en temps réel, ne souffre pas de bugs, les potentialités intrinsèques d'un équipement ne suffisent pas, son adaptation à un environnement complexe et exigeant, tant du point de vue technique que du point de vue ergonomique,

nécessite une maturation patiente dans un milieu approprié. Ceci à la différence, sans doute, des produits grand public dits des “nouvelles technologies” au fonctionnement parfois erratique, mais pas dangereux, qui s’adressent à une clientèle dispersée et ont une durée de vie plus limitée.

Entre les études amont qui font naître les idées, les études et développements exploratoires qui permettent de les évaluer, en coût et en intérêt pratique et opérationnel, les développements appliqués qui réalisent les équipements et les intègrent dans un système aux fins d’utilisation opérationnelle, il ne doit pas y avoir d’arrêt des travaux ; à la rigueur, des ralentissements sont gérables, moyennant une veille minimale. La préservation des acquis et le transfert des compétences sont des points essentiels de préoccupation, ils nécessitent un effort continu de la part de spécialistes avertis.

Air-sol

Les objectifs au sol étant plus difficilement discernables que les objectifs aériens, dans un environnement généralement moins contrasté, on a dû plus longtemps attendre des moyens efficaces d’acquisition et de guidage radio-électriques et se contenter de précisions relativement faibles, incompatibles avec des attaques de précision.

Je vais évoquer brièvement la mise en service des radars air-sol en France (ils jouent également un rôle de capteur de navigation), puis l’armement guidé laser.

Le premier radar air-sol opérationnel dans l’armée de l’Air a été le Cyrano II installé sur Mirage III E vers les années 1966 ; il permettait surtout le recalage de navigation par une visualisation du relief. Après le Cyrano IV bis du Mirage FI CR, nettement amélioré, les radars Antilope V des Mirage 2000 N et D, bénéficiant d’un traitement doppler numérique, offrent une visualisation du sol précise. Couplés aux centrales à inertie, à une radio-sonde (et à une base de données cartographique), ils constituent un véritable système de navigation autonome, capable d’un suivi de terrain automatique à basse altitude hautement performant.

Le radar RBE 2 du Rafale, grâce à son balayage électronique, agile en site et en gisement est polyvalent et assure simultanément les fonctions d’un radar air-air et d’un radar air-sol.

Dans le domaine des radars air-sol, il convient aussi de citer le radar à antenne latérale du Mirage F1 CR, utilisé pour la reconnaissance et fournissant une cartographie précise et la détection des objets mobiles.

Le guidage laser des bombes et missiles air-sol permet un autoguidage précis de ces armes vers l’objectif identifié, désigné et éclairé par un rayonnement laser. Les premières applications avec poursuite manuelle des objectifs sont apparues lors de la guerre du Vietnam à la fin des années soixante. Des études préparatoires d’équipements de poursuite automatique par corrélation optique d’objectifs désignés au sol existaient en France.

En liaison avec les États-Unis a été lancé en 1973 le programme d’équipement du Jaguar avec le pod Atlis de poursuite optique et d’éclairage laser. Le missile existant AS 30 a été choisi pour compléter le système.

C’était une nouvelle évolution de ce missile, conçu à la fin des années cinquante comme un dérivé du sol-sol antichar SS 11, à guidage à vue par alignement. Le guidage radioélectrique par alignement à partir d’un avion en vol a été, à juste titre, jugé trop contraignant et remplacé, vers 1968, par une télécommande automatique reposant sur la détection infrarouge de la direction du missile et la correction de ses écarts avec l’axe fixe de visée du pilote. Cette manœuvre qui nécessitait un vol précis en ligne droite de l’avion vers la cible

pendant les quelque vingt secondes de vol du missile plaisait peu, et le guidage fire and forget infiniment plus souple avec le pod Atlis a fait enfin toute la réputation de ce missile, intrinsèquement très efficace. Il a fallu cependant attendre 1983 pour voir un développement et une intégration satisfaisants et 1990 pour une utilisation opérationnelle.

Sur le Jaguar, avion à l'avionique plutôt rustique, le pilote devait effectuer l'acquisition visuelle de la cible, la désigner en orientant par commande manuelle l'axe optique du pod dans sa direction, enfin "peaufiner" la visée, en centrant rigoureusement l'image de la cible sur son écran de contrôle, tout en manœuvrant son avion pour se placer dans le domaine de tir.

De nouvelles générations de pods faisant appel à la détection infrarouge ont été développées, mais un grand progrès dans l'utilisation du pod laser est venu de son intégration dans des systèmes d'armes plus sophistiqués, de sa liaison avec les senseurs radar ou inertiels qui dégrossissent les tâches d'acquisition et de désignation d'objectif et assurent le guidage de l'avion sur des trajectoires optimales avant et après le tir.

Les missiles air-sol à longue portée sont conçus comme des avions sans pilote, avec des équipements de même nature : centrales à inertie, radio-sondes, autodirecteurs radar ou infrarouge.

En air-air et en air-sol, la détection infrarouge a été utilisée en complément ou à la place de la détection radar avec ses particularités de discrétion (détection passive) et d'excellent pouvoir séparateur. On peut citer les analyseurs mono-lignes latéraux air-sol pour la reconnaissance dès les années soixante, puis les FLIR, véritables caméras explorant tout l'espace devant l'aéronef, avec une application essentielle au pod de désignation laser jour-nuit, après son adoption sur l'ATL 2 de l'aéronautique navale. L'infrarouge, en air-air, a surtout été utilisé en France pour des autodirecteurs de missiles, mais depuis longtemps dans d'autres pays en complément du radar de bord. L'introduction de l'imagerie infrarouge sur ces détecteurs a marqué un progrès considérable, notamment dans le domaine de l'antibrouillage. Le système optronique du Rafale est le premier développé en France pour la détection air-air.

Viseurs, visualisations

Le viseur en 1953, fixe ou gyroscopique, le fameux gyro-gun-sight GGS, permettait seulement au pilote de désigner un objectif fixe ou mobile. Aujourd'hui, il est devenu l'instrument principal de pilotage de l'avion de combat, grâce au numérique essentiellement qui permet de ramener, à son niveau, des informations élaborées directement assimilables par le pilote, mais aussi grâce à des progrès technologiques qui ont rendu son utilisation plus souple et augmenté son confort et sa luminosité.

Les premières tentatives pour rechercher des utilisations nouvelles du viseur, au-delà de son rôle dans la conduite de tir, datent de la fin des années soixante, il s'agissait principalement de permettre au pilote d'accéder aux informations du tableau de bord tout en regardant dehors. Une première étape a été, dans la continuité des viseurs classiques, la génération des viseurs électromécaniques trichromes équipant le Jaguar et le Mirage F1 au début des années soixante-dix, qui disposaient de réticules mobiles indépendants – horizon artificiel, échelle de cap, altitude – projetés à l'infini par des systèmes de prismes optiques complexes. Chacun de ces réticules mobiles avait une figuration rigide.

À cette époque, on commençait à prendre conscience de l'intérêt de paramètres de pilotage très liés à la dynamique de l'avion comme le vecteur vitesse et l'énergie totale (ou sa dérivée) et de l'intérêt de les présenter en superposition au paysage réel par l'intermédiaire du viseur. Les premières figurations de pilotage dans le viseur ont eu un accueil mitigé de la part des pilotes, pour des raisons diverses, mais la principale me semble avoir été une réalisation technique peu satisfaisante des premiers démonstrateurs. J'ai entendu un pilote d'essais de très haut niveau déclarer après un vol exploratoire avec un viseur dont le réticule était programmé pour faire suivre à l'avion une trajectoire donnée : "C'est bien et même très précis, mais un viseur est fait pour être regardé un court instant au moment du tir, pas pour une utilisation continue". Certains pilotes étaient troublés par l'amplitude des mouvements des réticules (naturellement à l'échelle 1). Il y avait des progrès à faire sur le plan du confort.

Ces progrès sont venus avec le viseur cathodique, puis ont été encore accrus par la projection holographique grand champ. Les viseurs holographiques dont on parlait depuis 1975 équipent maintenant tous les chasseurs modernes.

Les premiers développements de viseurs cathodiques en France datent de 1971. Ambitueusement, à l'époque, on souhaitait un viseur cathodique polychrome, mais après l'échec du développement du tube idoïne, on est resté au monochrome qui a été opportunément choisi par l'aéronautique navale pour le Super Étendard, puis adopté pour le Mirage 2000.

Les informations de pilotage du viseur cathodique, visibles en superposition sur le monde extérieur, sont des informations utiles à court terme pour la conduite de la mission. Les informations moins critiques en temps réel, situation radar par exemple, configuration système, renseignement... sont présentées sur le tableau de bord, également par des visualisations cathodiques – polychromes – qui ont commencé à remplacer les cadrans analogiques à partir des années 1975 et permettent une programmation de la présentation des informations afin de simplifier les figurations en fonction des phases de vol.

L'effort concernant les visualisations a été mené en parallèle sur les avions civils et sur les avions militaires par les mêmes équipes industrielles et étatiques, même si le civil a plutôt donné la priorité à la "tête basse" et le militaire à la "tête haute" pour la fonction instrument principal de pilotage.

Environnement

Je voudrais terminer cet exposé, évidemment très incomplet, en évoquant brièvement les progrès accomplis au niveau de moyens de support et de soutien (hors maintenance) et de liaisons externes des avions de combat.

Je n'ai naturellement pas évoqué ici l'environnement politique et stratégique de ces cinquante ans car ce n'était pas le sujet, mais, bien sûr, il a influé sur les choix des décideurs, les priorités et finalement les réalisations. Un nouvel environnement est une nouvelle hypothèse qui provoque d'autres orientations. Je dirai simplement que les avions de combat de l'armée de l'Air française du dernier demi-siècle et les moyens-sol de contrôle, de commandement et de soutien se sont développés dans un environnement principalement dominé par la guerre froide et l'éventualité d'un affrontement Est-Ouest. Les deux priorités principales de nos avions de combat étaient la protection du territoire national contre les incursions aériennes et l'intervention contre des forces terrestres. Les moyens sol de leur côté – centres de contrôle et de commandement, stations radar, réseau de transmissions... – ont longtemps été intégrés dans une infrastructure à vulnérabilité réduite.

Au cours du temps et des deux côtés, les progrès en matière de matériaux, d'aérodynamique – améliorant la propulsion et l'autonomie – et en matière d'équipements électroniques, contre-mesures par exemple, ont conduit à des changements de tactique dont il a fallu tenir compte, en retour, dans l'équipement des avions et, tout d'abord, dans l'orientation des études.

Il y a eu l'époque de la menace de raids haute altitude et, en réponse, la détection lointaine par des radars-sol fixes, une défense aérienne cohérente avec le concept d'intercepteurs légers. Puis les scénarios d'attaque ont évolué vers des pénétrations à basse altitude, vers le suivi de terrain, imposant la détection vers le bas, dans les échos de sol.

Pour les chasseurs, la détection doppler est devenue nécessaire, une autonomie plus grande aussi.

Pour la surveillance et l'alerte, on a envisagé un déploiement de radars fixes sur tours, mais finalement l'avion de détection lointaine a aussi été choisi par la France. Sa mobilité lui permet d'être également bien adapté aux déploiements lointains des conflits actuels.

Depuis la fin des années quatre-vingt, les études et réalisations de moyens de commandement, de support et de soutien ont été réorientées vers des matériels mobiles, utilisables loin de l'hexagone et dont le maillage, plutôt que le durcissement, garantit la survie.

Informatique de commandement

Depuis que les opérations aériennes existent, on rencontre, dans les centres de commandement, des bases de données de la situation tactique permettant de simuler les actions envisageables et de diriger la manœuvre. On se souvient des grands tableaux transparents ou des tables sur lesquelles on déplaçait des maquettes, dans les vieux films, pour suivre le déroulement de la bataille.

L'informatique, et surtout l'informatique temps réel, qui est apparue dès le début des années soixante dans le STRIDA, a permis de traiter des informations de plus en plus nombreuses et complexes dans un temps de plus en plus court, alors que, de son côté, le renseignement de plus en plus précis, acheminé en temps réel, donnait une évaluation plus rapide de la situation tactique.

À côté du système de détection STRIDA, qui se perfectionnait depuis les années soixante et assurait la conduite des interceptions de la défense aérienne, l'informatique de commandement s'est développée dans l'ancienne force aérienne tactique dans les années 1975 pour planifier et organiser les raids de chasseurs bombardiers aux missions complémentaires partant de différentes bases aériennes. Elle transmettait aux exécutants une prévision précise de leur mission et de nombreuses données d'environnement. Elle s'est perfectionnée dans les années 1985, non seulement à cause des progrès de l'informatique, de la collecte et du traitement des informations, mais aussi pour prendre en compte les spécificités du Mirage 2000 N, infiniment plus souple d'emploi et capable de plus d'initiatives en cours de mission que ses prédécesseurs.

Le système informatique de bord contient les données issues de la préparation de mission et les fait connaître en temps utile, il permet aussi une restitution de mission très complète, fonction assurée autrefois par une simple caméra de viseur qui filmait au moment des tirs.

Liaisons

Les liaisons temps réel avec les avions en opération, la radio en phonie il y a cinquante ans, ont également progressé en débit, en discrétion, en capacité d'antibrouillage et de traitement de mise en forme.

Ces liaisons ont été conçues et réalisées dans un cadre OTAN. Je citerai la liaison 4, téléaffichage des ordres à partir du sol, la liaison 11, décrivant une situation tactique, la liaison 16, véritable réseau d'abonnés permettant le partage des tâches en temps réel.

Ainsi, en cinquante ans, les avions de combat, en même temps que leurs capacités "physiques" s'accroissaient, sont devenus plus savants, plus adroits, plus autonomes et indépendants des conditions d'environnement. Mais ils sont aussi de plus en plus étroitement reliés aux échelons de commandement et intégrés en temps réel à un système de forces global.

Les progrès de l'électronique et de l'informatique ont assuré – moyennant un certain changement de culture – le maintien de la capacité du pilote à assurer la conduite de son avion et de sa mission ; ils ont également diminué son espace de liberté et d'initiative.

Jacques VEDEL

LES AUTEURS

Autour de Jean Carpentier, coordinateur d'ensemble, le groupe COMAÉRO-Équipements, comprenant Michel Bergounioux, Charles Bigot, Maurice Bommier, Gérard Bonnevalle, Georges Bousquet, Marcel Cado, René Carpentier, Daniel Dupuy, Michel Hucher, Michel Lamy, Philippe Martelli, Jean Monfort, Robert Munnich, Daniel Pichoud et Jean-Claude Renaut, a assuré la rédaction des différents chapitres du présent ouvrage. En outre, d'anciens responsables des services officiels ou de l'industrie ont apporté leur concours pour la rédaction des annexes.

LES MEMBRES DU GROUPE COMAÉRO-ÉQUIPEMENTS, PRINCIPAUX AUTEURS DU RAPPORT ET DES ANNEXES

Michel BERGOUNIOUX

(École Polytechnique, promotion 1948 – Sup'Aéro, promotion 1953)

Ingénieur militaire de l'Air, puis ingénieur de l'armement, Michel Bergounioux a effectué toute sa carrière, de 1954 à 1983, à la DTIA (Direction technique et industrielle de l'aéronautique) devenue, en 1965, la DTCA (Direction technique des constructions aéronautiques). La majeure partie de cette carrière fut accomplie au STTA, dont il fut le directeur de 1976 à 1979.

À la création, en 1980, du STTE (Service technique des télécommunications et des équipements de l'aéronautique), l'ingénieur général Michel Bergounioux en fut nommé directeur.

Charles BIGOT

(École Polytechnique, promotion 1952 – Sup'Aéro, promotion 1957)

Charles Bigot est entré, en début de carrière, au Groupe des engins balistiques, du Service technique aéronautique.

En 1960, il est détaché au Service d'aéronomie du CNRS, comme responsable des activités spatiales (tirs de fusées sondes), puis, en 1963, au CNES, où il est successivement chef de projet du satellite D-2 et premier directeur des lanceurs, de 1966 à 1970 (Diamant B, Europa II).

Après dix ans d'absence du domaine spatial (cinq ans à Air-Inter et cinq ans chez Renault), Charles Bigot est nommé, en 1980, directeur commercial Espace de la société Aérospatiale qui obtient son premier contrat international avec ARABSAT en 1981. Enfin, il dirige Ariespace, d'abord comme directeur général, de 1982 à 1990, puis comme président directeur général, de 1990 à 1997.

Charles Bigot est administrateur de l'Institut français d'histoire de l'espace, membre du groupe parlementaire sur l'espace de l'Assemblée nationale et membre de l'Académie nationale de l'air et de l'espace.

Maurice BOMMIER

(École Polytechnique, promotion 1944 – Sup'Aéro, promotion 1949)

Maurice Bommier commence sa carrière au Centre d'essais en vol, à Brétigny, après un stage à Air-France. De 1949 à 1959, il est chargé des essais d'équipements (instruments, élec-

tricité, conditionnement, sauvetage et parachutes). Il est ensuite nommé chef de la section Instruments-Pilotage au STAé, puis chef de la circonscription de surveillance aéronautique de Paris, puis sous-directeur Écoles de la DGA, de 1977 à 1980.

Pilote corps technique (vol aux instruments, 900 heures de pilotage), Maurice Bommier est ingénieur général de l'armement (2e section).

Gérard BONNEVALLE

(École Polytechnique, promotion 1954 – Sup'Aéro, promotion 1959)

Gérard Bonnevalle est, en début de carrière, chargé, à la section des Équipements du Service technique aéronautique, des systèmes de navigation par inertie pour avions et du système de guidage par inertie du missile AS 33 franco-allemand.

Dans les années soixante-dix, à la section Expertises et Prix du Service de la production aéronautique, il coordonne les études économiques et financières concernant le secteur aérospatial, puis il est nommé, au Service technique des programmes aéronautiques, directeur des programmes Atlantique 2 et Super Étendard modernisé, conduits au profit de l'aéronautique navale.

À la fin des années quatre-vingt, Gérard Bonnevalle est chargé des relations internationales à la Direction des constructions aéronautiques.

L'ingénieur général de l'armement G. Bonnevalle termine sa carrière comme inspecteur de l'armement pour l'aéronautique et l'espace.

Georges BOUSQUET

(École Polytechnique 1944 – Sup'Aéro 1949 – Sup'Élec 1950)

Georges Bousquet est affecté en 1950 au Centre d'essais en vol (CEV). Après un stage à la SFIM, il participe à la mise au point des méthodes et moyens d'essais, au Service méthodes, puis aux essais d'armements, au Service des essais.

En 1958, il rejoint le Service technique aéronautique (STAé).

Au sein de la section Équipements, il est notamment chargé du système de navigation-bombardement du Mirage IV.

Il est nommé successivement chef de la section Équipements (1961-1969), chef de la section Avions (1969-1970), sous-directeur du STAé (1970-1975). Il est alors responsable, entre autres, des sections Armements, Équipements, Voilures tournantes. Il anime la coopération franco-britannique sur les hélicoptères.

Directeur du STTA (1975-1976), l'ingénieur général Georges Bousquet devient directeur technique des Constructions aéronautiques en 1976 et exerce ces fonctions jusqu'en 1984. Il est alors nommé inspecteur général de l'armement.

De 1986 à 1989, Georges Bousquet est président de la Société de gestion de participations aéronautiques (SOGÉPA).

L'ingénieur général Georges Bousquet est membre émérite et ancien vice-président de l'Association aéronautique et astronautique de France (AAAF).

Marcel CADO

(École Polytechnique, promotion 1949 – Sup'Aéro, promotion 1954)

Breveté pilote militaire à Avord, Marcel Cado commença sa carrière à la section Équipements du Service technique aéronautique, où il fut affecté, de 1955 à 1969, à la sous-

section Pilotage. En 1969, il devint chef de la section Équipements du STAé. En 1973, il fut nommé chef des sections Équipements et Armement, au Service de la production aéronautique. Il devint, en 1976, sous-directeur de ce service et exerça cette fonction jusqu'en 1979. L'ingénieur général Marcel Cado fut alors nommé président directeur général de la SOPEMEA, présidence qu'il exerça conjointement avec celle d'Intespace, de 1983 à 1992.

Jean CARPENTIER

(École Polytechnique, promotion 1944 – Sup'Aéro, promotion 1949)

Après un stage d'un an à la SFENA pour étudier les pilotes automatiques pour avions et missiles, Jean Carpentier est affecté à la section Équipements du STAé, où il est chargé, de 1950 à 1960, des recherches sur le pilotage et la navigation. Il lance, en 1956, les premières études sur la navigation par inertie en France. Il est détaché à la SFENA en 1960, pour participer aux travaux confiés à la SERNI, société filiale de SFENA, SAGEM et SACM, dans le domaine du guidage inertiel.

En 1961, il rejoint la DRME (Direction des recherches et moyens d'essais) nouvellement créée. Il y est nommé successivement chef de section Équipements mesures informatiques, chef du Service des recherches, directeur adjoint.

En 1977, la DRME devient Direction des recherches, études et techniques (DRET) et l'ingénieur général Jean Carpentier en est le directeur. En 1984, il est nommé président de l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA). Jean Carpentier exerce cette fonction jusqu'à sa limite d'âge, en 1991.

Il préside, de 1989 à 1994, le comité de direction du Bureau national de métrologie et, de 1992 à 1996, le comité Avion-Ozone constitué par la Direction générale de l'aviation civile.

L'ingénieur général Jean Carpentier est membre honoraire de l'Académie nationale de l'air et de l'espace et membre émérite de l'AAAF.

René CARPENTIER

(Licencié ès sciences – Sup'Aéro, promotion 1956)

René Carpentier est affecté, en 1956, à la section Engins du STAé. D'abord responsable des activités Infrarouge, il devient, en 1957, chef de la sous-section Missiles autoguidés (air-air et air-sol) et ingénieur de marque (appellation actuelle : directeur de programme) du missile air-air R 530 (1er missile moderne) et du missile air-sol Martel réalisé en coopération franco-britannique. Au début de 1967, il devient le responsable de l'ensemble des missiles tactiques.

René Carpentier poursuit sa carrière comme directeur à la branche Défense de la société MATRA, de 1972 à 1997. Il y occupe différents postes, dont celui de directeur-adjoint de la branche. Son activité principale est le lancement des études générales et des nouveaux programmes, surtout en coopération : missiles air-air MICA, sol-air Mistral, air-sol Apache, drone Brevet, etc.

De 1989 à 1993, il préside le GIE Eurodrone, constitué entre MATRA et la société allemande STN-Atlas. Il enseigne, en particulier à Sup'Aéro, le cours des missiles tactiques, de 1967 à 1984.

Ingénieur en chef de l'armement (Air) (R), René Carpentier est, pour COMAÉRO "Un demi-siècle d'aéronautique en France", responsable de l'ouvrage COMAÉRO-Missiles tactiques, en même temps que membre du groupe COMAÉRO-Équipements.

Daniel DUPUY

(ENSAM, SUPELEC)

Daniel Dupuy entre en 1959 à la SAGEM où il prend en charge le développement des systèmes inertiels pour l'aéronautique, secteur où SAGEM n'a pas encore d'expérience.

Après les programmes Concorde (1966), retrofit des Boeing 707 d'Air-France (1968), Airbus A 300 (1970), et Super Étendard (1974), Daniel Dupuy pilote le développement, l'industrialisation et la promotion internationale d'une famille de systèmes inertiels modulaires, dont plus de 3 000 unités seront installées sur 25 types d'avions

Dans les années quatre-vingt, SAGEM devient le seul concurrent de l'industrie américaine sur le marché international. Directeur de la division Électronique de Défense, Daniel Dupuy diversifie les créneaux d'excellence de SAGEM (modernisation d'avions d'armes, systèmes de drones, etc.) auxquels viennent s'intégrer en 1996 les systèmes optroniques infrarouges de SAT.

Michel HUCHER

(École Polytechnique, promotion 1945 – Sup'Aéro, promotion 1950 – brevet de pilote de chasse 1951)

Michel Hucher commence sa carrière au CEV en 1951 où il est successivement ingénieur d'essais à la section Équipements, au Service des pistes, chef de la section Avions.

En 1959, Michel Hucher est affecté à la section Économie de l'état-major de la Défense nationale (1959-1960), puis est nommé directeur de l'AIA de Clermont-Ferrand, fonctions qu'il exerce de 1960 à 1965.

Michel Hucher quitte en 1965 la DTCA pour rejoindre la SFENA où il est successivement directeur général adjoint (1965-1982), puis directeur général (1982-1987). Il est nommé président de SFENA Corporation (Grand Prairie, Texas) (1986-1988).

Michel Hucher a été vice-président (1991-1994), puis président (1994-1996) de l'Académie nationale de l'air et de l'espace (ANAE).

Michel LAMY

(École Polytechnique 1954 – Sup'Aéro 1959)

Après un stage de formation complémentaire aux États-Unis à l'initiative du Service technique aéronautique, Michel Lamy est affecté au Département engins, puis à la Direction technique des engins (bureau Guidage-Pilotage) jusqu'en 1971.

Il poursuit ensuite sa carrière à la Direction technique des constructions aéronautiques, au Service de la production aéronautique où il est chef de la section Avions à partir de 1974. Il est nommé sous-directeur industriel au Service technique des programmes aéronautiques de la Direction des constructions aéronautiques, à la réorganisation de 1980. Michel Lamy œuvre au sein de l'administration centrale de cette direction dans diverses fonctions de 1985 à 1989, puis à l'inspection de la DGA, en qualité d'inspecteur de l'armement pour l'aéronautique et l'espace jusqu'en 1994.

Philippe MARTELLI

(École Polytechnique, promotion 1962 – Sup'Aéro, promotion 1967)

Ingénieur général de l'armement (2e section).

Il a commencé sa carrière au CEV (1967-1974) comme chef de la sous-section Circuits, chargé des essais de matériels électriques, hydrauliques, de conditionnement d'air et de

freinage. En 1974, il a été affecté au STAé, section Équipements, comme chef de la sous-section Électricité (1974-1981).

Il a ensuite été détaché à la SODERN (1981-1987) comme responsable des programmes de sources et têtes neutroniques pour les armes nucléaires. Il a enfin occupé à la DRET les postes de directeur du Centre technique des moyens d'essais (CTME) et de sous directeur Établissements-Planification.

Jean MONFORT

(École Polytechnique, promotion 1960 – Sup'Aéro, promotion 1965)

Il effectue la première partie de sa carrière au sein de la DGA :

- de 1965 à 1972, au CEV à Istres, il participe à la création du Centre de simulation dont il est le premier chef ;
- de 1972 à 1978, au STAé, section Équipements, il est successivement Chef de la sous-section Pilotage, puis adjoint au chef de section ;
- de 1978 à 1985, au CEV à Brétigny, il est chef du service Essais, puis sous-directeur technique.

La seconde partie de la carrière de Jean Monfort se déroule dans l'industrie :

- 1985 : directeur technique et industriel de SFENA ;
- 1987 : directeur général de SFENA ;
- 1989 : directeur général de Sextant Avionique ;
- 1995 : président directeur général de Thomson-DASA Armement.

Robert MUNNICH

(École Polytechnique, promotion 1936 – Sup'Aéro, promotion 1946)

Robert MUNNICH a effectué sa carrière :

- au Centre d'essais des matériels aériens (CEMA), à Villacoublay, dès 1939 ;
- au Centre d'essais en vol (CEV, à Brétigny, qui succéda au CEMA en 1944), en tant qu'ingénieur d'essais, de 1947 à 1949, puis en tant que directeur, de 1969 à 1973 ;
- au Service technique aéronautique (STAé), en tant que chef-adjoint de la section Équipements, puis en tant que sous-directeur du STAé, de 1949 à 1969 ;
- au bureau Véritas-Aéro, de 1973 à 1981, en tant que directeur.

Dans le cadre de ses fonctions au STAé, l'ingénieur général Robert Munnich fut responsable de la coopération franco-britannique pour les programmes MARTEL et hélicoptères.

Daniel PICHOU

(École Polytechnique, promotion 1960 – ENSGM, promotion 1965 – Master of Sciences Aeronautics and Astronautics, Stanford University, États-Unis 1966)

Daniel Pichoud est, de 1971 à 1979, chef du bureau Guidage-Pilotage du Service technique des Engins balistiques à la Direction technique des engins.

De juin 1979 à septembre 1990, il est chef du groupe Espace-Satellites à la Direction des engins (dont les missions en matière spatiale sont maintenant réparties entre la DGA/DSP/SASF et la DGA/DSA/SPOTI).

Daniel Pichoud préside alors le groupe de coordination spatiale militaire qui produit le premier plan pluriannuel spatial militaire (PPSM) signé par le ministre de la Défense en mai 1984 ; il est, en mars 1986, premier directeur du programme Hélios.

En 1990, l'ingénieur général Pichoud est nommé Chargé de mission auprès du Délégué général pour l'armement, pour les questions de maîtrise des armements et de renseignement.

De 1995 à 1997, il est sous-directeur des technologies à double usage et de la maîtrise des armements à la Direction des relations internationales (DGA/DRI).

Jean-Claude RENAUT

(École Polytechnique, promotion 1950 – Sup'Aéro, promotion 1955)

J-C. Renaut a été, de 1955 à 1958, ingénieur de marque du missile sol-air MATRA 422, à la section Engins du STAé. Il poursuit sa carrière au département Engins, puis à la Direction technique des engins de la DMA où il fut responsable, de 1958 à 1966, du bureau Guidage-Pilotage des engins balistiques.

Il entra à Nord-Aviation en 1966 et fut chargé des technologies nouvelles. Il fut, de 1974 à 1989, directeur de l'établissement de Châtillon de la division Engins tactiques.

Jean-Claude Renaut fut nommé, en 1990, président de CILAS, fonction qu'il exerça jusqu'à la fin de sa carrière en 1995.

AUTRES CONTRIBUTEURS

Ont participé à la rédaction des annexes, dans leur domaine de compétence, des personnalités du secteur des équipements aérospatiaux qui ont joué un rôle essentiel au cours de la période considérée. Les membres de COMAÉRO-Équipements leur adressent leur vive gratitude pour leur contribution.

Annexe A 3 : Les pilotes automatiques pour avions et pour hélicoptères

Cette annexe a été rédigée par Marcel Cado, avec le concours de :

- **Raymond Dequé**, ancien ingénieur à la direction Technique de Sud-Aviation ;
- **Roger Larrieu**, ancien ingénieur essais en vol à la section Equisetums du CEV, chargé des essais de pilotes automatiques, ancien représentant de Sperry en France, ancien directeur commercial de la SFENA ;
- **Jacques Pagnard**, ancien ingénieur d'étude à la SFENA, ancien président directeur général de la SFENA ;
- **Jean-Claude Pérard**, ancien ingénieur à la SFENA ;
- **Pierre Bloch** et **Jean-Claude Derrien**, directeur et directeur adjoint de la division Défense et Sécurité de la SAGEM (ancienne division de la SFIM).

Annexe A 4 : Les simulateurs de vol

Cette annexe a été rédigée par Marcel Cado, avec le concours de :

- **Gilbert Bonn**, ingénieur général de l'armement, ancien ingénieur à la sous-section Pilotage de la section Équipements du Service technique aéronautique, en charge des études de simulateurs ;
- **Jean Mayou**, directeur de la division Électronique de SOGITEC ;
- **Christian Mathey**, directeur technique de Thales Training & Simulation.

Annexe A 5 : La navigation autonome pour l'aéronautique et l'espace

Cette annexe a été rédigée par **Michel Hucher** et **Daniel Pichoud**, avec le concours d'autres membres de COMAÉRO-Équipements (MM. Gérard Bonnevalle, Jean Carpentier, Daniel Dupuy) et de :

Claude Vuillemin

(Licencié ès Sciences – ENS de chronométrie de Besançon, 1962)

Après un bref passage à l'Observatoire de Besançon, Claude Vuillemin fait une carrière d'ingénieur d'études à la société Crouzet (1962-1989). Acteur principal de l'évolution technique des produits Crouzet pour l'industrie aérospatiale (capteurs de pression, accéléromètres, calculateurs de navigation, avionique d'hélicoptères), Claude Vuillemin contribue au rapprochement avec SFENA et à la création de Sextant, où il termine sa carrière en tant que directeur scientifique et technique.

Annexe A 7. Le guidage-pilotage des missiles tactiques

Cette annexe a été rédigée par **Jean-Claude Renaut**, avec le concours de **Gérard Bonnevalle**, **René Carpentier** (membres de COMAÉRO-Équipements) et de **Jean Guillot**.

Jean Guillot entra, dès sa création en 1947, dans l'équipe Engins constituée par Émile Stauff, à l'Arsenal qui fut ensuite intégré dans Nord-Aviation. Durant les 41 années de sa carrière, il participa à toutes les études et à tous les développements des missiles tactiques de Nord-Aviation, puis d'Aérospatiale.

En matière d'équipements, il commença par les études d'intercepteurs de jet et du gyroscope à poudre de l'engin SS 10. Après avoir dirigé l'ensemble des bureaux d'études, il fut nommé en 1973 Directeur technique de la division des Engins tactiques de l'Aérospatiale, fonction qu'il exerça jusqu'à la fin de sa carrière en 1988.

Annexe A 8. L'observation aérienne et l'observation par satellites

Cette annexe a été rédigée par Daniel Pichoud, avec le concours des personnalités suivantes :

↳ Pour l'observation aérienne hélicoptères :

- observation optique : **Michel Thomas**, directeur de la division Hélicoptères de la société Aérospatiale, de 1984 à 1987 (Michel Thomas a également occupé diverses fonctions dans la Division, de 1964 à 1975) ;
- observation radar : ICA **Norbert Collo**, directeur du programme Orchidée de janvier 1986 à décembre 1991.

↳ Pour l'observation aérienne avions :

ICETA **Paul Lafouasse**, responsable des systèmes d'observation aérienne à la section Équipements du Service technique aéronautique, de 1960 à 1974, après une douzaine d'années passées au Centre d'essais en vol, pour leur expérimentation.

Ont également été utilisés des éléments fournis par **Serge Larroque**, chargé des activités Reconnaissance aérienne au sein de la société Thales Optronique, et un article de l'ICA **Jean-Marie Malterre**, directeur des opérations systèmes aéroportés du Service des

programmes aéronautiques, article paru dans la revue l'Armement de juin 2001, ainsi que les éléments fournis par l'IGA Maurice Bommier.

↳ Pour le rôle d'ENERTEC dans les programmes d'observation aériens et spatiaux :

Jean-François Sulzer, directeur à la société ENERTEC, responsable des programmes enregistreurs pour les systèmes d'observation.

Annexe C : Des équipements aux systèmes

Georges Bousquet et Michel Hucher ont assuré la coordination des contributions apportées par Marcel Berjon, Marcel Cado, André Derré, François Gonin, Daniel Lerouge, Bernard Latreille, Alain Picard, Jean Monfort, et Jean-Luc Sicre.

Marcel Berjon

Marcel Berjon, après ses études de Mathématiques spéciales au lycée de Bordeaux, entre en avril 1947 chez Breguet à Villacoublay, au bureau de calcul où il travaille successivement sur le Breguet "Deux Ponts", le planeur 901 et sur les avions d'appui tactique Breguet 1100 et 1001 Taon. En 1957, il est chargé de la coordination Études-Essais sur ces avions. En 1958, il est nommé chef de Département et est Ingénieur de marque, chargé de la coordination technique pour le Breguet 1150 "Atlantic", à la SECBAT.

Promu ingénieur en chef Systèmes en 1961, Marcel Berjon est nommé sous-directeur technique, responsable technique du Jaguar en 1968. Il succède à G. Ricard en 1971 et devient directeur technique des Avions Breguet, et par suite de SECBAT et SEPECAT, dans le cadre de AMD-BA, en 1972.

Marcel Berjon est nommé directeur du Programme Atlantique 2. De 1975 à 1990, il préside le Comité technique du BNAé. De 1987 à 1989, il représente l'industrie aéronautique au Conseil d'administration de l'AFNOR. Il termine sa carrière le 31 mars 1990.

André Derré

À sa sortie en 1951 de l'ENTAé (qui est devenue l'ENSICA), André Derré est affecté, en tant qu'ingénieur militaire des travaux de l'air, au Service technique de l'aéronautique, à la section Équipements (sous-section Pilotage). De 1952 à 1954, il y est chargé du suivi des études d'instruments pneumatiques de planche de bord.

Il exerce ensuite les fonctions d'ingénieur d'études chez LEGPA pour le développement d'anémo-machmètre électrique.

En 1956, André Derré est ingénieur chez Derveaux, dans l'équipe du viseur de bombardement du Vautour.

De 1959 à 1961, il est ingénieur d'études à la SEREB, pour le développement de l'électronique de pilotage des engins expérimentaux à propergol solide.

De 1962 à 1986, il est, chez Crouzet, chef du bureau d'études, puis directeur des études et directeur technique (en 1972) de cette société.

Militant chez Crouzet pour le regroupement des sociétés d'équipements, André Derré est nommé, en 1980, directeur général de SV 2, filiale commune de Crouzet et de SFENA.

François Gonin

(École Polytechnique, promotion 1959 – Sup'Aéro, promotion 1964 – pilote des Corps techniques dès 1962)

François Gonin commence sa carrière en 1964 comme ingénieur à la section Avions du Centre d'essais en vol à l'annexe d'Istres, au sein de la première équipe chargée de concevoir la simulation d'études au CEV. De 1968 à 1971, il est ingénieur de marque Mirage G, G 8, F 1, F 2, à la section Avions du CEV.

Nommé en 1971 chef de la section Avions du CEV, il devient, en 1973, sous-directeur technique délégué à l'annexe d'Istres du CEV. En 1975, François Gonin est affecté à Brétigny, en tant que chef du service des Essais en vol.

Nommé, en 1978, chef du groupe Mirage 2000 du département Avions du Service technique aéronautique, François conserve ces fonctions lorsqu'il est nommé, en 1979, directeur du programme Mirage IV P. Il devient en 1984 chef du département Avions du Service technique des programmes aéronautiques, dont il est nommé sous-directeur technique en 1986, puis adjoint au chef en 1988, et chef en 1990.

En 1996, l'ingénieur général François Gonin est nommé inspecteur de l'armement pour l'aéronautique et l'espace.

Bernard Latreille

(École Polytechnique, promotion 1952 – Sup'Aéro, promotion 1957 – pilote des Corps techniques dès 1955)

Centre d'essais en vol, Brétigny-sur-Orge, de 1957 à 1965. Section Essais/Équipement, matériels de navigation (calculateurs de point, doppler, inertie...), responsable des essais de mise au point, sur avions de servitude, des éléments du système de navigation du Mirage IV, puis de son ensemble sur SO 30 Atar. Chef de la section Équipements.

Secrétariat général à l'aviation civile, Direction des transports aériens, de 1965 à 1972. Chargé du secrétariat côté français du Comité des fonctionnaires Concorde au bureau du Matériel volant, puis chef de ce bureau qui, à l'époque, traitait les questions de navigabilité des aéronefs du registre français ainsi que du soutien de l'État aux programmes de l'industrie aéronautique civile française. Sous-directeur à la DTA, chargé des affaires techniques (couvrant également les questions opérationnelles de l'aviation civile).

Dassault, Direction des avions civils de fin 1972 à 1992. D'abord au titre du programme Mercure, puis directeur des avions civils de 1975 à 1992, période pendant laquelle ont été lancés les Falcon 50, 900 et 2000. Administrateur de Falcon Jet Corporation de 1978 à 1992.

Daniel Lerouge

Ingénieur Sup'Aéro promotion 1957, Daniel Lerouge entre, en 1960, chez Dassault Aviation (alors GAMD) et y effectue toute sa carrière jusqu'en fin 1996. De 1960 à 1993, il consacre son activité au développement des systèmes d'armes en créant le service correspondant qui devient ensuite département, puis direction technique. Daniel Lerouge organise les activités de coordination et d'architecture industrielle correspondantes, en interne et en coopération avec tous les industriels équipementiers, pour répondre aux demandes exprimées par les services officiels.

Alain Picard

Ingénieur Sup'Aéro promotion 1970, Alain Picard entre chez Dassault Aviation en 1971, en tant qu'ingénieur d'essais en vol à Istres.

De 1971 à 1994, il y est responsable des essais et de la mise au point des Falcon 10, Mercure, Falcon 30, Mirage F 1 B, puis des programmes Falcon 50, Falcon 900, de la

modernisation de l'ATL 1 (Italie), des programmes Mirage 2000 Export, puis de tous Mirage 2000, et, enfin, des programmes Avions civils et Espace.

Directeur technique adjoint à Mérignac en 1995, Alain Picard est nommé, en 1996, directeur adjoint au directeur technique Systèmes, à Mérignac, puis à Saint-Cloud.

En 2000, il est nommé directeur technique Falcon et, en 2003, il devient directeur chargé de mission auprès du directeur général technique de Dassault Aviation.

Jean-Luc Sicre

Diplômé de l'École nationale supérieure de l'aéronautique (promotion 1964)

Plus de trente-cinq ans d'expérience dans le domaine des systèmes "avionique". Rejoint la SFENA en 1968 et participe au développement des pilotes automatiques Concorde et Airbus B 2-B 4 et à leur certification en catégorie III. Expérience technique en avionique acquise au travers de l'ensemble des programmes Airbus et du programme Boeing 777, dans les domaines de la conduite automatique du vol, des commandes de vol électriques et des systèmes d'avionique utilitaire.

Au sein de Sextant Avionique, puis de Thales Avionics, directeur technique de l'entité Avionique Civile, en charge des offres package et du développement des produits communication, navigation, surveillance.

Responsable du bureau de Navigabilité de Thales Avionics.

Annexe D concernant Pierre Chombard

Pierre Schnerb

À sa sortie de l'École Polytechnique (promotion 1930), Pierre Schnerb effectue un stage à l'École d'application de l'armée de l'Air, puis est admis à Sup'Aéro (promotion de sortie 1935).

Il est ensuite affecté à l'EETIM (Établissement d'expériences techniques d'Issy-les Moulineaux), puis au Service technique aéronautique, section des Équipements, où il est nommé chef de la sous-section Instruments de pilotage, Pilote automatique, Navigation.

Affecté, en 1945, au service central d'Information Technique, il est nommé en 1947 chef de la section des Équipements du Service technique aéronautique. Il exerce ces fonctions avec une vaste compétence dans un domaine en rapide expansion jusqu'en 1958. Il est alors nommé chargé des recherches, notamment pour les engins balistiques, auprès du directeur technique et industriel de l'aéronautique.

Annexe D concernant Jean-Charles Gille

André J. Fossard

Ingénieur civil Aéronautique (Sup'Aéro 1958)

M S California Institute of Technology (1959)

Ingénieur de recherche au CERA (1962-1970)

Ingénieur de recherche au CERT-ONERA (1970-2000)

Directeur de recherches ONERA (1995-2000)

Professeur à Sup'Aéro (1968-2000)

Membre du Comité national du CNRS (1975-1980)

Membre du Conseil de l'International Federation of Automatic Control (1984-1990)

Annexe D concernant Air Equipement

Paul Reynaud

Ingénieur civil de l'Aéronautique, Sup'Aéro (promotion 1949)

- De 1949 à 1952, ingénieur d'études "Stabilisation aérodynamique des missiles" à la société ECA
- De 1952 à 1983, à la société Air Equipement :
 - Ingénieur d'études
 - Chef du Département "Espace"
 - Chef du Groupe "Systèmes" (Hydraulique, Pilotage, Navigation, Electricité, Electronique)
 - Directeur "Stratégie et Produits Nouveaux"

Au cours de sa longue et féconde carrière à Air Equipement, Paul Reynaud a, notamment, dirigé la conception et la réalisation de systèmes hydrauliques pour Concorde et Airbus, de gyromètres pour le missile Roland et d'amortisseurs de nutation pour satellites.

Annexe D concernant la SFIM

Léon Vandenberghe

(École Polytechnique, promotion 1948 – Sup'Aéro, promotion 1953 – breveté Pilote de chasse en juillet 1954, Meknès promotion 53 E)

Léon Vandenberghe est affecté en septembre 1954 au Centre d'essais en vol de Brétigny, d'abord à la section Installations sur avions du service Essais, puis à la section Équipements (commandes de vol, pilotage, navigation, électricité, conditionnement, parachutes). Nommé chef de cette section en 1960, Léon Vandenberghe quitte le CEV en 1963, après avoir effectué plus de 1 000 heures de vol sur tous types d'avions. Il est alors affecté au Secrétariat général de la Défense nationale.

Léon Vandenberghe rejoint la SFIM en avril 1964, comme directeur des études. En 1970, il est nommé directeur général adjoint de cette société qu'il quitte en 1986.

Un témoignage

Jacques Vedel

(École Polytechnique, promotion 1955 – Sup'Aéro, promotion 1960)

Jacques Vedel a fait toute sa carrière à la Direction technique et industrielle de l'Aéronautique, devenue, par la suite, Direction des constructions aéronautiques :

- de 1960 à 1963, responsable des essais de missiles aéroportés R 530 et AS 30 ;
- de 1963 à 1970, sous-directeur technique du CEV – annexe de Cazaux ;
- de 1971 à 1974, adjoint, puis chef de la section Armement-Missiles du STAé ;
- de 1975 à 1979, chef de la base d'essais du CEV-Istres ;
- de 1979 à 1981, sous-directeur technique du CEV-Brétigny ;
- de 1982 à 1991, sous-directeur technique, puis directeur du STTE ;
- de 1991 à 1997, directeur de la DCAé.

Breveté pilote de chasse en 1958, Jacques Vedel a effectué plus de 4 000 heures de vol comme pilote.

PRINCIPAUX SIGLES UTILISÉS

ADI : Attitude Director Indicator

ADS : Air Data System

AHRS : Attitude and Heading Reference System

ALAT : Aviation Légère de l'Armée de Terre

APU : Auxiliary Power Unit

ARINC : Aeronautical Radio Incorporated

ASMP : missile Air-Sol Moyenne Portée

ATLIS : Autopointeur Télévision et Laser d'Illumination

BGL : Bombe Guidée Laser

BNAé : Bureau de Normalisation Aéronautique

BTP : Boîtier de Transmission Principal

CAE : Canadian Aviation Electronics

CDVE : Commandes de Vol Électriques

CEAM : Centre d'Expérimentations Aériennes Militaires de Mont-de-Marsan

CEAT : Centre d'Essais Aéronautiques de Toulouse

CELAR : Centre Électronique de l'Armement

CERT : Centre d'Études et de Recherches de Toulouse (ONERA)

CEV : Centre d'Essais en Vol

CFIT : Controlled Flight Into Terrain

CIEES : Centre Interarmées d'Essais d'Engins Spéciaux

DBA : Ducellier, Bendix, Air Équipement

DCAé : Direction des Constructions Aéronautiques

DEFA : Direction des Études et Fabrications d'Armement

DEN : Département, puis Direction des Engins

DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile

DME : Distance Measuring Equipment

DPAC : Direction des Programmes Aéronautiques Civils

DPAI : Direction des Programmes et des Affaires Industrielles

DRET : Direction des Recherches, Études et Techniques

DRME : Direction des Recherches et Moyens d'Essais

DTAT : Direction Technique des Armements Terrestres

DTCA : Direction Technique des Constructions Aéronautiques

DTCN : Direction Technique des Constructions Navales

DTEn : Direction Technique des Engins

EASY : Enhanced Avionics System

ELDO : European Launcher Development Organization

EFIS : Electronic Flight Instrument System

EMD : Électronique Marcel Dassault

ESD : Électronique Serge Dassault

ESG : Electrically Suspended Gyroscope

ESRO : European Space Research Organization

ETNA : Étendard Navigation Attaque

EUROCAE : EUROpean Organisation for Civil Aviation Equipments

FAA : Federal Aviation Agency

FCC : Flight Control Computer

FLIR : Forward Looking Infra Red

FMGC : Flight Management and Guidance Computer

FMS : Flight Management System

FNS : Force Nucléaire Stratégique

FOG : Fiber Optic Gyro

GAMD : Générale Aéronautique Marcel Dassault

GIFAS : Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales

GINA : Gestion des Informations Numériques Aéroportées

GPS : Global Positioning System

GSE : Gyroscope à Suspension Électrique

HUD : Head Up Display (visualisation tête haute)

HSI : Horizontal Situation Indicator

IFF : Identification Friend or Foe

IFR : Instrument Flight Regulations

ILS : Instrument Landing System

INS : Inertial Navigation System

LCD : Liquid Crystal Display

LCIE : Laboratoire Central des Industries Électriques

LEA : Laboratoire d' Équipements Aéronautiques

LMT : Le Matériel Téléphonique

LRBA : Laboratoire de Recherches Balistiques et Aérodynamiques

LTR : Langage Temps Réel

MATRA : Mécanique, Aviation, Traction (société)

MCU : Unité modulaire standardisée (1,6 litre environ)

MSBS : missile Mer-Sol Balistique Stratégique

MTBF : Mean Time Between Failure

OASIS : Outil d'Aide à la Spécification et à l'Intégration des Systèmes

OBOGS : On Board Oxygen Generation System

OMERA : Optique, Mécanique, Électricité, Radio pour l'Aéronautique (société)

ONERA : Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales

OPE : Organisation du Poste d'Équipage

ORCHIDEE : Observatoire Radar Cohérent Hélicoptère d'Investigation des Éléments Ennemis

PERSEPOLIS : Programme d'Étude et de Réalisation d'un Système Électronique Pour la Lecture d'Informations Synthétiques

PIGA : Pendulous Integrated Gyro-Accelerometer

RAIT : Run Air Turbo

RDI : Radar Doppler à Impulsions

RDM : Radar Doppler Multifonctions

RLG : Ring Laser Gyro

RTCA : Radio Technical Commission for Aeronautics

SAGEM : Société d'Applications Générales d'Électricité et de Mécanique

SAMRO : Satellite Militaire de Reconnaissance Optique

SAR : Search And Rescue

SAT : Société Anonyme de Télécommunications

SATCOM : Radiocommunication par satellite

SCTI : Service Central des Télécommunications et de l'Informatique

SDECCIA : Système de Développement d'Échanges et de Calculs d'Informations Analogiques et Arithmétiques

SEA : Société d'Électronique et d'Automatisme

SEREB : Société pour l'Étude et la Réalisation d'Engins Balistiques

SERNI : Société d'Études et de Réalisations pour la Navigation par Inertie

SFACT : Service de la Formation et du Contrôle Technique

SFENA : Société Française d'Équipements pour la Navigation Aérienne

SFIM : Société de Fabrication d'Instruments de Mesure

SMPA : Service des Marchés et de la Production Aéronautique

SNA : Système de Navigation et d'Attaque

SNB : Système de Navigation-Bombardement

SNLE : Sous-marin Nucléaire Lanceur d'Engins

SODERN : Société d'Études et de Réalisations Nucléaires

SOPEMEA : Société pour le Perfectionnement des Matériels et Équipements Aérospatiaux

SOREAS : Syndicat des fabricants d'Organes et Équipements Aérospatiaux

SPAé : Service de la Production Aéronautique

SSBS : missile Sol-Sol Balistique Stratégique

SSBT : missile Sol-Sol Balistique Tactique

STAé : Service Technique de l'Aéronautique

STEN : Service Technique des Engins balistiques

STET : Service Technique des Engins Tactiques

STPA : Service Technique des Programmes Aéronautiques

STTA : Service Technique des Télécommunications de l'Air

STTE : Service Technique des Télécommunications et des Équipements aéronautiques

TCAS : Traffic Collision Avoidance System

TERCOR : Terrain correlation

THT : Très Haute Tension

TRG : Tuned Rotor Gyro

VSCF : Variable Speed Constant Frequency

VE : Véhicule d'Essais

VFR : Visual Flight Regulations

VHF : Very High Frequency

VLSI : Very Large Scale Integration

VOR : VHF Omnidirectional Range

COMAÉRO-ÉQUIPEMENTS

LISTE DES FIGURES

Annexe A1 : Les instruments de planche de bord

Altimètre Jaeger à aiguille et à tambour, de Concorde
Horizon gyroscopique SFENA 800
Tachymètre Jaeger à impulsions
Horizon gyroscopique SFENA H 150
Différents types d'horizons gyroscopiques SFENA
Horizon indicateur de vol ADI SFENA N 32
Horizon situation indicator HSI N 33
Planche de bord PERSEPOLIS

Annexe A2 : Les commandes de vol

Schéma du système de commandes de vol de Concorde
Les servocommandes Air-Équipement de l'Airbus A300

Annexe A3 : Les pilotes automatiques pour avions et hélicoptères

Pilote automatique Alkan 15
Pilote automatique SFENA 505 du Mirage F1
Pilote automatique SFENA 605 du Mirage 2000
Pilote automatique SFENA 705 de l'Atlantique ANG
Pilotes automatiques SFENA pour hélicoptère
Pilote automatique SFIM 85 pour hélicoptère

Annexe A4 : Les simulateurs de vol

Simulateur d'avion de combat
Simulateur de combat aérien à deux cabines
Simulateur d'entraînement pour avion de transport
Vue intérieure de simulateur d'avion de transport
Le hall de simulation du CEV-Istres

Annexe A5 : La navigation autonome

Anémomètre compensé Crouzet 24
Centrale aérodynamique Crouzet 90
Totalisateur d'estime Crouzet
Indicateur sphérique SFIM
Sextan – Système de navigation Crouzet-SFENA pour hélicoptère
Calculateur et indicateur de navigation NADIR/Crouzet
Centrale bigyroscopique miniature SFIM
Radar Doppler de Navigation RDN 72, pour Jaguar
Calculateur de navigation-bombardement ESD du Mirage IV
Centrales inertielles SAGEM
Calculateur SAGEM pour le Concorde prototype
Centrale inertielle à composants liés

La gamme de gyromètres laser Thales
Centrale Totem 3000 de Thales
Centrale Quasar Thales
Centrale Quasar 3000 Thales
Système de navigation inertielle SIGMA (SAGEM)
Les senseurs inertiels
La transition douce d'ULISS vers SIGMA (SAGEM)
L'apport des références inertielles aux véhicules
Vingt ans d'expérience en filtrage de Kalman

Annexe A6 : Guidage-pilotage des missiles balistiques

Systemes SSBS
La navigation inertielle sur SNLE
Les équipements SAGEM pour SNLE
Présentation, au Premier Ministre, des centrales inertielles

Annexe A7 : Guidage-pilotage des missiles tactiques

Gyroscope Nord Aviation lancé par poudre pour SS11
Centrale gyroscopique SFENA du Pluton
Pilote automatique MATRA d'engins air-air
Senseurs du missile ASTER (Aerospatiale)
Gyroscope laser du missile antimissile ASTER

Annexe A8 : La photographie aérienne et l'observation par satellite

Appareil photographique OMERA
Appareil cartographique OMERA
Appareils photographiques panoramiques
Installation photographique interne d'un Mirage F1 CR
Hélios 1A, satellite d'observation militaire
Lancement de Hélios 1A

Annexe A9 : Sécurité – Sauvetage – Oxygène

Masque régulateur d'oxygène EROS
Système de régulateur oxygène et anti-g
Réservoir d'oxygène liquide du Mirage F1

Annexe A10 : Génération et distribution d'électricité

Convertisseurs AUXILEC
Évolution des connecteurs électriques et optiques

Annexe B2 : Statistiques sur les sociétés

- 1.1 Effectifs – Répartition par branches
- 1.2 Effectifs – Pourcentage par branches
- 1.3 Effectifs – Répartition par catégories professionnelles
- 1.4 Effectifs – Pourcentages par catégories professionnelles
- 1.5 Effectifs par activités
- 2.1 Chiffres d'affaires globaux
- 2.2 Chiffres d'affaires consolidés, par branches

- 2.3 Chiffres d'affaires globaux, par unité d'effectifs
- 2.4. Chiffres d'affaires consolidés, par unité d'effectifs
- 2.5 Répartition du chiffre d'affaires global par branches
- 3.1 Chiffre d'affaires avec l'État français
- 3.2 Chiffre d'affaires avec l'État français, en pourcentage
- 4.1 Exportations directes
- 4.2 Exportations directes, en pourcentage du chiffre d'affaires
- 5. Commerce international

Annexe B5 : Histoire des équipements spatiaux

- Schéma d'ensemble du lanceur Diamant B
- Case Équipements du lanceur Diamant B
- Dispositif de basculement du lanceur Diamant B

Annexe B6 : Moyens d'essais au sol

- Analyse modale à SOPEMEA-Villacoublay
- Essais d'un missile aux vibrations à SOPEMEA-Villacoublay
- Moyens d'essais Intespace à Toulouse
- Complexe d'intégration et d'essais Alcatel Space à Cannes

Annexe C : L'évolution des équipements vers les systèmes

- Mirage IV en vol et sa planche de bord
- Mirage F1 en vol et sa planche de bord
- Mirage 2000 en vol et sa planche de bord
- Rafale en vol et sa planche de bord
- Breguet Atlantic au sol et sa planche de bord
- Configuration des postes d'équipage de l'Atlantic ATL1
- Configuration des postes d'équipage de l'Atlantic ATL2
- Hélicoptère Gazelle au sol et sa planche de bord
- l'Airbus A300 en vol et sa planche de bord
- l'Airbus A310 au sol et sa planche de bord
- l'Airbus A320 en vol et sa planche de bord
- La famille des avions Falcon
- Planches de bord d'avions Falcon