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 I

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.

- VOLUME I -

PRÉFACE 9

AVANT-PROPOS 13

INTRODUCTION 15

1. OBJECTIFS ET ÉTAPES 17

2. LES PRINCIPAUX ACTEURS 19
- 2.1. Les utilisateurs
- 2.2. Les services officiels
- 2.3. Les organismes de recherche et d'essais
- 2.4. Les industriels

3. LA RESTRUCTURATION INDUSTRIELLE 24
- 3.1. La période de défrichage
- 3.2. Les premières tentatives de modification des structures industrielles
- 3.3. L'accélération des vingt dernières années

4. L'EFFET DES PROGRAMMES MIRAGE IV ET CONCORDE 27
- 4.1. Le programme Mirage IV, premier d'une lignée de systèmes d'armes
- 4.2. Le programme Concorde

5. LES CONSÉQUENCES DES PROGRAMMES DE MISSILES BALISTIQUES 30

6. LES RELATIONS INTERNATIONALES 31
- 6.1. Les importations d'équipements et le renouveau technique et industriel
- 6.2. Les exportations d'équipements
- 6.3. La coopération internationale
- 6.4. Bienfaits et méfaits des programmes en coopération internationale

7. CARACTÈRES SPÉCIFIQUES, ÉVOLUTION ET PERSPECTIVES 37

CONCLUSION 39

ANNEXES SECTORIELLES

ANNEXE A 1. LES INSTRUMENTS DE PLANCHE DE BORD 43
1. La transition des instruments : du vol à vue au vol sans visibilité (1930-1940)
2. Les instruments après la Seconde Guerre mondiale (1945-1960)
3. Les synthétiseurs, l'apogée des instruments électromécaniques (1960-1980)
4. L'arrivée des tubes cathodiques (1980-1995)
5. Les collimateurs de pilotage
6. Conclusion

ANNEXE A 2. LES COMMANDES DE VOL 55
1. Situation en 1945
2. L'apparition des avions à réaction et l'utilisation de l'énergie hydraulique
3. La commande électrique des gouvernes
   - 3.1. Les avions militaires
   - 3.2. Les avions civils
   - 3.3. L'hélicoptère NH 90

ANNEXE A 3. LE PILOTAGE AUTOMATIQUE 65

LE PILOTAGE AUTOMATIQUE DES AVIONS 65
1. Première étape (années cinquante – début des années soixante)
   - 1.1. L'auto-commande de profondeur SFENA
   - 1.2. Études de pilotage automatique pour avions de transport
2. Deuxième étape (années soixante – soixante-dix)
   - 2.1. Étude et mise au point de fonctions nouvelles
   - 2.2. Études et réalisations de chaînes de pilotage pour les avions de combat et de transport subsoniques et supersoniques

3. Troisième étape (à partir de 1975) : le passage au numérique
4. Conclusion

LE PILOTAGE AUTOMATIQUE DES HÉLICOPTÈRES 75
1. Pilotage automatique des hélicoptères lourds
1.1. Phase expérimentale
1.2. Phase d'application au Super Frelon
1.3. Les familles de pilotes automatiques SFIM pour hélicoptères
1.4. Introduction des technologies numériques
2. Pilotage automatique des hélicoptères légers
3. Pilotage automatique d'hélicoptères télécommandés

ANNEXE A 4. LES SIMULATEURS DE VOL 83
1. Naissance de l'activité simulation
2. Développement de l'activité simulateurs
3. La situation actuelle

ANNEXE A 5. LA NAVIGATION AUTONOME POUR L'AÉRONAUTIQUE ET L'ESPACE :

DE L'ESTIME À L'INERTIE

PRÉAMBULE 93

LA NAVIGATION À L'ESTIME 95
1. Estime basique
2. L'apport du radar doppler
3. Estime pré-inertielle
4. Le cas des hélicoptères
5. Conclusion

LA NAVIGATION PAR INERTIE 100
1. Les centrales inertielles avec plate-forme à cardans
1.1. La phase étude
1.2. La filiation entre la technologie missiles et la technologie avions
1.3. L'expérience civile
1.4. La percée sur avions militaires : importance du programme Super Étendard
1.5. La famille SAGEM de systèmes multifonctions ULISS
2. Les centrales inertielles à composants liés : le gyrolaser
2.1. La suppression de la plate-forme. Émergence de la centrale à composants liés
2.2. Les travaux de la SFENA avec le concours de Crouzet
2.3. L'inertie sur Ariane IV et Ariane V
2.4. Les travaux de la SAGEM : la famille SIGMA
3. Panorama de l'inertie en France
3.1. La France seul pays au monde – hors États-Unis – à maîtriser l'ensemble des technologies inertielles
3.2. La révolution du filtre de Kalman et les systèmes de navigation hybrides
3.3. L'apport des références inertielles aux différents véhicules
4. Épilogue : un bilan très positif de quarante années de politique volontariste de la DGA dans les divers domaines de l'inertie
5. Conclusion et perspectives

BIBLIOGRAPHIE **.....121**

TÉMOIGNAGE **:** "La navigation par inertie pour l'aéronautique" **.....124**

ANNEXE A 6. ÉQUIPEMENTS DE GUIDAGE PILOTAGE
POUR MISSILES BALISTIQUES ET STRATÉGIQUES 141

HISTOIRE DE LA MISE EN SERVICE DE CES ÉQUIPEMENTS **.....142**
1. De 1958 à 1965 : période des choix et des développements
2. De 1965 à 1970 : la maîtrise des technologies indispensables
3. De 1970 à 1980 : la mise en place des premiers systèmes balistiques
4. Les années quatre-vingt : mise en service de la deuxième génération balistique et stratégique
5. De 1990 à 1995 : la pression sur les coûts

ANNEXE A 7. GUIDAGE-PILOTAGE DES MISSILES TACTIQUES 155
1. Guidage par inertie. Les systèmes d'armes tactiques guidés par inertie. Leur positionnement dans le temps. Les équipements inertiels concernés.
2. L'utilisation des matériels de guidage inertiel dans ces programmes. Les acteurs. Histoire des choix et des évènements.
3. Équipements de pilotage et autres équipements
   3.1. Équipements de pilotage
   3.2. Équipements de stabilisation de l'antenne de l'autodirecteur
   3.3. Équipements du guidage mi-course

ANNEXE A 8. OBSERVATION AÉRIENNE ET OBSERVATION SPATIALE.....169
1. Observation aérienne
   1.1. Hélicoptères
   1.2. Avions
2. Observation spatiale

ANNEXE A 9. SÉCURITÉ-SAUVETAGE-OXYGÈNE 179
1. Parachutes.
2. Sièges éjectables
3. Combinaisons anti-g et centrifugeuses
4. Inhalateurs
5. Conditionnement

ANNEXE A 10. GÉNÉRATION ET DISTRIBUTION D'ÉLECTRICITÉ.....183
1. Les énergies de servitude
2. Évolution des matériels de génération électrique
   2.1. Les machines tournantes : génératrices, alternateurs
   2.2. La conversion continu/alternatif et alternatif/continu
   2.3. Les batteries
   2.4. Les câblages, connexions et protections
   2.5. Mutation industrielle
   2.6. Rôle des services officiels
3. Évolution des circuits de distribution d'électricité
   3.1. Réseaux et réglementation
   3.2. Sécurité et architecture des circuits
   3.3. Schémas de circuits de génération électrique
4. Conclusion

ANNEXES THÉMATIQUES

ANNEXE B 1. LES RELATIONS INTERNATIONALES 207
1. Le commerce international
   1.1. Les importations d'équipements
   1.2. Les exportations d'équipements
   1.3. La contribution du ministère de la Défense aux activités d'exportation des matériels militaires
   1.4. La balance commerciale
2. La coopération internationale
   2.1. Les différentes formes de coopération
   2.2. L'organisation étatique et industrielle pour la conduite des programmes en coopération internationale
   2.3. Les relations franco-américaines
   2.4. La coopération européenne
3. Les relations internationales en matière spatiale
   3.1. L'association européenne
   3.2. La coopération avec les grandes puissances spatiales
   3.3. Conclusion

ANNEXE B 2. STATISTIQUES SUR LES SOCIÉTÉS DU SECTEUR AÉROSPATIAL 227
1. Évolution des effectifs du secteur
   1.1. Les effectifs globaux et leur répartition par branche
   1.2. Les effectifs aérospatiaux par catégories professionnelles

1.3. La répartition des effectifs aérospatiaux par types d'activités
2. Le chiffre d'affaires du secteur aérospatial
3. Les contrats de l'État français
4. Les exportations
5. La balance commerciale aérospatiale

ANNEXE B 3. LA FILIATION DES ÉQUIPEMENTS, DE L'AÉRONAUTIQUE À L'ESPACE 249
1. Période de 1955 à 1970
2. Période de 1970 à 1990
3. Période de 1990 à 2001
4. Conclusion

ANNEXE B 4. LES ÉQUIPEMENTS FRANÇAIS DANS LES PROGRAMMES AÉRONAUTIQUES (AVIONS ET HÉLICOPTÈRES).....255
1. Avions militaires
2. Avions civils
3. Hélicoptères

ANNEXE B 5. HISTOIRE DES ÉQUIPEMENTS SPATIAUX.....261

1. Le mûrissement préalable
2. La première étape
   2.1. Programme Diamant A
   2.2. Les premiers satellites
   2.3. Autres activités spatiales
3. La deuxième étape (1966-1975)
   3.1. Le programme Diamant B
   3.2. Technologies et réalisations
4. Espace utile et grands programmes spatiaux (1975-2000)
   4.1. L'européanisation
   4.2. La période 1975-2000
   4.3. Les nouvelles tendances
5. Évolution de l'organisation
   5.1. Organisation pour la première étape
   5.2. Organisation pour les étapes suivantes
6. Conclusion

ANNEXE B 6. MOYENS D'ESSAIS AU SOL POUR L'INDUSTRIE AÉROSPATIALE 277
1. Le laboratoire d'essais SOPEMEA de Villacoublay
   1.1. Historique
   1.2. Les moyens
   1.3. L'opérateur : la SOPEMEA
2. Le Laboratoire Intespace d'essais spatiaux de Toulouse
   2.1. Historique
   2.2. Les moyens
   2.3. L'opérateur Intespace
3. Moyens d'essais d'Alcatel Space
   3.1. Historique
   3.2. Les moyens
   3.3. L'opérateur Alcatel Space

ANNEXE B 7. LE RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL DES ÉQUIPEMENTS AÉROSPATIAUX DE DÉCEMBRE 1975 287
1. Le champ de l'étude
2. Conclusions et recommandations

Aperçu du VOLUME II

ANNEXE C. DES ÉQUIPEMENTS AUX SYSTÈMES

LE DOMAINE DES SYSTÈMES AÉRONAUTIQUES

LES PROGRAMMES

MONOGRAPHIES DE SYSTÈMES

ARMÉE DE L'AIR ET EXPORT
Systèmes analogiques
Systèmes de transition analogique-numérique
Systèmes numériques

AÉRONAUTIQUE NAVALE

ARMÉE DE TERRE

AVIONS CIVILS

ANNEXE D. PIONNIERS ET FIRMES CARACTÉRISTIQUES

TÉMOIGNAGE
"Électronique et informatique, leur apport à l'équipement des avions de combat français et à leurs conditions d'emploi depuis cinquante ans"

LES AUTEURS
Les membres du groupe COMAÉRO-Équipements, principaux auteurs du rapport et des annexes

Autres contributeurs

Liste des sigles

Liste des figures

PRÉFACE

Quand Jean Carpentier m'a demandé, à l'issue d'une réunion du Comaéro, d'écrire quelques mots de présentation de l'ouvrage collectif qui allait être envoyé à l'impression et dont il avait coordonné la réalisation tout en y prenant une part directe des plus actives, j'ai accepté d'enthousiasme pour plusieurs raisons.

J'avais répondu positivement à l'amicale sollicitation d'Alain Crémieux d'animer les travaux qui devraient permettre de réunir les témoignages de ceux qui avaient écrit ou avaient contribué à écrire l'épopée de l'aéronautique française des années 1945 à 1995 ; il s'agissait de créer une source documentaire authentique et originale, au profit des historiens qui souhaiteraient se pencher sur cette période magnifique et dans laquelle ils pourraient puiser des renseignements intéressants ou à défaut trouver des guides de recherche ; cette démarche me paraissait à la fois utile et nécessaire, car elle donnait l'occasion à ceux qui l'ont encore en mémoire de préciser le rôle de tel ou tel et, en le mettant en lumière, d'empêcher ainsi que l'oubli ne vienne effacer leur apport et écarter leur nom de la liste de ceux qui ont illustré l'histoire technique et industrielle de notre pays. Je n'avais pas imaginé l'accueil que l'idée du chef de département Histoire du CHEAr allait rencontrer.

Dès la première réunion qui regroupait une bonne trentaine d'anciens hauts responsables de l'aéronautique étatique et industrielle et qui avaient tous joué un rôle personnel éminent, j'ai senti que le succès était à portée de main. Je me devais de porter témoignage de cet accueil d'autant que l'élan initial ne s'est jamais démenti depuis.

Présenter le fascicule sur les équipements aéronautiques m'en offre l'occasion et je le ressens comme un agréable devoir, car j'ai ainsi l'opportunité de manifester, à tous ceux sous les ordres de qui j'ai travaillé, toute ma reconnaissance et ma fidélité aux valeurs qui ont animé leur action et qu'ils nous ont transmises pour qu'à notre tour nous les léguions à nos successeurs dans cette longue chaîne au service de l'État, notion qui garde tout son sens et est responsable, pour une part, de la réussite nationale dans le domaine qui nous intéresse.

Du CEAT où j'ai passé mes premières années professionnelles à butiner sur les bancs d'essais des équipements électriques, hydrauliques, d'optique et de conditionnement d'air, à la section Équipements du STAé où j'ai été initié aux pilotage, navigation et commandes de vol et ensuite au STTE aux radars et à l'électronique, j'ai suivi l'évolution de chaque branche, l'acquisition des techniques et des technologies essentielles, les structurations industrielles ; des échecs, certes, mais aussi des brillantes réussites ont jalonné le chemin de l'acquisition de notre autonomie de conception et de fabrication, c'est-à-dire celui de notre indépendance.

J'ai rencontré la plupart des rédacteurs en situation de responsabilité et d'action, soit dans les services où ils furent mes chefs c'est-à-dire mes modèles, ou mes collègues et collaborateurs, soit dans l'industrie où ils furent mes co-opérants directs. Dans tous les cas, j'ai pu mesurer les efforts continus des uns et des autres pour mettre sur pied les capacités de conception, de réalisation, de fabrication qui ont donné à notre pays et dans une certaine mesure à l'Europe, la place qui est la leur aujourd'hui. C'est pour cela que je me devais de cautionner la qualité du travail accompli et dire au lecteur qu'il peut avancer en confiance. Il ne sera jamais l'objet de manipulation, il ne va pas rencontrer de chausse-trappe, il verra se dérouler, pour chaque partie, un film passionnant, celui d'une conquête et d'une réussite.

La structure même de cet ouvrage l'aidera dans sa quête d'information. La période retenue 1945-1995 est celle qui a connu et de loin les plus grandes évolutions, les sauts technologiques les plus importants. C'est cette marche en avant ininterrompue pendant une cinquantaine d'années que vous invitent à faire ou à refaire les rédacteurs du rapport introductif et ceux des annexes sectorielles ou thématiques.

Quand l'aviation, à ses tout débuts, n'était que la transcription d'un vieux rêve et le domaine d'exploit réservé de quelques audacieux, l'instrumentation à bord était des plus succinctes, voire inexistante : les frères Wright n'avaient strictement rien! Les avions de la Première Guerre mondiale étaient au mieux équipés de quelques indicateurs. Entre les deux guerres, un premier pas vers l'essor de l'aviation commerciale, "les lignes", s'accompagne de la prise de conscience que l'avion est un outil militaire incomparable et la planche de bord se garnit, elle commence même à déborder sur les flancs.

La Seconde Guerre mondiale déclenchera l'apparition d'une véritable profusion d'appareils de bord des plus variés, tous nécessaires pour informer l'équipage de l'état de sa machine, et lui fournir des indications précieuses pour un pilotage plus sûr et une navigation plus précise, gages d'une bonne réussite de sa mission. La France ne peut participer, et pour cause, à cette évolution. L'effort lancé en 1945 pour reconstruire l'aéronautique française s'intéressa, en tout premier lieu, aux cellules et aux moteurs. Les équipements sont, d'abord, directement importés, ensuite fabriqués sous licence.

Ainsi allait, peu à peu, prendre naissance une industrie française des équipements aéronautiques. Les services officiels suscitent, coordonnent, soutiennent une activité industrielle naissante qui, initiée par des inventeurs mécaniciens de génie, se développe au sein de sociétés, de petite taille, spécialisées. Beaucoup d'entre elles, mal assises, ont aujourd'hui disparu, d'autres ont été emportées par les changements technologiques ou ont connu des fortunes diverses, d'autres enfin se retrouvent au gré de restructurations successives, dans de grands ensembles de taille planétaire, mais dans lesquels il est aisé de retrouver la trace des apports de ces hommes de qualité, entrepreneurs réalistes qui, conscients de participer à une grande œuvre, ont permis à notre pays d'occuper la place qui est la sienne. À la fin des années soixante, la famille des équipements mécaniques et électromécaniques atteint ses limites, elle ne peut plus répondre aux besoins exprimés, les progrès vont se faire au sein d'une nouvelle génération qui exploitera toutes les possibilités offertes par l'électronique et l'informatique. Les lignes simples et fonctionnelles qui allaient du capteur à l'indicateur font place à des ensemble plus sophistiqués intégrant plusieurs fonctions dans le concept nouveau de "système", concept qui allait faire fortune, pour aboutir à des interfaces pilote-avion simplifiées, plus parlantes et presque plus naturelles, plus intuitives.

L'apparition de l'inertie, d'un grand intérêt pour la navigation, apporte, en prime, une référence de verticale d'une précision inégalée et, par ce fait, va s'imposer comme le cœur du système de pilotage-navigation.

Les commandes de vol électriques, développées dès le début des années soixante, autorisent le vol à stabilité variable, le manche classique disparaît au profit d'un mini manche latéral. Le pilotage à deux devient possible, les fonctions essentielles étant sous contrôle de chacun des pilotes. Les écrans envahissent la planche de bord et marquent le début d'une nouvelle ère d'évolution. Alors que cellules et moteurs vont garder les mêmes

lignes et donner aux flottes successives un lien de parenté apparent très fort, les postes d'équipage des avions d'après l'introduction du tube cathodique ne ressemblent plus à ceux des avions d'avant.

Dans ce nouveau domaine, la créativité et l'imagination françaises ont fait merveille ; les produits sortent génération après génération, toujours plus performants et font au moins jeu égal avec leurs concurrents sur les marchés mondiaux ; aujourd'hui un petit nombre de sociétés d'envergure internationale occupent le devant de la scène. Elles sont le résultat de cinquante années d'efforts continus que vous décrit cet ouvrage, efforts impliquant tous les acteurs : utilisateurs, services, organismes de recherche, industriels qui, poussés par la même foi en l'avenir et mus par la même ambition, ont su doter notre pays d'un incomparable pôle de rayonnement et de légitime fierté.

Faisons en sorte qu'il en soit ainsi encore longtemps et, pour cela, ne lésinons pas sur les moyens à mettre en place pour préparer les cinquante années qui viennent et dont ceux qui sont en responsabilité aujourd'hui auront à réunir les éléments d'histoire pour un nouvel ouvrage.

Émile BLANC

AVANT-PROPOS

Comme le rappelle l'ouvrage introductif Comaéro "Un demi-siècle d'aéronautique en France", l'aéronautique s'est caractérisée, de 1945 à 1995, par un progrès technique continu et rapide, ainsi par de nombreuses innovations et par d'importantes mutations.

Dans les années qui suivirent la Deuxième Guerre mondiale, les équipements aéronautiques étaient conçus séparément et faisaient essentiellement appel à la mécanique de précision.

À l'opposé, au tournant du XXI^{e} siècle, les équipements aérospatiaux font partie d'ensembles intégrés, au cœur même des systèmes d'armes ou des systèmes de transport, dont les vecteurs sont les avions, les hélicoptères, les missiles ou les lanceurs. Cette intégration a été rendue possible par la révolution numérique qui a résulté des progrès fulgurants de la microélectronique et de l'informatique. La réalisation des grands programmes aéronautiques et spatiaux, tels que Mirage IV, Concorde, Airbus, Ariane a également beaucoup concouru à la mutation des équipements. La nécessité de faire appel à un large éventail de disciplines scientifiques et à une gamme étendue de techniques nouvelles a obligé le secteur industriel à se restructurer. Les nombreuses petites entreprises qui ont proliféré à partir de 1945 se sont progressivement regroupées au sein de grands ensembles industriels, plus aptes à affronter la compétition au plan mondial et aussi plus à même de participer à d'efficaces coopérations internationales.

Décrire aussi fidèlement que possible cette évolution, à la fois des équipements et des "équipementiers", vers des systèmes et des "systémiers", telle était la mission que l'ingénieur général Émile Blanc nous a confiée. Pour la remplir avec succès, il convenait de rassembler des ingénieurs, militaires ou civils, qui ont personnellement contribué au renouveau de ce secteur qui constitue maintenant un pilier majeur de l'industrie aérospatiale française et européenne. Il fallait procéder à une double démarche : d'une part, rappeler l'évolution des différentes techniques qui furent à la base des multiples équipements initialement conçus séparément pour remplir des fonctions très distinctes, et, d'autre part, mettre en évidence les caractères communs qui se dégagèrent de plus en plus entre ces différents appareils.

C'est pourquoi le présent ouvrage comporte, après une synthèse qui dégage les points essentiels, d'une part, des annexes sectorielles A relatives aux instruments et aux disciplines de base, et, d'autre part, des annexes thématiques B et C qui décrivent les conséquences des contraintes qui se sont progressivement imposées à l'ensemble de ces matériels.

En outre, il était souhaitable de citer quelques personnalités, parmi celles qui ont joué un rôle essentiel, notamment dans l'immédiat après-guerre et d'évoquer les principales sociétés d'équipements qui furent à l'origine du renouveau de ce secteur industriel qui était à cette époque entièrement à reconstruire. Ce travail de mémoire fait l'objet de l'annexe D.

L'ensemble du rapport et de ses annexes a été rédigé par les membres du groupe Comaéro-Équipements, avec l'aide de nombreux autres anciens participants à cette grande aventure technique et industrielle. Leurs carrières ont été brièvement rappelées en fin d'ouvrage.

À tous, nous adressons nos très vifs remerciements pour leur éminente contribution sans laquelle nous n'aurions pu remplir cette mission. Tous, ils nous ont immédiatement apporté

leur concours, avec le même souci de rigueur et d'efficacité qu'ils avaient eu lors de leur contribution déterminante à l'évolution de l'industrie des équipements aérospatiaux.

Ainsi a pu être décrite et expliquée la considérable mutation du secteur des "Équipements", terme qui peut paraître désuet et réducteur à l'époque actuelle où l'on utilise davantage celui "d'Avionique", qui marque mieux le rôle central que les matériels et les logiciels correspondants jouent maintenant dans les grands systèmes aérospatiaux.

Nos remerciements vont naturellement aussi à l'ingénieur général Émile Blanc qui a bien voulu rédiger la préface de cet ouvrage. C'est en parfaite connaissance de cause qu'il a effectué cette rédaction, puisqu'il n'a cessé, au cours de sa brillante carrière, de contribuer puissamment à l'évolution de ce secteur de l'industrie aérospatiale française.

Enfin, nous exprimons toute notre gratitude à l'ingénieur général Jean-Pierre Moreau, chef du Département d'Histoire de l'Armement, à M. Patrice Bret, responsable scientifique de ce département, ainsi qu'à Françoise Perrot, dont les conseils nous ont été très précieux. Il faut également mentionner tout particulièrement le rôle essentiel d'Aurélie Outtrabady, Philippe Raschke et d'Élodie Croze pour la mise en forme et l'édition et de Jacques Borie pour les illustrations de cet ouvrage.

Jean CARPENTIER

INTRODUCTION

À l'origine, le domaine des équipements aéronautiques était très restreint. Les frères Wright ont effectué leurs vols historiques sans aucun instrument, et même sans cockpit !

Les avions de la Première Guerre mondiale n'étaient équipés que de quelques instruments : indicateurs de vitesse, d'altitude, compte-tours du moteur, jauge de carburant. Progressivement la planche de bord s'est remplie avec horizon gyroscopique, compas magnétique et gyroscope directionnel, indicateur de virage, indicateur de pression d'oxygène… À mesure que le domaine de vol des avions s'étendait en vitesses et altitudes, s'accroissaient les performances exigées des instruments de bord.

Les moyens de radionavigation aérienne développés au cours de la Deuxième Guerre mondiale et des décennies immédiatement postérieures amenèrent à installer de nouveaux instruments sur la planche de bord. Il en fut de même pour les radars de navigation et de suivi de terrain et les dispositifs de conduite de tir des avions de combat, ou encore des radars d'alerte météo et des dispositifs anticollision des avions de transport. En conséquence, le besoin en énergie électrique s'accrut considérablement (dans un facteur de l'ordre de 20).

Il en résulta une profusion d'appareils très variés, installés non seulement sur les planches de bord de plus en plus encombrées, mais aussi sur une partie sans cesse croissante des parois du cockpit.

En outre, l'extension du domaine de vol entraîna la nécessité d'une aide aux efforts humains de pilotage. Les dispositifs aérodynamiques, tels que les tabs et les volets compensateurs, avaient atteint leurs limites, de même que la mécanique qui ne suffisait plus pour agir sur les hypersustentateurs. Pour entraîner les gyroscopes, l'air déprimé qui était, avant-guerre, la seule source de puissance utilisée, ne convenait plus.

Ainsi apparut le besoin de sources de puissance, électrique, hydraulique, pneumatique, assorties de réseaux de distribution et de contrôle et destinées à des organes tels que servocommandes, vérins, moteurs, dégivreurs. La course à l'augmentation des puissances installées à bord fut lancée, avec le recours à des architectures redondantes pour la sécurité ; les indicateurs de surveillance et de conduite se multiplièrent. Les différentes formes de pilotage automatique tirèrent parti des évolutions qualitatives et quantitatives des sources de puissance disponibles à bord.

La définition, par "approche système", des équipements embarqués, amplifiée par l'application des techniques numériques à partir des années soixante, fut à l'origine d'une révolution qui aboutit, à terme, à des changements radicaux tels que :

- remplacement des instruments de bord, fonctionnant isolément, par les indicateurs d'informations élaborées par calculateurs, à partir de capteurs sensibles aux données de base : pression statique, pression dynamique, température, incidence, dérapage, accélération, etc. ;
- réalisation d'un système global de conduite du vol, avec dialogue entre l'équipage et l'avion par l'intermédiaire du calculateur de bord ;

– optimisation de l'exécution de la mission avec les possibilités offertes par les commandes de vol électriques (CDVE), le contrôle actif généralisé (CAG), prise en compte dès la conception de l'avion grâce, notamment, à la conception assistée par ordinateur (CAO).

Ceci permit d'optimiser l'ensemble du vol, tant du point de vue des performances que de celui de la sécurité et de celui du respect de l'environnement. Ainsi, partant de rien ou presque, naquit une discipline nouvelle, l'Avionique, désormais au cœur des techniques aérospatiales.

Le présent rapport a pour objet de retracer brièvement les principales étapes de cette évolution, en France, de 1945 à 1995, avec une indication des prolongements ultérieurs.

1. OBJECTIFS ET ÉTAPES

Plus encore que l'industrie des cellules et que celle des moteurs, l'industrie des équipements était, en 1945, entièrement à reconstruire. En effet, elle héritait d'une situation qui, avant 1939, ne donnait aux équipements que peu de place sur les avions. Or, pendant la Deuxième Guerre mondiale, des développements nouveaux s'étaient très vite imposés aux belligérants, comme, par exemple, l'extension aux avions monoplaces de l'aide au pilotage en visibilité réduite. En France, la période de l'Occupation avait bloqué toute innovation.

L'évolution des équipements dans la période qui a suivi a donc été marquée à la fois par un énorme défi pour sortir de cette situation et pour s'imposer face à la concurrence étrangère, ainsi que par la nécessité de s'adapter à des changements techniques et technologiques très importants. Ceux-ci ont contribué à augmenter considérablement le rôle des équipements dans l'ensemble des programmes, militaires et civils.

On est passé du stade d'instruments simples, de type mécanique ou électromécanique, à celui d'appareils de plus en plus complexes comprenant une grande part d'électronique, pour arriver enfin à des systèmes regroupant, de façon très intégrée, de nombreuses fonctions, grâce notamment à la généralisation des techniques numériques et aux performances des composants.

D'un autre point de vue, on est passé des premières tentatives de remplacement des équipements américains et anglais sur les avions en service (parfois d'ailleurs, contre l'avis des utilisateurs) à une recherche d'autonomie de plus en plus grande.

Il faut noter, à ce propos, qu'outre le grand désir qui régnait alors en France, à tous les niveaux, de reconquérir en aéronautique une place malheureusement perdue depuis des années, le contexte politique a joué un grand rôle. En effet, dans le cadre des programmes de la force de dissuasion, et notamment de ses différents vecteurs, qui bénéficiaient d'une priorité absolue, des efforts très importants ont été entrepris, de façon soutenue, dans de nombreux domaines. Ils se sont traduits par l'aboutissement de solutions nationales, dont la recherche était d'ailleurs souvent la seule réponse possible aux problèmes qui se posaient alors.

Cette politique de choix nationaux a connu, également, un autre moteur avec la prise de conscience, très tôt en France, de la nécessité de débouchés internationaux. La recherche de tels débouchés a pris des formes diverses, mais a constitué une caractéristique très importante dans les comportements des différents acteurs.

L'exportation des avions militaires en donne un bon exemple, dans la mesure où elle a conduit à disposer, pour satisfaire les clients, de l'ensemble des équipements nécessaires, notamment, dans certains cas, pour ne pas tomber sous le coup d'un embargo américain.

Cependant, le premier grand succès des avions civils de transport, Caravelle, n'a que peu contribué au réveil des équipementiers français. En effet, Caravelle avait emprunté au Comet britannique le nez et le cockpit avec tous ses équipements, et avait fait appel à un pilote automatique américain. Par contre, pour l'atterrissage tout temps, le développement et la mise au point du système automatique furent réalisés par Sud-Aviation, avec des moyens français.

Dans le domaine des avions civils, c'est le programme Concorde qui a poussé les sociétés impliquées, sur le plan technologique, industriel ou structurel, avec les exigences des compagnies aériennes qui demandaient un support mondial, à évoluer vers un débouché civil international. Cette évolution fut consacrée par la réussite sur les avions de la famille Airbus.

Ainsi retrouve-t-on, à travers toute cette période, l'expression d'un sursaut national qui a conduit, par le jeu des acteurs étatiques et industriels, unis par une volonté commune, à répondre le mieux possible aux besoins. Dès le début, les efforts se sont déployés sur toute la gamme des équipements ou presque. De nombreuses initiatives se sont manifestées, avec comme conséquence la création d'un grand nombre d'entreprises spécialisées, d'où une dispersion certaine. Cette situation, perçue par tous comme une faiblesse, n'a pu se résorber que très lentement, malgré diverses tentatives venues, soit de l'État, soit des industriels eux-mêmes. Heureusement les activités de synthèse, au niveau des grands systèmes, ont pu être prises en charge par des organismes appropriés et de taille suffisante, tandis que, de leur côté, la qualité et la continuité des équipes constituées dans le tissu industriel des équipements faisaient le reste.

2. LES PRINCIPAUX ACTEURS

2.1. Les utilisateurs

Les utilisateurs sont, dans le domaine militaire, les armées, représentées par leurs états-majors. Il y a une plus grande diversité dans le domaine civil : aviation de transport commerciale, aviation d'affaires, aviation légère, sécurité civile, espace.

Leur caractéristique commune est, d'une manière ou d'une autre, de définir les besoins essentiellement en termes opérationnels, et parfois de façon très poussée. De ce fait, leur rôle peut être très important par les orientations ainsi données aux programmes.

Les états-majors définissent le besoin opérationnel, d'abord en termes de programme d'ensemble, avion par exemple, ensuite éventuellement en termes d'équipements particuliers, surtout lorsqu'ils concernent directement la mission ou la sécurité. Bien entendu, leur rôle s'exerce dans leur domaine de responsabilité, tout au long de l'exécution du programme et de son exploitation. Chaque état-major a son organisation propre : dans le cas de l'armée de l'Air, une section du bureau des Programmes de matériels est en charge des équipements. Elle est, à ce titre, en relation étroite avec le service technique correspondant.

Les compagnies de transport aérien sont des utilisateurs, mais aussi des clients directs de l'industrie aéronautique. Lorsqu'un nouveau type d'avion est certifié, elles n'ont que peu de possibilités pour changer le choix d'un équipement. Cependant, si une d'elles prend la position de "compagnie de lancement", l'avionneur l'associe à la définition des systèmes et elle peut en influencer les choix, en assumant ainsi les avantages mais aussi les inconvénients de cette position.

En revanche, pour dialoguer avec les fournisseurs, avionneurs, motoristes et équipementiers, les compagnies ont mis en œuvre un ensemble d'organismes communautaires particulièrement efficaces qui ont été à l'origine d'un arsenal réglementaire ayant force de loi. Celui-ci permet de maintenir un niveau de concurrence élevé entre les fournisseurs, au moyen de normes et de standards très élaborés.

L'organisation la plus efficace au service de la normalisation est sans doute l'ARINC (Aeronautical Radio Incorporated) corporation dont les actionnaires principaux sont les compagnies aériennes des États-Unis, mais ouverte aux compagnies étrangères et aux avionneurs. ARINC édite des documents normatifs qui font autorité.

En Europe, EUROCAE (Organisation européenne pour l'équipement électronique de l'aviation civile) joue un rôle identique, en regroupant des représentants de l'industrie aéronautique et des services officiels (DGAC, STNA, DCAé).

Toutefois, la généralisation des techniques numériques et la tendance soutenue à l'intégration des fonctions et des produits limitèrent le champ d'application de la politique de normalisation des compagnies aériennes, ce qui réduisit la possibilité de choisir entre plusieurs fournisseurs.

2.2. Les services officiels

Par ce terme, il faut entendre les organismes qui ont la responsabilité de définir techniquement les équipements et d'en assurer la réalisation pour satisfaire les besoins des utilisateurs. Là aussi, il y a de grandes différences suivant les domaines.

Domaine militaire

Dans le domaine militaire, pour les aéronefs et leurs systèmes, ces organismes sont pour la plus grande partie de la période étudiée : d'une part, le Service technique aéronautique (STAé) associé au Service de la production aéronautique (SPAé), précédemment Service des marchés et de la production aéronautique (SMPA) et d'autre part, le Service technique des télécommunications de l'air (STTA).

À partir de 1980, technique et production ont été regroupées dans un seul service, le Service technique des télécommunications et des équipements aéronautiques (STTE).

À l'intérieur du STAé, la section Équipements rassemblait la plus grande partie des techniques concernées. Elle a donc joué un rôle très important. Son organisation, par branches techniques, reflétait la diversité des équipements et celle des industriels. Cette organisation s'est révélée efficace, tant pour la connaissance des problèmes spécifiques que pour la continuité des actions menées par l'État.

En effet, les relations étroites entre représentants de l'État et industriels directement concernés permettaient une très bonne compréhension mutuelle et la recherche des solutions les mieux appropriées dans chaque spécialité.

En revanche, lorsque se sont développées les notions de systèmes, l'organisation s'est révélée moins bien adaptée, comme d'ailleurs dans l'industrie elle-même, et la responsabilité des systèmes d'armes s'est déplacée vers les ingénieurs de marque et, plus tard, vers les directeurs de programme, qui ont eu logiquement la charge du système complet constitué de l'avion et de son système d'armes. Dans la plupart des cas, ils ont confié aux avionneurs, aidés par les équipementiers et les missiliers, la responsabilité de la conception, de la définition, de l'organisation et du suivi du développement du système, quelle que soit la classification en catégorie A, B ou C (***voir page 25)*** des matériels, avec en général, l'avionneur comme correspondant dans l'industrie.

Cette évolution, amplifiée par l'utilisation des techniques numériques, a été marquée, à partir du 1er janvier 1980, par le changement d'organisation des services de la DTCA, qui a conduit, d'une part à renforcer le rôle des directeurs de programme à l'intérieur du Service technique des programmes aéronautiques (STPA), alors que l'ensemble des équipements, aussi bien pour la technique que pour la production, relevait d'un seul service, le STTE.

Par leur rôle tout au long de l'étude et de la réalisation des matériels, les services ont pu exercer, en s'appuyant sur les travaux réalisés sous la conduite de l'avionneur, dans le cadre des contrats de développement des systèmes, une action souvent décisive sur le travail des industriels (établissement des spécifications techniques, suivi du développement et des fabrications, contrôle des performances, réception et aptitude à l'utilisation opérationnelle).

La rigueur apportée à l'exécution de ces différentes tâches et le sens élevé de leurs responsabilités sont à porter à l'actif des personnels concernés qui ont ainsi beaucoup contribué à l'obtention des progrès réalisés.

Un domaine où les services ont pu avoir une grande influence est celui de la normalisation, qui touche non seulement les matériels, mais aussi les liaisons entre équipements, la transmission des données, les langages informatiques, la documentation, etc. Cette influence a été, suivant les cas, plus ou moins favorable.

Dans le domaine militaire, le choix du Digibus de Dassault, société désignée comme seul fournisseur eut, d'abord, d'heureux résultats, car il était en avance sur les concurrents étrangers, mais les Américains élaborèrent la norme OTAN MIL 1553, qui, en France, remplaça ultérieurement le Digibus.

Dans le domaine de l'aviation civile, la normalisation des échanges de données se fit sous la spécification ARINC 429.

Le souci de faire aboutir des normes spécifiquement françaises a pu avoir momentanément un effet pénalisant dans un contexte international très marqué. Une telle politique a compliqué la tâche des concepteurs français d'équipements numériques et a permis aux concurrents américains, les premiers et les seuls au départ à avoir accès aux composants répondant aux normes MIL ou ARINC, d'accentuer leur position dominante dans le numérique.

La passation des marchés, aussi bien en études qu'en fabrication, a été un cadre essentiel pour l'action des services. C'est par l'exercice d'une continuité manifestée dans la plupart des domaines que les services ont pu aider à la promotion des techniques nouvelles et à la constitution d'équipes de grande qualité chez les industriels. Non seulement des orientations durables ont été données, mais aussi des possibilités d'entreprendre des travaux de préparation de l'avenir. À cet égard, le marché annuel d'études SFENA a sans doute permis de créer, très tôt, dès 1947, les conditions favorables à l'émergence, le moment venu, de solutions qui, sans cela, n'auraient pas pu voir le jour.

Pour les missiles et pour l'espace, les responsables étatiques étaient les services techniques de la Direction technique des engins (DTEn), créée en 1965, à partir du département Engins :

- le Service technique des engins balistiques (STEn), avec son bureau guidage-pilotage, soutenu par le laboratoire inertiel du LRBA ;
- le Service technique des engins tactiques (STET), qui fut constitué en 1970 et reprit les activités de la section Engins du STAé ;
- le groupe Espace-Satellites, du STEn, créé en 1977.

La DTEn a porté, en 1972, le nom de Direction des engins (DEn) et, en 1990, celui de Direction des missiles et de l'espace (DME).

En 1990, le STEn est devenu Service technique des systèmes stratégiques et spatiaux (ST3S) et le STET s'est appelé Service technique des systèmes de missiles tactiques (STMTS).

Domaine de l'aviation civile

Dans le domaine de l'aviation civile, bien que la situation soit évidemment très différente, comme on l'a déjà évoqué précédemment, le rôle des services s'est exercé dans de nombreux secteurs et ce, d'autant plus que les attributions héritées de l'ancien ministère de l'Air avaient conduit à ce que les compétences techniques demeurent rassemblées.

On a donc retrouvé l'action des mêmes services dans tous les aspects liés aux interventions de l'État dans les programmes, et particulièrement pour tout ce qui concerne la réglementation et la certification, en étroite liaison avec les services de la Direction générale de l'aviation civile. Plusieurs ingénieurs militaires de l'air, puis du corps des ingénieurs de l'armement, branche air, ont été détachés à la DGAC, pour la diriger ou pour en diriger les principales directions et services : DPAC (Direction des programmes aéronautiques civils), SFACT (Service de la formation aérienne et du contrôle technique).

La section Équipements du STAé a aussi été largement associée à la définition et à la validation de systèmes très importants (par ex. atterrissage automatique), aux études de préparation de l'avenir (sur crédits civils), ainsi qu'aux divers travaux visant à la promotion de nouveaux concepts (stabilité variable, visualisation tête haute, etc.).

Domaine spatial

Dans le domaine spatial, les instances de concertation entre la DGA (principalement, la DTEn) et le CNES ont permis une bonne concertation et une synergie des études, réalisations et essais, pour les besoins militaires et pour les besoins civils. C'est ainsi que le ministère de la Défense a contribué financièrement au développement du lanceur Ariane et de la plate-forme des satellites d'observation civils SPOT.

D'une façon générale, en ce qui concerne les études amont, la Direction des recherches et des moyens d'essais (DRME), créée au sein de la DMA en 1961, et devenue Direction des recherches, études et techniques (DRET) en 1977, joua un rôle très important en faisant participer les laboratoires universitaires à la résolution des points durs techniques, ainsi qu'à la préparation du futur.

2.3. Les organismes de recherche et d'essais

Recherche

De 1945 à 1965, le domaine des équipements n'a pas fait l'objet, sauf exception, d'une activité de recherche significative, la plupart des innovations portant plus sur les applications et la manière de réaliser une fonction spécifique avec des techniques et des technologies de plus en plus performantes. Mais ensuite, l'appel à la recherche fut plus pressant et de nombreuses branches firent l'objet de travaux scientifiques en amont, par exemple dans le domaine de l'optique (laser, optiques adaptatives…) ou du magnétisme (aimants, détection des anomalies magnétiques…) ou encore dans celui de l'électrotechnique.

À l'initiative de la DRME et de la DRET qui lui succéda, de nombreux laboratoires du CNRS, des universités et des organismes de recherche publics apportèrent une notable contribution, en amont des travaux des industriels.

Il faut souligner que l'ONERA mena d'importantes recherches sur les accéléromètres ultrasensibles, les oscillateurs de grande stabilité et sur les équipements de télémesure et de trajectographie des missiles expérimentaux. Cependant on peut regretter qu'il n'y ait pas eu, en France, pour les équipements, puis pour l'avionique, l'équivalent d'un centre de recherche du type de ceux qui existaient aux États-Unis, en particulier au MIT avec, notamment, le laboratoire du Dr C.S. Draper qui fut à l'origine de la navigation par inertie pour avions.

Essais

En revanche, le besoin en moyens d'essais a conduit très tôt à mettre sur pied des centres d'essais dotés d'installations appropriées, aussi bien au sol qu'en vol. Ceci était évidemment essentiel à tous les stades, depuis les investigations préliminaires, jusqu'à la mise au point et aux vérifications des performances.

Là aussi, les ingénieurs et techniciens des corps de l'État ont joué un rôle déterminant, dans le cadre des organismes officiels. À noter, en particulier, le rôle éminent du service Méthodes du CEV de Brétigny qui fut une pépinière de créateurs d'instruments de mesure

et d'enregistrement, notamment à la SFIM créée à l'initiative du CEV. Il faut aussi souligner le rôle des laboratoires du STAé, implantés dans la Cité de l'Air à Paris, où étaient essayés, dans les années cinquante, les équipements de bord, appareils électriques inclus.

À ces moyens s'ajoutaient ceux de la SOPEMEA qui étaient mis par l'État à la disposition des industriels pour le développement de leurs matériels. Les laboratoires du STAé furent ensuite transférés au CEV ou au CEAT. Ce fut le cas, notamment, du laboratoire inertiel qui fusionna ultérieurement avec celui du LRBA (Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques) de Vernon.

Dans le domaine spatial, les installations d'essais d'INTESPACE, filiale commune de la SOPEMEA et du CNES, et celles des industriels ont été très utilisées pour les équipements aérospatiaux, à finalité militaire aussi bien qu'à finalité civile ***(annexe B 6)***.

Un ouvrage spécial COMAÉRO devant être consacré aux centres d'essais, le sujet n'est pas développé davantage ici.

2.4. Les industriels

Comme on l'a déjà dit, l'industrie des équipements en France s'est longtemps caractérisée par une grande dispersion. Le paragraphe suivant traitera d'ailleurs de la restructuration du secteur tout au long de la période.

On notera seulement qu'au début la séparation était complète entre le secteur de l'électronique et celui des équipements, avec notamment l'existence de syndicats séparés. On notera également le rôle des maîtres d'œuvre. En raison, en partie, de la dispersion de l'industrie des équipements, ce sont eux qui ont été amenés à prendre la responsabilité des systèmes. Cette solution, tant pour les avions que pour les engins balistiques et l'espace, a d'ailleurs donné satisfaction.

L'énumération des matériels concernés ***(voir page 2)*** donne un premier aperçu de leur grande diversité, encore considérablement accentuée par la multiplicité des technologies mises en œuvre. En outre, les solutions techniques utilisées ont été en quasi-totalité renouvelées pendant la période considérée, l'électronique se combinant de plus en plus avec la mécanique au point de la supplanter dans bien des applications.

Le panorama de l'industrie des équipements a longtemps reflété cette grande dispersion. Les sociétés étaient nombreuses, souvent de petite taille, rarement fournisseurs uniques de l'industrie aérospatiale et contraintes, après la fin de la guerre, de lutter contre un penchant, souvent justifié, des utilisateurs et des avionneurs en faveur de solutions étrangères, anglaises ou américaines.

Les structures syndicales patronales montrent le manque d'unité du secteur, puisque coexistent deux organismes représentatifs, le SOREAS et le groupe Équipements du GIFAS. Il faut, en outre, noter que certains avionneurs abritent, dans leurs structures, des activités d'équipementier.

Enfin, contrairement à la situation patrimoniale des sociétés de cellules et de moteurs qui sont nationales à quelques exceptions près, l'État n'a que très peu de participations au capital des sociétés d'équipement. On peut, en outre, mentionner que les sociétés étrangères, anglaises ou américaines, sont peu présentes en France, à part Bendix, qui est dans le capital de DBA (Ducellier, Bendix, Air équipement).

3. LA RESTRUCTURATION INDUSTRIELLE

3.1. La période de défrichage

Juste après la guerre, le secteur des équipements est non pas à reconstituer, comme pour les moteurs et les cellules, mais à rebâtir très profondément. Des fonctions entières développées à l'occasion de missions de chasse ou de bombardement sont inconnues aussi bien des industriels que des services techniques étatiques.

Les équipementiers qui survivent à la guerre ont conservé les techniques anciennes, en particulier l'air sous dépression comme source d'énergie. Ainsi, la société l'Appareillage Aéronautique reprend la fabrication d'horizons artificiels à dépression, alors que l'horizon électrique HL 5 de Sperry est déjà en production de série et retenu pour les projets nouveaux. De même, l'adoption du système anglo-saxon de mesures en pieds et nœuds oblige les fabricants d'altimètres et d'anémomètres à revoir la présentation de leurs instruments. L'altimètre à trois aiguilles de Kollsman est la référence mondiale dans son domaine !

Un effort considérable de remise à niveau est lancé à travers de nombreux contrats d'étude financés par le budget et destinés à permettre aux industriels d'acquérir les connaissances issues de la guerre, de développer, par prise de licence au besoin, la maîtrise de production de nouveaux produits, de former les ingénieurs et les techniciens pour le futur.

La période est particulièrement féconde en créations d'entreprises, souvent à l'initiative des services officiels ou avec leur accord, surtout dans les domaines inconnus. Ainsi naissent Auxilec pour la fourniture et la distribution de l'énergie électrique à bord, la SFIM qui se consacre aux capteurs et enregistreurs, la SFENA, dont les études portent sur le pilotage automatique et les instruments de bord, Intertechnique, spécialiste de l'oxygène et des appareils de survie, la SEMCA, pionnier de la pressurisation et du conditionnement d'air.

Le mouvement créatif va jusqu'à faire naître des concurrents à des firmes établies : ERAM, en face de MESSIER, Microturbo alors qu'existent Turbomeca et SNECMA. Avec la décision de créer une force de frappe nucléaire se pose le problème de la précision du guidage des vecteurs, c'est-à-dire de la disposition de centrales inertielles performantes sans limitation d'emploi. En complément aux travaux d'étude et de recherche de licence américaine menés par les services et les industriels spécialistes de l'inertie pour navires, M. Jean Blancard, délégué pour le département Air, suscite la création d'une structure industrielle purement nationale, la SERNI, regroupant des équipes de la SACM, de SAGEM et de SFENA, dans une filiale commune. Création doublée d'une tentative de rapprochement, la SERNI n'aura qu'une courte existence et sera dissoute en 1961, après le choix de SAGEM comme seul fournisseur de centrale inertielle pour la force de frappe nucléaire française et aussi devant les difficultés de coopération des sociétés mères au sein de la SERNI.

3.2. Les premières tentatives de modification des structures industrielles

On a vu que l'État ne pouvait pratiquement pas intervenir par l'intermédiaire de ses participations au capital des sociétés d'équipement à une exception près, la SFENA, dont les principaux actionnaires étaient, depuis sa création en 1947, l'État pour 48 %,

Sud–Aviation pour 31,6 %, et Nord-Aviation pour 16,3 %. Une telle situation explique, du moins en partie, pourquoi cette société va se trouver au centre de tous les mouvements de restructuration du secteur.

L'annexe D énumère les principales étapes de cette restructuration qui s'accélèrera à partir de 1971 et aboutira à la création de SEXTANT Avionique en 1989.

Entre temps, après que de timides mouvements aient eu lieu dans le secteur des équipements (AMA a été absorbée par Jaeger, Badin par Crouzet), l'industrie aérospatiale a entrepris un vaste mouvement de concentration et de restructuration : la SEREB est créée, Sud et Nord-Aviation fusionnent en 1970 et donnent naissance à la SNIAS (Aérospatiale) qui inclut également la SEREB.

Le groupe de travail des équipements aérospatiaux, animé par la DPAI, indique, dans son rapport de décembre 1975 (voir Annexe B 7), que le secteur comprenait, en 1974, environ 60 entreprises, employant, au total, 20 000 personnes. Leur chiffre d'affaires global était de 2 200 MF. Les sociétés d'équipements, généralement de petite taille, étaient peu diversifiées. Le groupe de travail constatait des points forts, notamment pour les pilotes automatiques, les instruments de bord, l'appareillage électrique embarqué, mais aussi certains points faibles, auxquels il fallait remédier en rééquilibrant les crédits d'étude en faveur du secteur des équipements.

Il fallait aussi réduire la dispersion et promouvoir la compétence "systèmes".

Les pionniers de cette promotion des systèmes furent les avionneurs qui étaient les mieux placés pour connaître les besoins des utilisateurs et pour optimiser l'ensemble du système et qui, en outre, abritaient, dans leurs structures, des activités d'équipementier. Ainsi le département Équipement de Dassault étudia et fabriqua tous les éléments des commandes de vol électrohydrauliques de ses avions. De même, le Labo 35 à Sud-Aviation, puis à Aérospatiale, définit et élabora les calculateurs pour la conduite des Airbus.

D'autre part, les missiliers Nord-Aviation et MATRA furent les plus importants fabricants de gyroscopes pour leurs missiles antichars et air-air. En outre, SNECMA créa, en son sein, ELECMA, lorsque l'électronique supplanta la mécanique et l'hydraulique pour la régulation des turboréacteurs.

3.3. L'accélération des vingt dernières années

On ne peut valablement décrire l'évolution des vingt dernières années sans évoquer les causes extérieures et intérieures. Depuis les réorganisations de 1945, le marché le plus important du secteur venait des contrats passés par l'État, dont les services avaient réparti les équipements en trois catégories :

- catégorie A : développement et intégration sous la responsabilité de l'État, correspondant à l'armement opérationnel, munitions, canons, missiles, gérés par les entrepôts militaires ;
- catégorie B : développement sous la responsabilité de l'État, intégration par l'avionneur, correspondant à des équipements pouvant se retrouver sur diverses séries d'avions (appareils de planche de bord, radiocommunication, radiodétection) et qui étaient gérés par le SPAé ou le STTA, dans des marchés globaux, et redistribués par eux aux constructeurs et utilisateurs ;
- catégorie C : développement et intégration sous la responsabilité de l'avionneur, pour des équipements moins susceptibles d'être regroupés, dont l'approvisionnement était laissé au constructeur d'ensemble et compris dans ses marchés, comme le pilote automatique, les circuits de carburant, le conditionnement d'air.

Cette classification et une organisation des services techniques de l'État par produits (instruments de bord, oxygène, pressurisation, gyroscopes et capteurs inertiels, servo-commandes, électricité, pilotage, navigation…) ont favorisé le contact direct entre les techniciens et, par suite, la rapidité de l'évolution technologique de tout le secteur. Mais, en contrepartie, elles n'allaient pas dans le sens de la concentration des entreprises du secteur des équipements. Les crédits d'étude étaient attribués en fonction du produit, de ses performances intrinsèques, plus qu'en fonction de son emploi sur un avion ou hélicoptère donné.

Cette situation changea avec l'arrivée des systèmes

Dans le domaine militaire, c'est le programme Mirage IV, dont la maîtrise d'œuvre fut confiée à l'avionneur, qui marqua le début, en France, de l'approche "système" et qui permit d'expérimenter les méthodes et les moyens qui ont ensuite été améliorés et appliqués à tous les autres avions d'armes, développés tant pour les besoins français que pour l'exportation. Les conséquences sur les équipements eux-mêmes ont été très profondes. En effet, 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 qui doit être réalisé en vue de son organisation, tant au plan des performances qu'à ceux de la sécurité de fonctionnement et des coûts.

L'avionneur se vit, le plus souvent, confier, au titre d'un contrat de coordination, en association avec les principaux équipementiers et missiliers, la difficile tâche d'ensemblier. À ce titre, il fut chargé d'assurer la cohérence et l'optimisation du système. Il dut, pour cela, se doter de moyens de conception, de développement et de mise au point au niveau système et créer une compétence particulière au sein de ses services.

De leur côté, les équipementiers durent s'adapter à un nouveau type d'organisation, lié à l'intégration de plus en plus grande des systèmes, mais aussi développer, à leur propre initiative, de nouvelles capacités techniques et industrielles, pour être toujours compétitifs au meilleur niveau.

C'est finalement grâce aux efforts et à la volonté commune de l'ensemble des acteurs, armées, services de l'État, avionneur, équipementiers, que les solutions ont pu être trouvées dans l'intérêt général des programmes. Ainsi une profonde évolution a-t-elle pu avoir lieu, au fur et à mesure des programmes successifs. On peut, par exemple, apprécier le chemin parcouru depuis les premiers Mirage jusqu'au Mirage 2000 et surtout jusqu'au Rafale.

Dans cette évolution, le poids des équipements dans les programmes s'est accru d'une façon considérable, depuis la période où deux grands programmes, le Mirage IV et le Concorde, avaient mis en évidence l'importance qu'allaient prendre les équipements dans l'aéronautique militaire et civile.

L'évolution des équipements vers les systèmes est décrite dans l'annexe C.

4. L'EFFET DES PROGRAMMES MIRAGE IV ET CONCORDE

4.1. Le programme Mirage IV, premier d'une lignée de systèmes d'armes

Vecteur de l'arme atomique, le Mirage IV imposait, politiquement, financièrement et techniquement, que sa conception et sa mise en œuvre soit totalement libres de toute limitation étrangère. Pour la première fois, les équipementiers français purent bénéficier de crédits d'étude et de développement d'un montant en harmonie avec la priorité politique de l'ensemble du programme. Ainsi, au début des années soixante, lorsque les premiers Mirage IV sortent en série, ils sont, à quelques exceptions près (pompes hydrauliques), dotés d'équipement français (instruments de bord, pilote automatique, génération électrique, conditionnement d'air…), sans oublier les commandes électriques de vol fournies par le département Équipement de Dassault.

Le Système de navigation bombardement (SNB) du Mirage IV fut le premier cas de l'approche système sur un avion français, en faisant intervenir, de manière intégrée, de nombreux éléments dont, seule, la performance globale était fixée. Une très large maîtrise d'œuvre fut accordée à l'avionneur et, pour le SNB, au département Électronique de Dassault qui devint ensuite Électronique Marcel Dassault et joua un grand rôle dans le domaine des autodirecteurs électromagnétiques et des radars aéroportés, des calculateurs numériques et des logiciels associés.

L'architecture et la technologie du SNB étaient, pour l'époque, très remarquables : le calculateur central jouait le rôle d'un véritable organe de distribution et d'échange des informations, telles que celles émanant du radar Doppler de navigation, de la centrale de cap et de verticale, de la centrale aérodynamique – équipements qui avaient dû être importés du Royaume-Uni pour des raisons de délais – et celles du radar d'observation du sol, de l'hyposcope et de la sonde radio-altimétrique haute altitude – qui avaient été développés en France.

La gestion du programme, destiné à la première composante de la Force nucléaire stratégique (FNS), bénéficia de moyens très importants fournis par les services officiels, pour les essais et la mise au point, en particulier, de nombreux avions de servitude au CEV. Grâce à ces moyens et à la grande rigueur exigée par les services officiels, le maître d'œuvre et les équipementiers tinrent les délais très courts (la recette du système complet eut lieu début 1964), avec des spécifications très contraignantes.

Le SNB du Mirage IV marqua une étape majeure dans l'essor de l'industrie française des équipements aéronautiques, même si plusieurs équipements essentiels étaient encore de provenance étrangère.

Depuis le programme Mirage IV qui a ouvert la voie, les "équipes systèmes" de l'industrie aéronautique française (avionneurs et équipementiers) ont produit plus de 4 000 systèmes, dans plus d'une centaine de versions différentes, pour satisfaire à la fois les besoins français et ceux de l'exportation. Ceci n'a été possible que grâce à la mise en place d'organisations spécialisées dans la conception et le développement des systèmes. Rien que chez Dassault, 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.

Après le Mirage IV, la formule retenue par les services officiels n'a plus été la maîtrise d'œuvre, mais ce qu'on a appelé "coordination", devenue plus tard "coordination générale". 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. Cette formule, basée sur des méthodes et moyens sans cesse perfectionnés, a permis, en définitive, d'obtenir d'excellents résultats et de faire face à la complexité croissante des systèmes (matériels et logiciels).

La maîtrise des techniques numériques a conduit à des progrès considérables chez tous les industriels concernés. Le premier système numérique centralisé a été réalisé sur Mirage 2000, en plusieurs versions mettant en œuvre, dans les années quatre-vingt, de très nombreuses innovations.

Puis, avec le programme Rafale, dans les années quatre-vingt-dix, on a abouti à un système d'armes d'une exceptionnelle polyvalence, capable de remplacer, à lui seul, plusieurs types d'avions différents, pour les missions de l'armée de l'Air et de l'aéronautique navale.

Les résultats obtenus témoignent, à travers le programme Rafale, de la valeur des méthodes de conception et de développement des équipements et des systèmes, ainsi que de la qualité des équipes qui se sont ainsi constituées dans les services et dans l'industrie.

4.2. Le programme Concorde

On pourrait penser que le programme Concorde dont le lancement se situe fin 1962, à la signature du protocole franco-britannique, reprendrait, en majorité, des équipements du Mirage IV. La réalité est tout autre et permet de mesurer les limites de la dualité civil-militaire ; les solutions et expériences militaires n'avaient à l'époque, que peu de chance de migrer vers des projets civils.

Nombreuses et essentielles étaient les différences :
- deux avionneurs maîtres d'œuvre différents (Sud-Aviation et British Aerospace pour Concorde, Dassault pour le Mirage IV) ;
- des normalisations qui s'ignoraient : ARINC pour le civil, nationales pour le militaire ;
- des concepts opérationnels étrangers l'un à l'autre (par exemple, pour l'approche, utilisation de l'ILS avec responsabilité du bord pour le civil, alors que les militaires utilisaient le radar GCA, avec autorité du sol) ;
- des compagnies aériennes réticentes à changer leurs relations avec des fournisseurs américains ou britanniques bien connus.

Toutes ces différences conduisaient à des approches système, des conceptions et des produits très différenciés.

Il convient de rendre hommage aux services officiels qui, tirant partie du fait que le développement du programme Concorde était financé sur des crédits budgétaires, ont estimé que le secteur des équipements devait recevoir une contribution à la mesure de leur importance croissante dans la percée technologique et commerciale d'avions nouveaux.

Mais le programme Concorde a eu une importance considérable dans un autre domaine, nouveau et très important, celui de la coopération avec des équipementiers étrangers. Tout naturellement, du fait de la double tutelle, anglaise et française, les sociétés d'équipements des deux pays furent amenées à partager les tâches de conception et de production, et ces contacts seront à la base de rapprochements ou de projets communs transmanche, pour le futur.

Mise à hauteur technologique, apprentissage de la coopération, confrontation avec le monde de l'aviation commerciale et ses exigences pour l'après-vente, la gestion des rechanges, les délais de livraison et de réparation, sans oublier le poids des normes et procédures de qualification toutes sous influence des organisations américaines, autant de contraintes qui firent que le programme Concorde conduisit les équipementiers impliqués à entreprendre un effort considérable d'adaptation dont les fruits se retrouveront, en partie et au prix d'investissements supplémentaires, dans l'équipement des avions de la famille Airbus.

5. LES CONSÉQUENCES DES PROGRAMMES DE MISSILES BALISTIQUES

Les deux autres composantes de la Force nucléaire stratégique (FNS) étaient à base de missiles balistiques, pour lesquels il fallait réaliser, avec des moyens purement français, des centrales de guidage inertiel de grande précision. Il fallait aussi réaliser des centrales de navigation inertielle de haute qualité pour les sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE).

À partir de 1958, la volonté gouvernementale, soutenue au plus haut niveau de l'État, s'exprima rapidement par la constitution d'organismes étatiques (département, puis Direction des engins, DTEn) et industriels (SEREB, Société d'études et de réalisations d'engins balistiques), par la création du Centre d'essais des Landes (CEL) et par l'attribution de crédits importants. De ce fait, la SEREB joua le rôle de maître d'œuvre et de systémier, les solutions techniques furent très vite élaborées.

Sur propositions de la SEREB, pour les missiles, et du Service technique des constructions navales, pour les sous-marins, la SAGEM fut retenue par le ministre, M. Pierre Messmer, à la fois pour le guidage des missiles et pour la navigation des SNLE. Cette décision créa les conditions d'une complète cohérence dans l'effort industriel que SAGEM assuma, avec succès, dans un domaine où les États-Unis avaient prédit l'échec de la France.

Maître d'œuvre des systèmes d'armes, la SEREB prit aussi la responsabilité directe des logiciels de dialogue et d'alignement entre la centrale du SNLE et les centrales des missiles.

En parallèle, à plus long terme, la DTEn confia à la Société Alsacienne de Constructions Mécaniques des études de composants inertiels faisant appel à des concepts nouveaux ou à des technologies plus avancées.

Le contrôle technique par les services étatiques fut confié aux équipes du LRBA qui avaient compétence dans le domaine du guidage, grâce à leur expérience acquise avec les fusées à ergols liquides qui aboutirent au programme Diamant. Ces équipes furent renforcées par celles du Centre d'essais en vol de Brétigny, très compétentes pour les essais de composants inertiels (gyroscopes et accéléromètres) pour avions. Le LRBA créa des moyens d'essais uniques en France pour mesurer, au sol et avec le niveau de précision suffisant, les performances qui devaient être atteintes en opérations.

Les programmes Missiles et Espace ont été très contributeurs de crédits pour les études, développements et réalisations d'équipements. Les composants inertiels et les calculateurs électroniques embarqués, fiables et miniaturisés, ont été parmi les axes essentiels.

Il faut souligner que, alors que pour les avions, les crédits cellules et les crédits moteurs dominaient largement ceux destinés aux équipements, les programmes des missiles sol-sol balistiques stratégiques (SSBS) et des missiles mer-sol balistiques stratégiques (MSBS) donnèrent un rôle de premier plan aux systèmes de guidage inertiel. Ceci permit de leur attribuer immédiatement les crédits nécessaires, au-delà des lourdeurs financières habituelles. Il en résulta non seulement un remarquable succès technique, industriel et opérationnel, mais aussi le respect des délais très stricts qui étaient imposés par les programmes, d'où une économie notable pour la nation.

6. LES RELATIONS INTERNATIONALES

Comme pour l'ensemble du domaine de l'aéronautique et de l'espace, les relations internationales pour les équipements sont de natures diverses, selon qu'il s'agit du commerce avec l'étranger (importations et exportations) ou de la coopération internationale et, notamment, de la coopération européenne.

6.1. Les importations d'équipements et le renouveau technique et industriel

Immédiatement après la guerre 1939-1945, les achats d'équipements à l'étranger se sont imposés. Ces importations ont été effectuées directement par les utilisateurs et les réparateurs pour la maintenance d'avions étrangers, ou par les constructeurs aéronautiques pour la fabrication de nouveaux avions français.

Les importations indirectes d'équipements ont été générées par les importations d'avions ou d'hélicoptères dans lesquels ils étaient intégrés. En très grande majorité, elles concernaient des matériels provenant des États-Unis. Cette suprématie américaine découlait de l'équipement des compagnies aériennes françaises en avions de transport Douglas, Lockheed, Boeing. Elle ne fut que légèrement entamée par l'arrivée de Caravelle, Mercure, Concorde, avant la montée en puissance des Airbus sur le marché international. De même, les achats d'avions militaires à l'étranger dans l'immédiat après-guerre ont entraîné, ipso facto, des importations d'équipements.

En parallèle avec les premiers "achats sur étagère" d'avions de combat américains, le ministère de l'Air suscita des prises de licence de fabrications d'avions britanniques, tels que le Vampire Mk 5, qui fut suivi du Mistral et de l'Aquilon. La SNCASE produisit ainsi plus de 500 chasseurs à réaction, de conception britannique. Cette fabrication d'avions sous licence apporta aux équipementiers français la possibilité de développer leurs propres capacités pour concevoir de nouveaux instruments pour le pilotage et le contrôle moteur.

Dès le lancement des programmes français d'avions de combat à réaction, tels que l'Ouragan, l'industrie des équipements apporta une notable contribution. Ainsi, les instruments anémométriques furent fournis par l'Appareillage aéronautique (Badin), la centrale gyro-magnétique par Bézu, le contrôle moteur par AMA et Faure Herman, les inhalateurs par SFIM ou Intertechnique. La génération électrique, les circuits de carburant et d'oxygène, la pressurisation cabine, les viseurs et d'autres instruments furent conçus et réalisés par Labinal, Dinin, Aviac, Le Bozec, Bronzavia, Superflexit, SEMCA, Derveaux, Vinot.

Un horizon électrique SFENA fut utilisé dès le SMB 2. Cependant, sur les avions de liaison et de transport, les gyroscopes restèrent, jusque vers 1955, alimentés par air déprimé, comme avant 1939.

À partir des séries de Mirage, l'approvisionnement d'équipements étrangers pour les avions de combat français ne s'est plus imposé, à l'exception d'éventuelles obligations d'achats dans le cadre de programmes de coopération internationale.

Ce remarquable renouveau technique et industriel fut dû à d'éminentes personnalités parmi les constructeurs. Il faut citer, notamment pour les horizons gyroscopiques, Robert Alkan et

son équipe de la SFENA, et pour les compas gyromagnétiques, Maurice Bézu. D'excellents spécialistes allemands apportèrent leur expérience et leur savoir-faire acquis, pendant la Deuxième Guerre mondiale, dans des firmes telles que Siemens, Patin, Askania.

En outre, les cessions de licences dans le cadre des programmes d'aide au développement et à la production permirent à l'industrie française des équipements de rattraper rapidement son retard de 1945.

Cependant, l'autonomie d'approvisionnement et la compétitivité retrouvées n'exclurent pas quelques achats "sur étagère". Ce fut le cas, notamment, lors de la commande des avions ravitailleurs Boeing KC 135, des avions de combat embarqués Crusader dans les années soixante, des avions de transport C 130, des avions de détection lointaine Boeing AWACS et Grumman Hawkeye (dans les années quatre-vingt-dix).

6.2. Les exportations d'équipements

L'histoire de l'aéronautique française de 1945 à 1985 publiée par le GIFAS illustre, par quelques exemples, les succès obtenus à l'exportation par les équipementiers français. Il faut rappeler que dès 1966, Boeing décida d'équiper tous les B 707, et, par la suite, tous ses avions 727, 737, 747, 757, 767 d'horizons de secours SFENA. Douglas, Lockheed et Airbus en firent de même pour leurs avions. Les horizons de secours SFENA, produits également sous licence aux États-Unis et en Allemagne, constituent un remarquable succès technique et économique, dû au génie mécanique des ingénieurs et techniciens de la SFENA, dans le prolongement des équipes animées par Robert Alkan.

La liste d'équipements d'avionique français ayant remporté une grande réussite à l'exportation s'étend très largement aux servocommandes (AMD, Air Équipement), aux pilotes automatiques pour avions et hélicoptères (SFENA, SFIM), aux centrales de navigation et de guidage (Sextant, SAGEM), aux dispositifs de visualisation (Thomson-CSF, Sextant, SAGEM), aux systèmes de génération électrique (Auxilec) et hydraulique et aux ensembles de conditionnement d'air (ABG-SEMCA, Intertechnique).

Les restructurations industrielles qui sont intervenues dans les années quatre-vingt, avec la création de Sextant Avionique, à partir de SFENA, Crouzet Aviation, et des apports d'Aérospatiale et de Thomson-CSF, ou encore l'entrée d'Auxilec au sein de Thomson-CSF, ont eu des conséquences très favorables pour l'exportation. En 1998, la création de Thomson-CSF Detexis à partir de Dassault Électronique, de Thomson-CSF Radars et Contre-Mesures et de Thomson-CSF Missile Electronics et l'absorption de Sextant donnèrent naissance au n° 1 européen pour la détection électronique aéroportée et pour l'électronique de missiles. Après absorption de la société britannique RACAL, le groupe Thomson-CSF devint Thales, qui est un des leaders mondiaux en électronique professionnelle, en aéronautique, défense, technologies de l'information et services.

De son côté, en 1998, le groupe SAGEM absorba la SAT qui apportait sa compétence en optronique infrarouge, il devenait ainsi le n° 3 européen en électronique de défense. Après l'acquisition de la SFIM en 1999, le groupe SAGEM prit la première place en Europe pour les systèmes optroniques.

Sextant et SAGEM, mettant en œuvre les technologies les plus récentes, ont acquis des positions remarquables au plan mondial. C'est ainsi que Sextant a vendu des équipements

de pilotage et de navigation par inertie pour de nombreux avions, hélicoptères et missiles étrangers et que SAGEM est devenue le premier constructeur européen (et le troisième mondial) de systèmes inertiels.

Comme pour l'ensemble des matériels aéronautiques, l'avionique française ne pouvait se passer du soutien financier de l'État.

Pour la préparation de l'avenir et l'adaptation aux besoins futurs, les contrats des services Techniques (STAé et STTA) étaient essentiels. Les services chargés de la production aéronautique de la DTI prenaient le relais pour l'équipement des matériels destinés à l'armée de l'Air. En outre, la possibilité d'introduire, dans ces contrats, une marge à un taux fixé par le ministère de la Défense, permettait le financement partiel d'"études libres" conduites par les industriels. Enfin, la procédure dite "de l'article 90" accorde des avances remboursables de manière échelonnée en fonction des ventes (en moyenne, de l'ordre de 60 % du coût des développements) pour les matériels spécifiquement destinés à l'exportation. Ces aides ont joué un rôle important jusque vers 1990, leur montant a ensuite décru sensiblement.

En moyenne, sur la période 1963-1999, le chiffre d'affaires annuel d'exportations directes de la branche équipements du GIFAS a été de 4,9 MdF 1995. À ce montant, il faut ajouter 6 MdF 1995, pour les exportations indirectes (via les avionneurs ou les motoristes). Le chiffre d'affaires total pour l'exportation a été, en moyenne annuelle sur cette période, de l'ordre de 50 % du chiffre d'affaires global, qui était voisin de 20 milliards de francs.

Pendant cette période, la branche équipements a bénéficié de 16 % des crédits que l'État a attribués au secteur aérospatial. Son chiffre d'affaires consolidé, réalisé directement pour l'État, était, en moyenne annuelle, de 4,6 MdF 1995.

Les effectifs de la branche équipements du GIFAS étaient évalués, en 1999, à 21 500 personnes. En moyenne, sur la période 1956-1999, ces effectifs ont représenté 25 % de l'ensemble des effectifs de l'industrie aérospatiale française.

6.3. La coopération internationale

L'annexe B1 décrit les différentes formes de coopération internationale dans le secteur aérospatial, elles peuvent être classées en quatre catégories :

- les compensations industrielles obtenues par l'État lors des négociations pour des importations de matériels aéronautiques importants ;
- la coopération commerciale entre un constructeur étranger désirant pénétrer le marché français et un industriel local. Cette procédure comprend souvent les étapes de représentation commerciale, de fourniture et de service après-vente, puis de production locale sous licence ;
- la coopération industrielle, qui associe le maître d'œuvre et des coopérants industriels pour l'ensemble d'un programme, avec partage des financements et des risques ;
- la coopération de maîtrise d'œuvre, qui caractérise tous les grands programmes internationaux et implique fortement les États, maîtres d'ouvrage de ces programmes.

Chaque grand programme militaire en coopération est établi dans le cadre d'un accord intergouvernemental qui formule les objectifs et les besoins des forces armées de chaque pays participant et qui précise les règles de partage du financement et du travail dans les différentes phases : développement, industrialisation, production.

Le principe de juste partage des droits et des devoirs ("juste retour") peut avoir des conséquences, bénéfiques ou néfastes, pour les industriels associés aux programmes en sous-traitants du maître d'œuvre, tels que les équipementiers, selon qu'ils sont ou non retenus dans la définition finale du système. Cependant, globalement, leur participation aux grands programmes aéronautiques, militaires ou civils, leur a été bénéfique. Elle leur a permis de se hisser au meilleur niveau technique et de remporter, ensuite, de brillants succès à l'exportation.

Les coopérations binationales ont été très fructueuses

La coopération franco-britannique

La coopération franco-britannique, très active dans les années soixante sur les avions Concorde et Jaguar, les hélicoptères Puma, Gazelle, Lynx, les missiles Martel, s'est ralentie ensuite pour connaître une nouvelle embellie vers la fin des années quatre-vingt.

Le lancement du programme Concorde fut déclenché par l'accord gouvernemental franco-britannique du 29 novembre 1962. Sa mise au point, sous la conduite d'André Turcat, directeur des essais en vol, permit son entrée en service en 1976.

Sur le plan technique, Concorde fut une brillante réussite des équipes française et britannique. Concorde marqua aussi la percée de techniques nouvelles pour l'aérodynamique et la propulsion, mais aussi pour l'avionique, avec l'utilisation, pour la première fois au monde sur un avion de transport civil, de commandes de vol électriques, avec secours mécanique. Le programme Concorde a permis aux équipes de Sud-Aviation de se hisser au tout premier plan dans le domaine technique pour l'aviation de transport et d'aborder, dans les meilleures conditions, le programme Airbus.

La coopération franco-allemande

Au départ, il ne s'est agi que de l'activité d'ingénieurs et de techniciens allemands arrivés en France en 1945. La SFENA, la SFIM et la SAGEM, notamment, bénéficièrent de leur apport technique. Il en fut de même pour le LRBA et pour l'Arsenal de l'Aéronautique (devenu ensuite partie de SFECMAS, puis de Nord-Aviation).

Au cours des années cinquante, le retour de la république fédérale d'Allemagne (RFA) dans l'activité aéronautique mondiale permit d'instaurer une coopération avec les industriels allemands et, notamment, les nouveaux équipementiers tels que Bodenseewerke et BGT.

Cette coopération franco-allemande s'amplifia dans le cadre des programmes d'avions Transall et Alphajet, de missiles tactiques antichars et air-sol, et, plus récemment, de l'hélicoptère de combat Tigre et de l'hélicoptère de transport et de lutte anti-sous-marine NH 90.

Mais ce sont incontestablement les grands programmes multinationaux qui, dans le domaine aérospatial, eurent le plus d'importance pour la construction de l'Europe

➲ Le Breguet Atlantic (étudié, réalisé et utilisé par la France, l'Allemagne, les Pays-Bas et l'Italie) dans les années soixante, brillamment conduit par René Bloch, fut un remarquable succès auquel de nombreux équipementiers français apportèrent leur contribution.

➲ Le programme Airbus, à partir des années soixante-dix, dont la conception technique doit beaucoup à Roger Béteille, est devenu la figure de proue de l'aéronautique européenne.

Dans la famille Airbus, les innovations en avionique se succédèrent : commandes de vol électriques, pilotage numérique, tableau de bord cathodique, etc. L'excellence des choix des objectifs commerciaux et celle des solutions techniques démontrèrent la qualité de l'industrie aéronautique européenne dans le domaine du transport aérien. Elle marqua aussi "l'adoubement" des équipementiers promus au rang plus noble de "responsables de l'Avionique".

➲ Le programme Ariane, auquel ont puissamment contribué les équipementiers français, en liaison étroite avec Aérospatiale et Arianespace. Citons, notamment, le système de guidage inertiel à gyrolasers de Sextant-Avionique qui assure la précision de la mise en orbite des satellites géostationnaires.

6.4. Bienfaits et méfaits des programmes en coopération internationale

Tout programme multinational conduit les États qui apportent une contribution financière au projet, sous une forme ou sous une autre, à souhaiter que leur industrie participe à sa réalisation. Les dispositions retenues entre les États sont très variées :

- principe du juste retour pour les programmes spatiaux ;
- partage a priori 50/50 entre partenaires de deux États pour une partie prédéterminée d'un programme (équipements de base communs de l'hélicoptère franco-allemand Tigre) ;
- accès aux avances remboursables pour certains projets financés sur des crédits DGAC, comme les premières versions des Airbus ;

plus rarement, financement d'un équipement particulier au stade étude et qui sera fabriqué en coopération.

Ce qui demeure une constante, c'est la mise en concurrence au niveau international pour le choix des équipements par le maître d'œuvre avionneur ou missilier. Parmi les programmes en coopération, si le projet Concorde a permis une mise à hauteur technique de presque tout le secteur équipements, c'est le développement de la famille Airbus qui a définitivement conduit, pour ne pas dire forcé, au grand virage vers les utilisateurs civils et à l'extension du périmètre de la coopération à l'Allemagne.

Le début de la décennie 1970 marque ce virage, période qui voit la création d'organismes communautaires, tel le GIE SAVE (1973), à l'initiative de la SFENA en vue de répondre à l'exigence des compagnies aériennes d'être livrées en rechanges AOG (aircraft on ground) dans un délai de 24 heures, 7 jours sur 7, et 365 jours par an. Dix ans plus tard, le GIE comptait près de vingt membres.

À cette époque coïncidaient trois programmes d'avions civils très différents à tous points de vue : Concorde, encore au stade de la définition, Mercure, moyen courrier apogée du désir de Marcel Dassault de pénétrer le marché de l'aviation civile, et Airbus, seulement sur le papier. L'attitude des sociétés d'équipement américaines, évidemment concurrentes, vaut d'être mentionnée.

Pour Concorde dont, en majorité, les options provenaient de compagnies aériennes des États-Unis, l'avionneur a exigé la participation de sociétés américaines. C'est ainsi que la société Bendix a été, au stade étude, imposée au consortium européen formé par Elliott, chef

de file, et SFENA. La même société Bendix fut imposée à Crouzet pour le développement des centrales anémométriques, au stade prototype.

En fait, les sociétés d'équipement américaines étaient intéressées par le financement français de la phase développement, mais ne souhaitaient pas paraître trop engagées dans Concorde, alors que Boeing continuait son propre projet.

Mercure, en revanche, était considéré comme devant avoir un très brillant avenir et plusieurs sociétés américaines acceptaient d'autofinancer sur fonds propres leurs coûts de développement.

Enfin, l'ensemble aéronautique américain, ne comprenant rien à cette structure bizarre de GIE, n'accordait que peu d'intérêt à l'Airbus A 300 en projet. Ce tableau des opinions américaines lors du choix des équipements pour l'A 300 a été un facteur favorable à l'industrie française des équipements.

Mais l'Airbus a ouvert une phase de coopération qui s'est révélée riche d'avenir avec de nombreuses sociétés d'outre-Rhin dont les liens avec des sociétés américaines ne constituaient pas un avantage.

7. CARACTÈRES SPÉCIFIQUES, ÉVOLUTION ET PERSPECTIVES

La grande dispersion qui a longtemps caractérisé l'industrie des équipements aéronautiques n'était certes pas particulière à la France, mais elle a été spécialement ressentie dans l'immédiat après-guerre.

L'énorme effort qu'il fallut entreprendre, de 1945 à 1950, pour reconstruire l'aéronautique française fut principalement centré sur l'industrie des cellules et sur celle des moteurs. Les instruments de bord et les autres équipements des avions étaient conçus et fabriqués par des très petites entreprises, dont certaines venaient d'être créées par des ingénieurs dynamiques, plus aptes à concevoir des appareils mécaniques ou électromécaniques nouveaux qu'à développer et à gérer une firme industrielle apte à s'implanter sur un marché ouvert à une concurrence étrangère.

Celle-ci se trouvait d'ailleurs en position de supériorité, car elle bénéficiait de l'intense effort de production réalisé pendant la guerre 1939-1945. Comme il a été rappelé plus haut, le choix des instruments de bord et des autres équipements aéronautiques incombait, de fait, aux avionneurs, en accord avec les services officiels. En outre, la totale séparation entre le secteur des équipements et le secteur de l'électronique – séparation qui résultait du fait de la nature même des équipements, essentiellement mécaniques, pneumatiques, hydrauliques, électromécaniques – se reflétait au stade des structures syndicales patronales qui étaient distinctes.

Enfin, lorsqu'il s'est agi de faire face à l'absence d'équipements pour assurer des fonctions nouvelles, les avionneurs ont eu recours à des importations directes ou ont suscité des fabrications sous licence. La naissance de la société Intertechnique est due à la volonté de Marcel Dassault de pallier le manque d'inhalateurs et de régulateurs d'oxygène fiables pour les pilotes d'avions Ouragan. De même, la naissance au sein des avionneurs de départements Équipements fut la conséquence de l'absence de sociétés d'équipements suffisamment puissantes.

Avec le recul et même si à l'époque cela n'avait pas été pleinement perçu par les principaux acteurs et décideurs, 1955-1960 fut une période charnière. Avec la transistorisation, l'électronique devenait fiable et pouvait remplacer avantageusement la mécanique dans de nombreux équipements. Ce fut aussi le début de la conception numérique, avec l'étude de calculateurs digitaux embarqués, ou encore le lancement des premières études françaises sur la navigation par inertie.

Cette évolution s'accéléra dès le début des années soixante grâce à la miniaturisation apportée par les circuits intégrés, d'abord analogiques puis numériques. En 1970, l'industrie française des équipements aéronautiques pouvait aborder, avec succès, une période de restructuration, indispensable pour la gestion des grands programmes tels que le Mirage IV et le Concorde. Cette restructuration s'est poursuivie au cours des années quatre-vingt-dix pour aboutir à la situation actuelle où quelques grands groupes tels que Thales et SAGEM, s'appuyant sur une compétence technique pluridisciplinaire et sur une vaste production duale civile-militaire, peuvent anticiper sur les besoins du marché mondial. Ces grands groupes sont ainsi devenus des "systémiers", aptes à concevoir avec le maître d'œuvre, le

système de conduite du véhicule, avion, hélicoptère, missile ou lanceur. L'annexe C décrit l'évolution des équipements vers les systèmes.

Certes, la constitution de grands groupes industriels à vocation internationale est une tendance commune à tous les secteurs industriels. Mais elle correspond aussi, pour le secteur de l'avionique, à une impérieuse nécessité, liée à la multiplicité des disciplines scientifiques et des techniques mises en œuvre. À cet égard, l'exemple des senseurs inertiels est significatif. Alors que les premiers gyroscopes de navigation par inertie étaient à rotor classique, les gyrolasers se sont très largement développés pour les applications de grande précision, tandis que les microgyromètres vibrants sont bien adaptés aux utilisations n'exigeant que faible ou moyenne précision. De nouvelles percées, en provenance de laboratoires sur le front avancé des connaissances scientifiques, sont envisageables : les gyromètres à ondes de matière pourraient apporter à la mesure de l'orientation angulaire une révolution analogue à celle que les horloges atomiques ont apportée à la mesure du temps.

Ainsi les créateurs de l'avionique du XXIe siècle seront-ils très différents des pionniers des équipements aéronautiques du XXe siècle.

Cependant, ils devront faire preuve du même souci de créativité que les Alkan, Badin, Bézu, Chombard, de Crémiers, etc., qui ont conçu des instruments de bord et des équipements qui se sont imposés mondialement, tels que :

- les horizons gyroscopiques SFENA et les pilotes automatiques SFENA et SFIM qui ont une renommée internationale ;
- les dispositifs d'atterrissage automatique tout temps (avec radioaltimètre TRT) pour Caravelle certifiés, dès 1965 en catégorie III A, puis pour Concorde et Airbus, en catégorie III B ;
- les centrales de navigation et de guidage par inertie SAGEM et SFENA ;
- les appareils de photographie aérienne, avec compensation du filé de l'image, objectifs à mise au point automatique, films à émulsion multispectrale, qui ont permis à l'armée de l'Air française de remporter de brillants succès dans les compétitions de reconnaissance Royal Flush organisées par l'OTAN : les sociétés OMERA, KINOPTIC, MATRA-SFOM, SOPELEM, CERCO ont été particulièrement actives dans ce domaine ;
- les simulateurs d'entraînement de Thales (ex LMT) qui ont pris une part importante du marché mondial de l'aviation civile, sans oublier les réalisations de SOGITEC, filiale de Dassault-Aviation, en particulier dans les systèmes de visualisation.

CONCLUSION

Décrire, même succinctement, l'histoire des instruments de bord et des équipements aéronautiques dans la période 1945-1995, c'est accomplir un devoir de mémoire envers les acteurs de cette renaissance indispensable aux ailes françaises, acteurs parmi lesquels se sont trouvés étroitement associés les bureaux d'études des constructeurs et les services officiels (STAé, STTA, CEV). Mais c'est aussi souligner que l'évolution des techniques de ce qui constitue maintenant l'avionique procède à la fois par continuité et par mutations.

La continuité est indispensable pour bénéficier de l'expérience acquise par des équipes attentives à l'amélioration des performances et de la fiabilité des matériels, mécaniques, électromécaniques, hydrauliques, électroniques. La continuité exige du temps, de la patience et de la confiance envers les équipes de conception.

Mais ces mêmes qualités sont nécessaires pour préparer les mutations. Celle du passage au numérique a été amorcée pour les calculateurs aéroportés, dès 1955 au stade préliminaire, mais il a fallu quinze ans pour parvenir au stade des essais en vol d'un pilote automatique numérique. C'est donc aussi un effort de longue haleine qui a permis cette mutation avec le succès mondial de l'Airbus A 320, où est réalisée l'intégration numérique complète du pilotage et des instruments de conduite du vol.

Un autre enseignement de l'historique des équipements aéronautiques est que la voie du progrès est pavée de succès incontestables, mais aussi de demi-succès, voire d'échecs. Ceux-ci ne doivent pas être passés sous silence ni être oubliés. Ils font partie de l'expérience dont il faut tirer les conséquences en les replaçant dans un contexte futur.

Citons, par exemple, les études de pilotes automatiques auto-adaptatifs entreprises dès 1961 par la SFENA. L'objectif était de réaliser un appareil apte à piloter un avion dans tout son domaine de vol, sans qu'il soit nécessaire de faire appel à des capteurs de données aérodynamiques, solution révolutionnaire, sans doute trop pour l'époque, mais néanmoins porteuse d'avenir.

L'étude historique conduit aussi à une autre constatation : elle concerne le transfert d'une technique à différents types de véhicules. C'est ainsi qu'il s'est produit une véritable filiation des équipements, de l'aéronautique à l'espace, qui est décrite en annexe B 3. À titre d'exemple, les compétences des industriels français en photographie aérienne ont été très précieuses pour l'observation spatiale par satellites. D'autre part, Ariane doit sa réputation mondiale, en ce qui concerne la précision de l'injection en orbite, à la qualité des gyroscopes lasers Sextant qui assurent le guidage du lanceur. Cette précision est très appréciée des constructeurs et utilisateurs de satellites géostationnaires, en raison des économies ainsi obtenues pour les manœuvres de correction de mise à poste, ce qui allonge la durée de vie opérationnelle des satellites.

Ainsi, une grande variété de disciplines et de techniques est au bénéfice d'un large éventail d'applications depuis l'avion de transport, l'avion de combat, l'hélicoptère, le missile tactique, l'engin balistique, le satellite, le vaisseau spatial, sans oublier la famille des drones et microdrones.

Variété des disciplines, extension du domaine d'emploi, mais aussi optimisation du dialogue avec l'utilisateur, telles sont les caractéristiques essentielles des équipements. Depuis plusieurs décennies, ils ont quitté leur rang de matériels secondaires pour progressivement devenir le cerveau de tous les grands systèmes aérospatiaux.

En prenant pleinement en compte ces caractéristiques et cette évolution, l'industrie française des équipements aéronautiques, puis des équipements aérospatiaux, a su se hisser brillamment au tout premier plan mondial.

ANNEXES A

ANNEXES SECTORIELLES

A1 : LES INSTRUMENTS DE PLANCHE DE BORD
A2 : LES COMMANDES DE VOL
A3 : LE PILOTAGE AUTOMATIQUE
A4 : LES SIMULATEURS DE VOL
A5 : LA NAVIGATION AUTONOME. DE L'ESTIME À L'INERTIE
A6 : ÉQUIPEMENTS DE GUIDAGE-PILOTAGE POUR MISSILES BALISTIQUES ET STRATÉGIQUES
A7 : GUIDAGE-PILOTAGE DES MISSILES TACTIQUES
A8 : OBSERVATION AÉRIENNE ET OBSERVATION SPATIALE
A9 : SÉCURITÉ-SAUVETAGE-OXYGÈNE
A10 : GÉNÉRATION ET DISTRIBUTION D'ÉLÉCTRICITÉ

ANNEXE A 1

LES INSTRUMENTS DE PLANCHE DE BORD

Dans tout véhicule, la planche de bord regroupe la présentation, principalement visuelle, des informations nécessaires à la conduite à court terme, le pilotage, et à long terme, la navigation. Sans remonter aux frères Wright, installés à l'air libre dans le treillis du fuselage, il faut reconnaître que, pendant les trente premières années de l'aviation, la planche de bord était peu garnie.

En fait, durant toute cette période, les pilotes trouvaient leurs informations dans l'environnement extérieur à l'avion. Les cockpits étaient ouverts à l'air libre et la vue directe de l'extérieur permettait une appréciation convenable, par bonne visibilité, des assiettes de la machine, des mouvements de montée, de descente et des virages, pour la conduite à court terme. De même, la vue directe du sol était le meilleur moyen de recaler la navigation, quitte à descendre assez bas pour lire le nom de la gare de chemin de fer survolée !

Mais, à partir des années trente, les tableaux de bord ont été garnis d'instruments de plus en plus nombreux et complexes permettant, en particulier le vol de nuit et par mauvaise visibilité, jusqu'à autoriser, vers les années cinquante, l'atterrissage par mauvaises conditions météorologiques.

La présente annexe se propose de rappeler l'évolution des instruments de planche de bord des avions avant et depuis la guerre de 1940 jusqu'à l'apparition de ce que l'on a dénommé le glass cockpit, avec l'intrusion du tube cathodique dans les postes de pilotage, aussi bien militaires que civils.

1. LA TRANSITION DES INSTRUMENTS : DU VOL A VUE AU VOL SANS VISIBILITÉ (1930-1940)

Même en vol à vue, la conduite et la surveillance du ou des moteurs ont toujours constitué un besoin de transmission d'informations classiques : nombre de tours, pression et température d'huile… Les instruments de mesure correspondants, souvent issus des applications de l'automobile, ont été les premiers à trouver place sur les planches de bord. Le carburant utilisable conditionne le déroulement du vol : les jauges étaient au départ visibles depuis le poste de pilotage et fixées sur le ou les réservoirs.

Un compas miniature, dont le détecteur magnétique circulaire et gradué en rose des caps flottait sur du liquide, a constitué longtemps l'instrument principal de navigation.

Les premiers "plus lourds que l'air" décollaient, volaient en croisière et se posaient à des vitesses qui n'étaient pas très différentes, la puissance des moteurs étant juste suffisante pour ces phases de vol. Toutefois, il apparut vite que les accidents en approche et à l'atterrissage dus au décrochage aérodynamique imposaient de mesurer la vitesse par rapport à l'air.

La mesure de la vitesse air, grandeur conditionnant la sécurité du vol, n'apparut obligatoire en France qu'en 1911 avec, toujours visible à l'extérieur, l'indicateur Etévé formé d'une plaque mobile autour d'un axe vertical. Soumise à la pression dynamique de l'air, cette plaque équilibrée par un ressort antagoniste tourne d'un angle qui peut être gradué en vitesse.

Il revint à Raoul Badin, à la même époque, de réaliser le premier indicateur de vitesse de planche de bord par mesure directe de la pression dynamique de l'air grâce à un tube de Venturi relié par un mince tube à un manomètre différentiel placé dans un indicateur devant le pilote. Ce tube de Venturi a ensuite été remplacé par une "antenne" recueillant la pression totale et statique, réchauffée par une résistance électrique pour éviter le givrage, dont l'utilisation s'impose toujours.

Si les techniques de réalisation ont évolué depuis cette époque, le principe de la mesure est encore valide, et le "badin" est devenu un nom commun désignant aussi bien l'instrument que la vitesse indiquée qu'il mesure. D'autre part, Raoul Badin exploita la variation de pression statique avec l'altitude pour réaliser un deuxième instrument de planche de bord indiquant la vitesse verticale de l'avion, le variomètre. Une mesure d'altitude, souvent donnée par un barographe enregistreur, surtout pour les records nombreux à cette époque, et une montre complétaient la panoplie des informations présentées au pilote sur la planche de bord avant l'apparition d'indications issues des propriétés du gyroscope. Seul, le vol à vue était possible.

Étudiées pour la première fois par Léon Foucault en 1852, les propriétés du gyroscope furent exploitées tout d'abord sous forme de gyrocompas destinés à la marine de guerre. Anschutz en Allemagne et les frères Sperry aux États-Unis furent les pionniers dans ces domaines.

En aviation, ce sont les indications d'assiette, de cap ainsi que la vitesse de virage qui proviennent de la mesure des effets gyroscopiques. Dès 1911, la société Sperry Gyroscope réalise un horizon artificiel pour usage aéronautique, qui sera produit à partir de 1920.

En France, en 1923, Raoul Badin, qui vient de créer la Société l'Appareillage Aéronautique, compose le premier directeur de vol à être installé sur planche de bord sous forme d'un tableau regroupant un badin, un variomètre, et dans un même boîtier, une bille (sorte de niveau transversal donnant la verticale apparente et permettant d'éviter glissade et dérapage), et un indicateur de virage figurant la vitesse de changement de cap de l'avion proportionnelle au déplacement angulaire d'une aiguille ("la bille et l'aiguille" dans le jargon des pilotes) : un premier pas important était franchi vers le pilotage sans visibilité.

Mais l'horizon artificiel, qui donne l'attitude de l'avion, démontre son utilité en permettant à James H. Doolittle d'effectuer avec succès un tour de piste sous capote en 1929 grâce à un instrument Sperry. Ainsi se définit, juste avant la Seconde Guerre mondiale, la planche de bord du PSV, pilotage sans visibilité, encore en vigueur aujourd'hui dans la nature des informations transmises, même si les figurations ont beaucoup évolué. Elle est constituée des instruments suivants :

- au centre : un horizon artificiel, au-dessus du gyrocompas conservateur de cap ;
- sur les côtés : un altimètre, au-dessus d'un variomètre et un badin, au-dessus de l'ensemble bille et indicateur de virage.

En 1934, Raoul Badin conçut une planche de bord standardisée, rassemblant outre les instruments de PSV ceux de navigation, au total treize appareils. Le panneau tout entier pouvait se fixer à l'avion par suspension élastique évitant les effets des vibrations et des chocs. Malgré les avantages de cette solution, elle n'eut que peu de succès, les avionneurs voulant rester libres de définir la planche de bord qui commençait à se remplir.

Si les fonctionnalités des instruments de PSV vont rester pratiquement inchangées pendant la Seconde Guerre mondiale, leur conception, les technologies mises en œuvre, les sources d'énergie, les figurations enfin seront nouvelles.

2. LES INSTRUMENTS APRÈS LA SECONDE GUERRE MONDIALE (1945-1960)

La planche de bord de 1945 pour le PSV donne toujours les mêmes informations, mais avec des appareils d'une technologie nouvelle. Elle s'est généralisée à tous types d'avions, y compris aux chasseurs monoplaces. Toutefois les problèmes liés aux vols à des vitesses proches de celle du son, puis aux vitesses supersoniques, conduisent à ajouter le machmètre sur la planche de bord et à modifier la sonde de pression, dite "sonde Chaffois", du nom de l'aérodynamicien du CEV qui l'a expérimentée. La guerre et les soucis de sécurité ont mis en évidence la nécessité de revoir la conception de plusieurs instruments.

La mesure du paramètre à afficher s'effectuait encore le plus souvent dans chacun des instruments placés côte à côte sur la planche de bord. Il fallait donc amener, dans le cockpit, de l'huile moteur, de l'eau de refroidissement, sinon du carburant. Les risques de fuites et de ruptures accidentelles ou par projectiles étaient accrus, et rendaient le véhicule plus vulnérable.

La technologie utilisée était exclusivement mécanique et la présentation était faite sous forme de cadran dont les graduations donnaient la valeur mesurée du paramètre. Les faibles déplacements des capteurs mécaniques (tubes de Bourdon, capsules barométriques…) nécessitaient de multiples amplifications angulaires pour donner une indication lisible. L'analogie avec l'industrie horlogère explique sans doute que la société Jaeger a été un des premiers fournisseurs.

Pour l'indication du cap, une étape importante est franchie avec la combinaison d'une sonde magnétique surveillant et recalant le gyroscope directionnel. Il ne s'agit pas là d'un compas gyroscopique détectant la rotation de la Terre , comme pour la Marine, mais d'un gyroscope directionnel recalé suffisamment lentement par une surveillance à partir d'un détecteur magnétique qui peut être placé dans un endroit de la cellule moins perturbé que le cockpit. Une centrale "gyromagnétique" de ce type, conçue par Maurice Bézu, a été montée sur Noratlas au début des années cinquante.

Le besoin d'isoler la mesure du paramètre de l'indicateur de planche de bord ou d'effectuer la mesure à distance de l'orientation d'une sonde magnétique ne pouvait être satisfait qu'en adoptant les technologies de télétransmission offertes par l'électricité qui, surtout en courant alternatif à 400 hertz, n'était pas installée avant la guerre (l'air déprimé était pratiquement la seule source d'énergie utilisée pour l'entraînement des gyroscopes).

L'emploi grandissant de la radio et du radar pendant la guerre exigeait également des sources d'énergie électrique importantes.

C'est pendant la guerre que l'électricité a remplacé l'air déprimé comme source d'énergie, et que se sont développés les instruments à transmetteurs.

En matière de figuration, la suprématie anglo-saxonne de l'époque imposa les mesures en pieds et nœuds, alors que les instruments fabriqués en France étaient gradués en mètres et km/heure. Ceci entraîna, pour l'altitude, une augmentation de la chaîne d'amplification entre le capteur et l'indicateur et une plus grande précision de l'information. L'altimètre de précision, type Kollsmann à trois aiguilles, s'est imposé pour les atterrissages par mauvaise visibilité.

C'est donc à une profonde restructuration non seulement de moyens de production, mais aussi de conception et développement que fut alors confrontée l'industrie des instruments de bord en France. Le rôle des services officiels dans cette restructuration a été important.

L'action des services officiels

Elle était conduite par le STAé, de la DTI de l'époque, qui veillait à l'existence d'une gamme complète de matériels disponibles pour emploi sur tous les types d'appareils connus, ou envisageables, au choix des utilisateurs en fonction des missions prévues ou confiées.

Du fait des moyens budgétaires limités à l'époque, il n'y avait pas de programme d'instruments dans le sens actuel, car les nouveaux avions étaient lancés pour obtenir spécifiquement certaines performances déterminées, le reste devant se réaliser "au mieux". On n'analysait pas le détail de l'emploi des matériels, faisant confiance aux utilisateurs pour s'adapter aux différentes missions demandées, conformément à ce qu'ils avaient bien réussi jusque là. À cette époque, d'ailleurs, les avions de combat étaient pratiquement limités aux chasseurs de jour. Ils n'étaient complétés dans l'industrie que par des avions de transport classiques (Languedoc, SO 30, puis Nord 2500, Breguet 763), des avions de formation et d'initiation, et des avions légers.

La DTI veillait au maintien et au développement de la gamme des matériels d'équipement en favorisant la circulation générale des idées, notamment entre ses personnels, particulièrement ses ingénieurs navigants, les opérationnels et les industriels pour tenir compte des domaines et conditions de vols envisagés. Sur les instruments employés par les avions militaires, un effort particulier était fait pour éviter les importations qui étaient encore nécessaires pour certains dépannages.

Pour chaque appareil proposé, il était demandé à l'industriel le dépôt d'un dossier de définition, permettant d'assurer le contrôle en production, puis l'exécution d'une série d'essais, dans un laboratoire de la DTI puis en vol, conduisant en cas de réussite à une homologation. Une gamme d'instruments homologués était proposée de façon très ouverte aux utilisateurs pour remplir les missions qu'ils envisageaient. Parallèlement, les services officiels établirent une normalisation portant sur la dimension des cadrans (avec une unité anglo-saxonne : le pouce, nécessité d'interchangeabilité oblige !), leur fixation, les figurations, l'éclairage, soit par luminescence soit par phosphorescence, et l'alimentation des boîtiers. L'ICETA Chombard et son adjoint M. Meyrat, à la section Équipements du STAé, eurent, dans ce domaine, une action décisive.

Par contre, ces procédures de qualification par les services français n'étaient pas appliquées aux matériels importés bénéficiant d'une approbation équivalente d'un service allié. Leur adoption technique pour un rôle défini sur un appareil national relevait directement des utilisateurs. Leur entretien, et éventuellement leur construction sous licence, se faisaient en respectant les consignes et procédures de l'autorité approbatrice.

Au sein de la DTI intervenait la section Équipements du STAé avec, notamment, ses sous-sections Pilotage et Navigation et son laboratoire d'essais au sol, alors implanté dans la Cité de l'Air.

Chaque sous-section était très proche des industriels correspondant à leur spécialité, suivant un découpage stable. Ceci a permis des progrès sûrs, mais a entraîné un certain cloisonnement, qui ne favorisait pas la réalisation de centrales distribuant les valeurs mesurées à d'autres utilisateurs tels que l'armement, les radars, les essais en vol. Tous ceux-ci ont dû s'adresser ailleurs, souvent hors de France, pour satisfaire leurs besoins.

Les industriels

Les sociétés existant avant 1940

- L'Appareillage aéronautique (Badin), pour les appareils du circuit anémométrique, et les gyroscopes entraînés par dépression ;
- Jaeger, pour les altimètres ;
- Faure-Hermann, pour les jaugeurs ;
- Air-Équipement, largement tourné vers l'électricité, mais très lié à Bendix, américain ;
- Bronzavia, maîtrisant son atelier, mais dont le bureau d'études était trop limité ;
- Vion ;
- AMA ;
- ABG (instruments construits par la Bougie BG) ;
- Alkan, pour les équipements d'armement ;
- Ulmer, pour l'oxygène.

Il y a lieu d'y ajouter Sperry, américain, très implanté en Angleterre, et bien représenté en France.

Les nouvelles sociétés

On l'a vu, la période de la guerre avait profondément modifié la conception et la production des instruments de planche de bord. L'expérience a montré que la modernisation de l'industrie s'est faite par la création et l'action de nouvelles sociétés, plutôt que par évolution de sociétés d'avant-guerre.

Les sociétés suivantes, créées entre 1945 et 1960, ont été, avec la contribution des services officiels, à l'origine de la reconquête du marché des instruments de planche de bord par l'industrie française :

- la SFENA, en 1947, autour d'un noyau formé par Robert Alkan et ses anciens collaborateurs, donne naissance, grâce aux travaux de P.A Chombard, à une famille d'horizons artificiels qui équiperont pendant plus de cinquante ans avions civils, militaires et hélicoptères dans le monde et seront construits sous licence aux États-Unis, en Allemagne, en Inde, etc ;
- la SFIM, qui est fondée également en 1947, avec le soutien du Centre d'essais en vol pour l'étude et la réalisation d'instruments d'essais, choisit, ensuite, de produire sous licence Sperry, les horizons électriques HL 5 qui équiperont tous les avions de chasse français de l'époque. En outre, la SFIM industrialise le compas gyromagnétique conçu par Maurice Bézu.
- Crouzet, à Valence, reprend les études de totalisateurs d'estime mécaniques effectuées avant guerre chez Lip (encore une référence horlogère), avec figuration sur plateau de

route et développe des anémomètres issus des études de capsules pour centrales, avec indicateur de bord asservi.
– Intertechnique, fondée en 1951, commence par fabriquer sous licence les équipements de jaugeage de carburant, puis acquiert une place majeure sur Concorde, programme où le nombre de réservoirs et le transfert de kérosène en vol posent des problèmes difficiles.

NOTA : Jaeger est une des seules sociétés à demeurer après 1945 dans le domaine des instruments de bord (anémomètres, compte-tours, manomètres, etc.).

3. LES SYNTHÉTISEURS, L'APOGÉE DES INSTRUMENTS ÉLECTROMÉCANIQUES (1960-1980)

Le recours aux aides radio pour la navigation et l'atterrissage (radio-compas, VOR, DME, ILS) charge la planche de bord d'indicateurs et de postes de commande dont l'utilisation demande à l'équipage de consulter de nombreux cadrans isolés dont la lecture doit être interprétée pour la conduite du vol. La situation des avions civils et militaires est identique. Enfin, les avions à réaction et à forte flèche se retrouvent normalement voler à assiette importante, plus de 12 ° de cabré par exemple. Un simple horizon type HL 5 devient difficile à utiliser (le Comet en est cependant encore équipé et la Caravelle va importer son cockpit !). Les horizons développés par P.A. Chombard évitent cette difficulté, la figuration de l'horizon n'étant pas une simple barre, mais un "tonneau" mobile selon un axe horizontal et gradué en angles d'assiette.

Besoins fonctionnels, encombrement de la planche de bord, développement de capteurs et de la télétransmission avec asservissement concourent à l'apparition d'instruments comportant, toujours mécaniquement réalisées dans un même boîtier, des figurations intégrant des informations de pilotage ou de navigation : roulis, tangage et cap, ou cap, route et relèvement de radio-compas. L'utilisation de centrales gyroscopiques, puis de centrales inertielles, donnent à ces instruments une capacité toutes attitudes.

Les réalisations pour avions civils et militaires vont temporairement diverger, conséquence de doctrines d'emploi différentes : approche GCA avec guidage par le sol, l'opérateur radar donnant au pilote des indications de cap et de vitesse verticale à tenir, pour les avions militaires, emploi de l'ILS avec responsabilité de l'équipage, pour les avions civils.

Les avions militaires vont privilégier l'usage de la "boule", parfois dite Chombard, du nom d'un de ses inventeurs, qui combine les informations d'attitude sur ses méridiens gradués en angles d'assiette longitudinale et de cap sur l'équateur. Ces instruments équiperont le Mirage IV et la série des Mirage jusqu'au Mirage 2000, et seront produits par la SFENA et la SFIM. Ils intégreront également les indications dites "bille et aiguille".

L'aviation civile opte pour le maintien de deux instruments principaux dédiés, l'un aux informations de pilotage, l'autre aux informations de navigation dénommés en anglais : ADI, pour Attitude Direction Indicator, et HSI, pour Horizontal Situation Indicator. L'ADI, en haut et au centre, reprend toutes les informations de la fonction horizon artificiel toutes attitudes, de la bille et de l'aiguille et y ajoute les informations issues de l'ILS, soit brutes

sous forme d'écart par rapport à l'axe de descente, soit sous forme de consigne de pilotage "au zéro" permettant de suivre une trajectoire optimale calculée. Le HSI adopte la figuration d'une rose graduée en cap, magnétique ou vrai, et indique les relèvements radiocompas, les informations du VOR-DME, et répète les écarts ILS.

La généralisation de ce type d'instruments principaux qui deviennent inutilisables en cas de panne électrique à bord, circonstance sinon fréquente, du moins à prendre en compte pour la sécurité des vols, va entraîner une réglementation très stricte d'emploi d'une planche "secours". Badin et altimètre reliés directement aux prises de pression demeurent donc en secours. L'horizon électrique pose le problème de la véracité de ses informations sans courant électrique. L'érecteur électrique de Sperry cesse de fonctionner et le gyroscope précessionne rapidement. Les particularités bien brevetées des horizons SFENA issues des études de R. Alkan, reprises et perfectionnées par P.A Chombard, vont ouvrir un marché mondial aux familles d'instruments de 2 ou 3 pouces utilisés en secours.

En effet, le système d'érection des horizons SFENA, entraîné mécaniquement par le rotor du gyroscope, reste efficace et donne des indications encore valides pendant plus de 10 minutes après perte totale de l'alimentation en électricité. Ce délai permet soit de réactiver les procédures de sauvegarde pour les avions civils, soit de quitter la zone de vol aux instruments pour les avions militaires. De nombreux témoignages de vies sauvées ont pu être recueillis.

4. L'ARRIVÉE DES TUBES CATHODIQUES (1980-1995)

Après un colloque tenu à Istres en 1972 à l'initiative des services officiels, et malgré certaines réticences du personnel navigant du fait de la présence de courant très haute tension derrière la planche de bord, il est apparu que l'ère des figurations mécaniques, chères à l'achat et à l'entretien, touchait à sa fin.

Un programme d'étude confié à Thomson-CSF, le projet PERSEPOLIS (Programme d'Étude et de Réalisation d'un Système Électronique pour la Lecture d'Informations Synthétiques) va conduire à proposer un tube cathodique particulier, dit à pénétration et balayage cavalier permettant de tracer des figurations très proches, par la qualité du trait, de la vision donnée par les instruments électromécaniques.Toutefois, l'incapacité de ces tubes à colorer le ciel en bleu et des considérations de coût ont conduit à l'adoption en série de tubes type télévision à balayage (*shadow-mask*, en anglais).

Les premières applications civiles apparaissent quasi simultanément sur les Airbus A 310 et sur les Boeing 757 et 767. Sur l'A 310, les EFIS (*Electronic Flight Instrument System*) sont constitués de six écrans couleur contrôlés par trois calculateurs et leurs postes de commande associés, montés sur la planche de bord. Ils fournissent les informations basiques de pilotage et de navigation pour le pilote et le copilote, 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 pouces x 5 pouces.

On attribue parfois à l'emploi des tubes cathodiques la cause justifiant l'équipage à deux. En fait, c'est le concept de logique de surveillance de l'état des systèmes par indicateurs au plafond du cockpit : "tout éteint, tout correct" qui a été le facteur principal. En effet, le premier Airbus à être certifié avec équipage à deux a été un A 300 destiné à la compagnie indonésienne Garuda dont les instruments de planche de bord étaient encore électromécaniques.

Sur avions d'armes, l'avènement des tubes cathodiques a surtout permis d'améliorer considérablement l'information du pilote sur l'état des systèmes de l'avion et sur l'emploi opérationnel de l'armement. Les informations de pilotage sont de plus en plus transmises dans le viseur tête haute, donnant ainsi aux pilotes de chasse actuels des impressions personnelles voisines de celles de leurs grands anciens de la Première Guerre mondiale, le vent aérodynamique en moins !

Parallèlement à cette évolution de technologie, le panorama des industriels a été bouleversé en fin de période. Toutes les sociétés citées en première partie 1945-1960 ont disparu en tant qu'entreprises, la plupart de leurs activités et compétences étant regroupées au sein de Sextant, puis de Thales.

5. LES COLLIMATEURS DE PILOTAGE

Les collimateurs de pilotage présentent l'intérêt de fournir au pilote un certain nombre de paramètres de pilotage, tout en lui permettant de garder la vue sur l'extérieur et, en particulier, la vue de la piste lors des phases d'approche et d'atterrissage.

Ces avantages des collimateurs de pilotage ont conduit les services officiels, en liaison avec les utilisateurs, notamment avec les compagnies aériennes, à réaliser un certain nombre d'expérimentations, à partir des années 1965-1970, sur des avions de servitude du CEV ou sur des appareils d'Air France et d'Air Inter, pour évaluer leur intérêt sur avions de transport.

Les premiers collimateurs (CSF types 190/193), qui étaient dérivés directement des collimateurs de tir CSF, furent ainsi expérimentés, de janvier à juillet 1965, au CEV de Brétigny sur la Caravelle 02, avec une présentation des paramètres de vol classiques : horizon, vitesse, altitude, écarts ILS, etc., dans le but d'abaisser les minimums de plafond et de visibilité pour l'atterrissage par mauvais temps. De tels collimateurs furent installés, en série, sur l'avion civil Mercure (une quinzaine d'exemplaires en 1972).

Après ces expérimentations, toujours dans le but d'améliorer les conditions de pilotage dans les phases d'approche et d'atterrissage, d'autres paramètres tels que le vecteur vitesse et la variation d'"énergie totale" (voir Nota) furent introduits. Ces paramètres devaient permettre une meilleure précision dans l'approche, par un véritable pilotage de la trajectoire, et améliorer la sécurité, notamment en cas de panne moteur, par le contrôle du bilan énergétique de l'avion. Sur initiative d'un ingénieur de la DCAé, Gilbert Klopfstein, de tels collimateurs furent installés et essayés sur des Mirage III et Nord 262 du CEV.

Les collimateurs électromécaniques CSF type 93 des années 1970-1973 furent ensuite remplacés par des collimateurs à tube cathodique du type CSF TC 121, avec présentation synthétique de la piste. Ces matériels firent l'objet de nombreuses démonstrations au CEV

et à l'étranger. Les nombreux pilotes, français et étrangers, en particulier américains, qui les essayèrent apprécièrent vivement leurs qualités d'utilisation.

Ce type de matériel (collimateur de pilotage avec informations spécifiques) ne donna cependant lieu qu'à des applications limitées. Citons, en particulier, leur installation sur l'avion de transport américain C 17 et sur les avions Rafale de la Marine, pour faciliter l'appontage.

Par contre, les collimateurs de pilotage présentant les paramètres de vol classiques en "visualisation tête haute" ou head up display ont vu leur utilisation se développer très largement sur les avions civils comme sur les avions militaires.

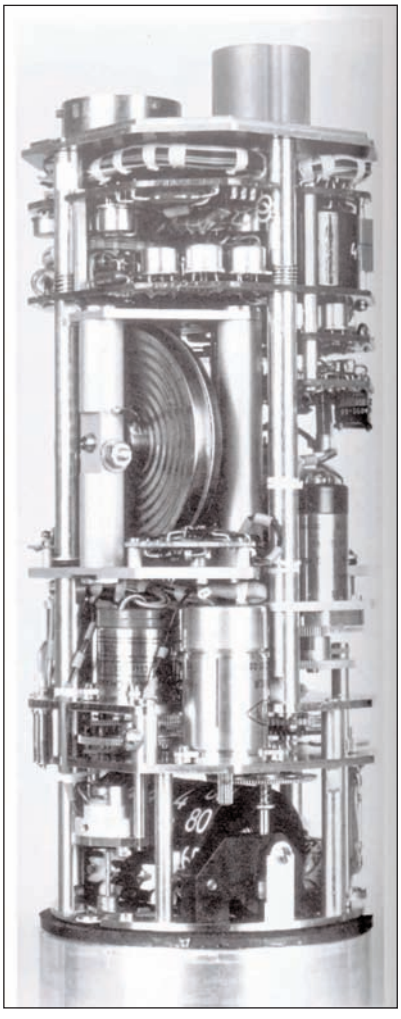
Nota : Énergie totale : somme de l'énergie potentielle (liée à l'altitude) et de l'énergie cinétique (liée à la vitesse).

Pente totale : somme de la pente liée à la vitesse verticale et de la pente issue de l'énergie cinétique.

6. CONCLUSION

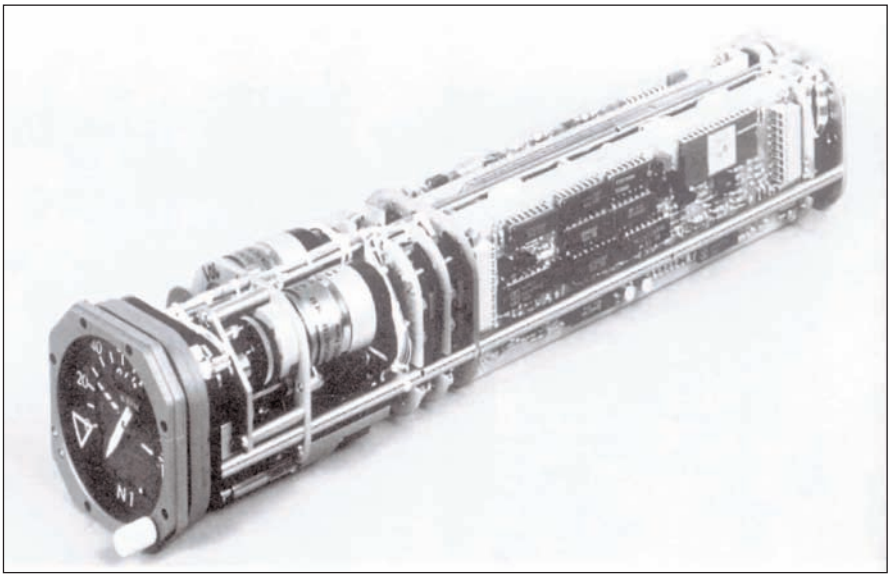
Le domaine des instruments de planche de bord est sans doute l'un de ceux qui ont le plus évolué pendant la période considérée. Progressivement, surtout à partir des années soixante, les instruments principaux ont disparu sous leur forme simple et classique. Les figurations synthétiques, associés aux capteurs et aux calculateurs, ont pris leur place tout en intégrant d'autres informations. Les instruments d'origine, conçus pour remplir une fonction unique, ont perdu leur individualité, celle-ci n'ayant été conservée que pour les instruments de secours. Les constructeurs des instruments traditionnels ont disparu et ont été remplacés par les fournisseurs de visualisation d'une part, et par les fournisseurs de capteurs d'autre part, certains groupes comme Sextant puis Thales combinant les deux domaines en tant que systémiers. Les capteurs et instruments de secours ont constitué la dernière niche des instruments spécialisés.

Michel HUCHER et Maurice BOMMIER
Marcel CADO, en ce qui concerne le paragraphe 5



Altimètre à aiguille et à tambour de Concorde Jaeger (1974) (Source Gifas).

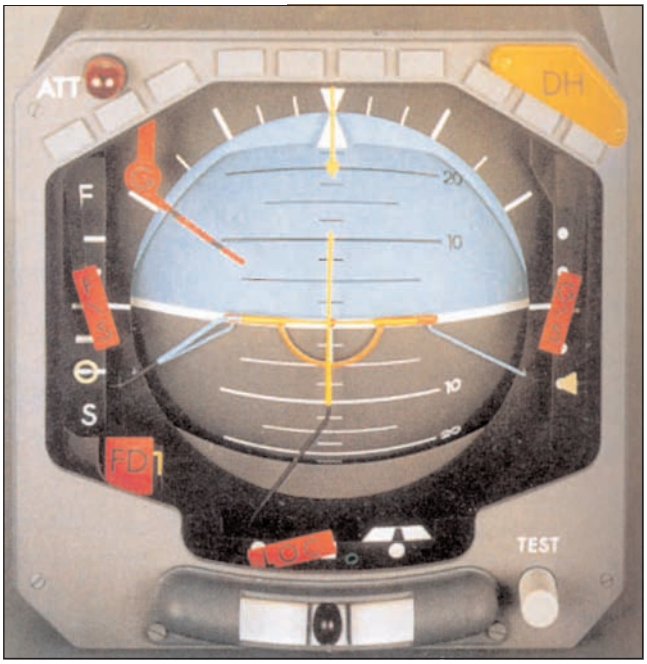
Horizon gyroscopique SFENA 800 (Horizon de secours) (Source SFENA).



Tachymètre à impulsions Jaeger (1981) (Source Gifas).

Horizon gyroscopique SFENA H 150 (monté sur Boeing 757 et 767) (Source GIFAS)

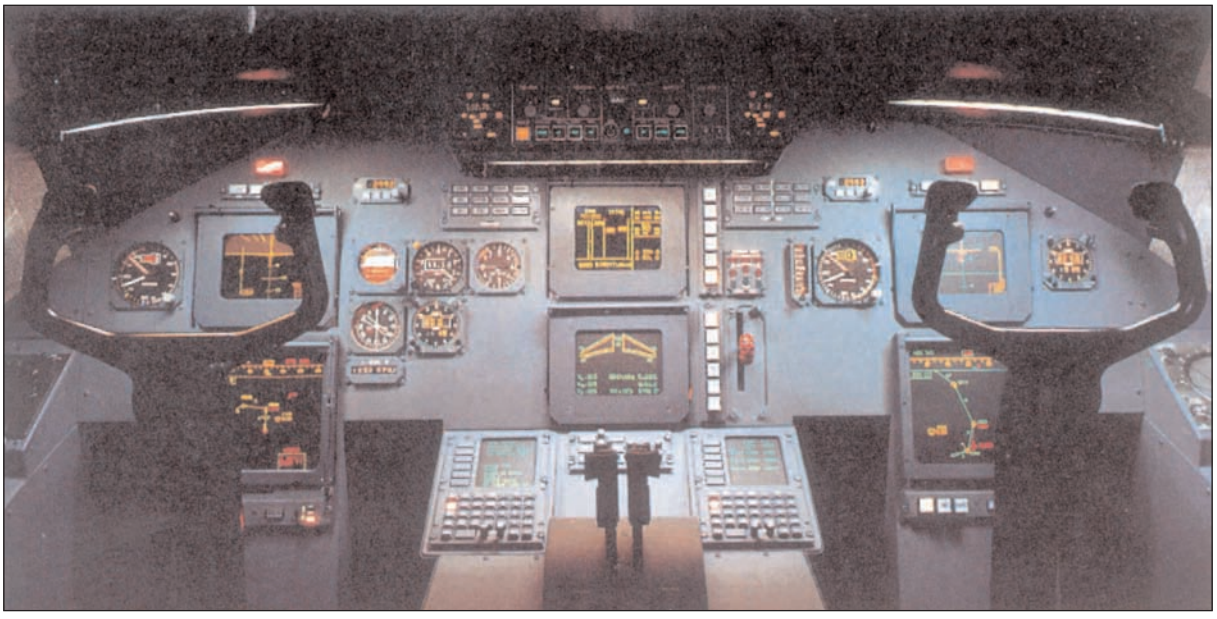
Différents types d'horizons gyroscopiques SFENA (Source GIFAS).



Horizon Indicateur de vol ADI SFENA N 32 (Source GIFAS).

Horizon Situation Indicator HSI N 33 de l'Airbus A 300 (Source GIFAS).

Planche de bord PERSEPOLIS (1973) (Source GIFAS).



ANNEXE A 2

LES COMMANDES DE VOL

L'évolution des commandes de vol des avions et hélicoptères a été considérable durant ces cinquante dernières années, car elle a suivi de très près l'évolution du domaine de vol et des performances de ces aéronefs.

On est ainsi passé, en l'espace d'un demi-siècle, d'une timonerie mécanique déplaçant directement les différentes gouvernes de l'avion à un ensemble utilisant les dernières technologies, informatiques, électroniques, hydrauliques, sur les appareils de la dernière génération tels que l' Airbus A 320, le Rafale ou l'hélicoptère NH 90.

Mais quelles furent les principales étapes de cette évolution ?

1. SITUATION EN 1945

Sur les avions à propulsion à hélice de la fin de la guerre et même sur les avions rapides de combat, la timonerie mécanique était reine, moyennant parfois quelques astuces, comme la mise en place de dispositifs de trim électrique pour diminuer les efforts sur les gouvernes proprement dites.

Il y avait bien quelques batailles d'arrière-garde entre partisans d'une timonerie agissant par rotation et ceux d'une timonerie agissant par translation, mais celle-ci restait mécanique.

2. L'APPARITION DES AVIONS À RÉACTION ET L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE

L'utilisation du réacteur en lieu et place du moteur à hélice fit faire, dans les années cinquante, un bond considérable aux performances des avions dont le domaine de vol augmenta très sensiblement avec des nombres de Mach voisins de 0,9 et des altitudes supérieures à 10 000 m. D'où des variations considérables dans les efforts aérodynamique sur les gouvernes et dans l'efficacité de celle-ci, avec, en, prime, des problèmes de stabilité aérodynamique pour les aéronefs.

Après quelques tâtonnements souvent malheureux (voir le Boeing 707 qui complétait sa timonerie classique par des trims électriques, dont l'autorité trop importante et la sécurité mal appréciée conduisirent à des catastrophes aériennes), on en vint à la solution, logique en soi, d'aider le pilote par des moyens auxiliaires de puissance.

C'est ainsi que la servo-commande hydraulique fit son apparition sur les avions à réaction de l'immédiate après-guerre tels que le Comet, la Cavarelle, le Vautour, les Mystère et le Mirage III.

Mais l'utilisation de ces servo-commandes nécessitait, pour faciliter le pilotage et remplacer les efforts sur les gouvernes, des systèmes de réaction artificielle donnant au pilote des sensations d'effort correctes lorsqu'il manipulait manche et palonnier, quels que soient le point du domaine de vol et les variations d'efficacité de gouvernes dans ce domaine.

Il fallut donc inventer et installer des dispositifs mécaniques, électriques, hydrauliques à démultiplication variables, masses d'efforts par g, boîtes à ressort et autres Arthur et Amédée, pour donner au pilote des sensations de pilotage aussi naturelles et habituelles que possible dans tout le domaine de vol.

Par ailleurs, pour obtenir une stabilité correcte, en particulier en lacet, on mit en place des dispositifs électromécaniques dans les timoneries : les servo-amortisseurs. La sécurité de l'ensemble était obtenue par la duplication des générations hydrauliques alimentant des servo-commandes double corps. Elle était également atteinte par l'obligation pour les matériels de répondre à des cahiers des charges extrêmement sévères pour couvrir les domaines d'utilisation prévus en température, vibrations, altitude.

Les services officiels, en particulier le Service technique aéronautique, prirent une part importante dans l'élaboration de ces cahiers des charges et dans la conduite des essais, vérifiant la conformité des matériels et autorisant leur homologation.

Les principaux constructeurs français qui équipèrent la plupart des avions de cette période étaient : Jacottet (R. Leduc) pour le Vautour et le Mystère II, SAMM (J. Faisandier) pour les hélicoptères, Air Équipement (M. Guyon) pour la Caravelle et l'Airbus A 300, et GAMD (J. Ritzenthaler) pour les avions Dassault à partir du Mystère IV et pour le Transall.

3. LA COMMANDE ÉLECTRIQUE DES GOUVERNES

La complexité croissante des dispositifs de réaction artificielle et les problèmes de stabilité de plus en plus aigus rencontrés sur les avions à réaction conduisirent, dès 1955, à réfléchir à l'introduction d'une commande électrique directe pour actionner les gouvernes, commande électrique d'une très grande souplesse d'utilisation, car pouvant recevoir aussi bien les ordres directs du pilote que les signaux de stabilisation artificielle nécessaires pour améliorer la stabilité de l'appareil dans tout son domaine de vol.

Les premières études furent lancées à la SAMM en 1955 ainsi qu'au département Équipements de la GAMD.

En juin et juillet 1958 purent ainsi avoir lieu les premiers vols en commande électrique utilisant une servo-commande électrohydraulique GAMD montée sur la profondeur d'un Mystère IV du CEV, piloté par l'ingénieur de l'air L. Vandenberghe, responsable des essais.

La voie était ouverte, et si la GAMD conserva encore une timonerie classique pour ses programmes Mirage III, Mirage F1 et Étendard IV, elle franchit résolument le pas pour le Mirage IV dès 1960, ses avions à décollage vertical, Mirage III V et, bien entendu, pour ses programmes Mirage 2000 et Rafale.

De même, Sud-Aviation /Aérospatiale retint ce principe de commande pour son supersonique Concorde, puis pour les Airbus A 320 et A 340 et pour son hélicoptère NH 90.

Plusieurs étapes furent cependant nécessaires avant d'arriver à des commandes uniquement électriques, garantissant le niveau de sécurité voulu et permettant d'exploiter au maximum les qualités de souplesse potentielles qu'elles présentent.

Il est intéressant, à cette occasion, de souligner l'aide importante apportée par les études menées au Centre de simulation d'Istres du CEV sur "l'avion à stabilité variable" Mirage III B.225 par les équipes des pilotes d'essais du CEV, des industriels et celles de l'armée de l'Air qui permirent d'expérimenter, dès le début des années soixante-dix, les possibilités offertes

par cette nouvelle conception des commandes de vol en matière de stabilité artificielle, lois de pilotage, lois d'effort, commande par mini-manche latéral, possibilités mises en œuvre, par la suite, sur des avions comme l'A 320 ou le Rafale.

Ceci étant, en raison des impératifs de sécurité quelque peu différents pour les avions civils et militaires, il est intéressant de voir séparément cette évolution progressive vers le tout électrique, dans le domaine des avions militaires, dans celui des avions civils et dans celui des hélicoptères.

3.1. Les avions militaires

Le Mirage IV

Les essais en vol de la première commande électrique étaient à peine terminés que la GAMD, pour son futur avion de combat supersonique Mirage IV, se lança, soutenue par les services officiels, dans la mise au point d'une commande électrique des gouvernes de cet avion, en l'occurrence les élevons.

En effet, cet avion supersonique devait accomplir des missions de longue durée en vol supersonique, avec passages, bien entendu, en transsonique, et cela entraînait des problèmes de stabilité, tant en tangage qu'en lacet.

Pour les résoudre et augmenter également la précision de la commande des élevons (longueur importante de timonerie) la GAMD, s'appuyant sur les études et réalisation du département Équipement de J. Ritzenthaler, choisit donc l'option de la commande électrique des élevons. Celle-ci fut réalisée grâce à l'installation de quatre servo-commandes électrohydrauliques sur ces gouvernes qui recevaient directement les ordres du pilote par l'intermédiaire de potentiomètres en pied de manche ainsi que ceux d'un servo-amortisseur de tangage, modulés en fonction des données fournies par la centrale aérodynamique de l'appareil. Une seule chaîne de commande électrique était utilisée, mais cette chaîne comportait des amplificateurs, entièrement transistorisés pour en augmenter la fiabilité.

La sécurité était assurée par une timonerie mécanique de secours, équipée des systèmes de réaction artificielle adéquats, dont la liaison avec les servo-commandes d'élevons se faisait par l'intermédiaire de guignols débrayables dont le jeu, permettant le fonctionnement en électrique, disparaissait en cas de passage en mécanique.

Quant au pilote automatique, réalisé par SFENA, ses ordres étaient transmis par l'intermédiaire d'un servo-moteur électrohydraulique, monté en parallèle avec le manche du pilote, en amont des potentiomètres de commande, et bénéficiant ainsi des qualités de pilotage assurées par la commande électrique des élevons.

Un travail important de mise au point fut, bien entendu, nécessaire avec banc de commandes de vol et essais d'homologation sévères, couvrant l'ensemble du domaine d'utilisation de ces matériels, réalisés sous la responsabilité du Service technique aéronautique.

Cet ensemble de commandes de vol, en avance à cette époque sur celui du B 58 américain, se montra particulièrement précis et efficace pour assurer la stabilité de l'avion et son pilotage manuel et automatique dans les conditions de sa mission.

Cette application servira, d'ailleurs, de modèle pour le supersonique Concorde, lui aussi avion à aile delta.

Le Mirage 2000

L'expérience acquise sur ces dispositifs, dont les principes furent également appliqués au supersonique Concorde (voir avions civils), permit de lancer, dès 1975, les premières études

de commandes de vol entièrement électriques avec les sécurités associées, en vue de leur application au Mirage 2000.

Celui-ci fit son premier vol en 1978, avec une timonerie mécanique de secours, mais en 1979 on franchit véritablement le pas du tout électrique, en remplaçant cette timonerie par un ultime secours électrique. Sur cet appareil, les commandes du pilote, manche et palonnier, restent dans leur configuration classique.

Les chaînes électriques de pilotage transmettent non seulement les ordres directs du pilote mais également tous les ordres pour l'amélioration de la stabilité statique et dynamique et pour sa protection aérodynamique et structurelle, et ce dans tout son domaine de vol, en particulier en transsonique.

Les commandes électriques comportent quatre calculateurs analogiques par axe, et la sécurité est assurée par la comparaison permanente du fonctionnement de ces quatre calculateurs, avec un ultime secours électrique.

Ces calculateurs reçoivent également les signaux du calculateur du pilote automatique réalisé par SFENA/Sextant Avionique, permettant de faire, entre autres, l'approche automatique ILS et le suivi de terrain automatique, par liaison au radar.

Le Rafale

En 1983, un nouveau pas fut franchi avec le lancement des études sur une nouvelle génération de calculateurs à technologie numérique, en vue de leur application au programme ACX, devenu le programme Rafale, en 1985.

Sur cet avion, la commande électrique des gouvernes est assurée par trois chaînes de calcul principales numériques et une quatrième analogique, ayant leurs capteurs gyrométriques et accélérométriques propres, la sécurité étant assurée par la comparaison permanente des chaînes de pilotage. Le manche de pilotage classique est, par ailleurs, remplacé sur cet appareil par un minimanche latéral.

Le premier vol sur le démonstrateur Rafale eut lieu en 1986.

La mise au point des logiciels et de leurs spécifications primordiales pour ce type de commande nécessita la mise en place d'outils de conception nouveaux comprenant en particulier l'outil GISELE (Génération Interactive des Spécificateurs de l'Ensemble des Logiciels Embarqués).

Leur vérification et leur validation se font sur un banc de simulation globale de l'avion, absolument nécessaire, compte tenu de la multiplicité et de la complexité des fonctions réalisées par cet ensemble de commandes automatiques de vol. Ces fonctions sont, en effet, particulièrement remarquables, que ce soit dans le domaine des aides au pilotage :

- amélioration de la stabilité statique et dynamique ;
- trim automatique pour conserver pente ou angle de roulis ;
- optimisation de la configuration aérodynamique dans tout le domaine de vol (traînée minimale, portance maximale…) ;
- protection de l'appareil par limitation automatique du facteur de charge, de l'incidence de la vitesse de roulis et de tangage, du dérapage…

ou dans celui du pilotage automatique proprement dit (il n'y a plus, en effet, de calculateur de pilotage automatique spécifique, comme sur Mirage 2000) :

- capture et tenue de pente, de route, d'altitude, de Mach et de vitesse ;
- approche automatique ILS ;

– suivi de terrain basse altitude par couplage au radar, au fichier de terrain ou au radio-altimètre ;
– avec, en complément, une automanette pour le pilotage du moteur en approche.

Il n'y a d'ailleurs plus de poste de commande pour le pilotage automatique, et le pilote utilise ses organes de pilotage habituels (joystick sur le manche, pédales de frein) pour introduire les ordres de changement de trajectoire.

Comme on peut le constater, on est très loin, sur le Rafale, de la conception classique : commandes de vol et pilote automatique, avec ce système intégrant véritablement toutes les fonctions de pilotage nécessaires pour le vol et la mission de l'appareil, au sens le plus large du terme.

C'est un exemple remarquable de ce que permet de réaliser une véritable intégration des systèmes de bord (moteur compris) d'un avion, telle qu'on l'avait envisagé, sinon rêvé en 1968 lors des premiers colloques "Utilisateurs-industriels-serveurs officiels" sur cette intégration !

3.2. les avions civils

L'évolution de la conception des commandes de vol des avions civils est très voisine de celle observée dans le domaine des avions militaires.

Concorde

Un premier pas vers la commande électrique des gouvernes fut franchi, dans les années soixante, avec le supersonique Concorde.

Sur celui-ci, en effet, la configuration géométrique de l'avion et son domaine de vol très étendu imposaient d'améliorer artificiellement la stabilité naturelle de l'appareil, autour des trois axes de roulis, tangage et lacet. Ces conditions conduisirent naturellement à prévoir, en fonctionnement normal, une commande électrique des servo-commandes de gouvernes à partir de signaux reçus à la fois des organes de pilotage (manche, palonnier) et des systèmes de stabilisation artificielle, avec, en secours, une commande mécanique classique qui permet la poursuite du vol malgré des qualités de vol dégradées et moyennant des procédures particulières de conduite de l'avion.

Ceci étant, en raison de sa mission d'avion de transport, un niveau de sécurité élevé fut recherché dans la conception de base et celui-ci fut obtenu par :
– la multiplication des gouvernes (6 élevons et 2 gouvernes de direction) ;
– la commande des gouvernes par servo-commandes électrohydrauliques double-corps (réalisés par Boulton Paul) ;
– l'alimentation hydraulique par deux générations indépendantes et une troisième en secours ;
– la commande électrique par deux chaînes distinctes, une seule utilisée en fonctionnement normal, l'autre restant en attente, le fonctionnement de ces chaînes étant contrôlé en permanence par une chaîne de surveillance simulant la chaîne de commande.

Les fonctions remplies par ces commandes de vol électriques sont nombreuses, car, comme on l'a dit précédement, elles devaient résoudre un certain nombre de problèmes de stabilité et de sécurité, liés au vol supersonique et à la formule aérodynamique de l'appareil :

– amélioration de la stabilité en tangage et en lacet ;
– limitation du dérapage dû aux pannes moteur ;
– maintien de la stabilité statique dans tout le domaine de vol et en particulier, en transsonique.

Par ailleurs, ces commandes de vol recevaient également les ordres d'un pilote automatique, introduits par l'intermédiaire d'une servo-commande électrohydraulique double-corps, le pilote automatique ayant ses chaînes de pilotage doublées pour lui permettre la certification en atterrissage automatique catégorie III B.

La mise au point de ces systèmes fut délicate et nécessita la mise en place d'un banc de commandes de vol très complet, avec éléments réels, reliés à un simulateur de vol reproduisant la cabine de pilotage de l'avion, avec mouvement cabine et visualisation extérieure afin de permettre la participation active des pilotes dans la mise au point de l'ensemble (cet ensemble fut installé en 1966, trois ans avant le premier vol du 2 mars 1969).

La lourdeur de l'organisation administrative et technique du programme Concorde a souvent été critiquée, mais il n'en reste pas moins qu'en ce qui concerne les aspects définition, sécurité, en particulier dans le domaine des commandes de vol, cette organisation favorisa le rapprochement des équipes de l'avionneur avec celles des services officiels (Services Techniques et Centre d'essais en vol). Les équipes de Sud-Aviation purent ainsi bénéficier de l'expérience acquise sur les programmes militaires, tels que le Mirage IV.

Airbus A 320

La conception des commandes de vol sur les Airbus A 300 B (premier vol en octobre 1972) était restée très classique :
– gouvernes actionnées par des servo-commandes irréversibles alimentées par trois circuits hydrauliques indépendants et reliées mécaniquement aux organes de pilotage (manche, pédales) ;
– trim électrique de profondeur ;
– deux chaînes de pilotage automatique auto-surveillées pour permettre les atterrissage automatique catégorie III B, les ordres étant introduits sur les timoneries par des vérins électrohydrauliques.

Cependant, l'expérience acquise sur Concorde en matière de commandes de vol électriques, la connaissance des possibilités offertes par les calculateurs numériques utilisés dans les pilotes automatiques des dernières versions A 300 B A 310, A 300 B4, Garuda, la disposition de méthodes d'analyse de sécurités éprouvées, conduisirent les constructeurs de l'A 320 à remettre totalement en cause la conception des commandes de vol électriques pour les gouvernes principales de profondeur et de gauchissement.

Parmi les principales innovations, il faut noter :
– l'utilisation de calculateurs numériques dans les chaînes de pilotage ;
– la présence de cinq calculateurs par chaînes assurant les fonctions de calcul des lois de pilotage, d'asservissement des gouvernes, de surveillance du système et de reconfiguration en cas de panne, permettant ainsi d'avoir le niveau de sécurité nécessaire malgré l'absence de secours mécanique pour les gouvernes principales ;
– des servo-commandes électrohydrauliques au nombre de deux par aileron et gouverne de profondeur (constructeur Air Équipement) ;

– le maintien d'une commande mécanique classique pour la direction (pouvant servir de secours ultime en cas de panne de la commande des ailerons) ;
– l'étendue des fonctions réalisées par cet ensemble de "commandes automatiques de vol" : amélioration de la stabilité ; protection contre le décrochage (voir accident d' Habsheim) ; protections en assiettes longitudinale et latérale, en facteur de charge ; introduction directe des ordres du pilote automatique (réalisé par Sextant Avionique) dans les calculateurs de commandes de vol ;
– et enfin, dernière innovation, mais peut-être la plus frappante, sinon la plus révolutionnaire pour les pilotes des compagnies aériennes, l'utilisation de manches latéraux en lieu et place des organes de pilotage classique (la mise en place de ces manches latéraux fut l'objet de discussions souvent orageuses avec les pilotes de ces compagnies).

Il va sans dire que le développement d'un tel système aussi nouveau, tant sur le plan de la conception que sur le plan technologique, nécessita la mise en place d'une organisation très intégrée entre concepteurs, réalisateurs, essayeurs au sol et en vol, pour définir l'architecture du système, définir et valider les logiciels, évaluer de façon permanente la sécurité pour vérifier que, malgré les modifications, les objectifs de sécurité sont respectés et démontrer finalement que le système satisfait les règlements JAR 25 et FAR 25 de l'aviation civile, sans oublier les conditions spéciales spécifiques à l'A 320 établies en concertation avec les services officiels.

La simple phase "vérification de sécurité" des commandes de vol nécessita près de 3 000 heures de travail comprenant entre autres de nombreuses heures de simulation au sol, des cas de pannes.

Mais cette organisation et ces procédures démontrèrent leur efficacité car il est remarquable de noter qu'entre le lancement du programme A 320 en mai 1984 et le premier vol de l'appareil en février 1987, trois ans à peine se sont écoulés.

3.3. L'hélicoptère NH 90

L'utilisation de servo-commandes hydrauliques sur l'hélicoptère fit son apparition en France avec la réalisation des hélicoptères de transport et de lutte anti-sous-marine Puma, Super Puma, Super Frelon, puis d'hélicoptères de combat comme le Tigre, mais ce n'est qu'avec le programme de l'hélicoptère de transport NH 90 que fut envisagée l'utilisation de commandes de vol électriques.

Ce décalage par rapport aux avions militaires (Mirage 2000, Rafale) et aux avions civils de transport (A 320 – A 340) est principalement lié aux caractéristiques aérodynamiques des rotors qui requièrent, pour leur pilotage, des architectures de commandes de vol nettement plus complexes que pour les voilures fixes.

La commande d'un rotor principal d'hélicoptère est, en effet, obtenue par un pilotage continu et interdépendant du pas de chaque pale, sans possibilité de redondance des surfaces de contrôle comme sur avion. Un blocage d'une seule des trois servo-commandes commandant le pas conduit donc irrémédiablement à la perte de contrôle de la machine, ceci d'autant plus que, l'hélicoptère étant une machine intrinsèquement instable, tout dysfonctionnement conduit à des situations dangereuses, sinon irrécupérables pour le pilote. D'où l'importance de l'architecture du système de commandes pour garantir le niveau de sécurité recherché.

Sur le NH 90, celui-ci est obtenu par un niveau élevé de redondance appliquée à deux étages de calculateurs. Le premier étage comprend deux calculateurs numériques élaborant les lois de pilotage nominales, fonctions des ordres de pilotage provenant des commandes pilote (manches et palonniers) et d'informations relatives à la situation de l'hélicoptère, telles que vitesses et mouvements angulaires, de façon à donner à l'appareil les meilleures qualités de vol et de pilotage possibles. Ces calculateurs reçoivent également les ordres du pilote automatique (réalisé par SFIM-SAGEM) permettant de réaliser automatiquement certaines phases de vol.

Pour garantir la fiabilité requise, les deux calculateurs assurent chacun leur propre surveillance. En cas de défaillance de cet ensemble, le relais est pris par des calculateurs analogiques permettant la poursuite du vol avec un minimum de stabilisation artificielle. Ces calculateurs assurent également eux-mêmes leur surveillance de fonctionnement.

Ce premier étage de calculateurs numériques est suivi d'un deuxième étage de calculateurs analogiques dits d'asservissement qui pilotent directement la position de quatre servo-commandes électrohydrauliques (trois pour le rotor principal, une pour le rotor arrière) commandant directement le pas des pales des rotors.

Ces calculateurs analogiques sont au nombre de quatre et reçoivent les signaux provenant du premier étage de calculateurs, après avoir choisi automatiquement les chaînes électriques en état de marche correct.

Dans le cadre de la mise au point du prototype, une liaison mécanique de secours permettait de piloter directement les servo-commandes du rotor, mais ce secours mécanique sera supprimé sur les appareils de série.

Les études ont été lancées en 1985 et une première démonstration de faisabilité a été faite sur un hélicoptère Dauphin en 1989.

Parallèlement aux essais de démonstration de faisabilité en vol, un banc de simulation a été spécialement conçu pour vérifier la validité des spécifications des différents composants du système et de leurs logiciels pour les éléments numériques.

Ces spécifications doivent en particulier répondre, compte tenu du caractère innovateur du système de commandes de vol, à une nouvelle réglementation élaborée avec la participation directe des services officiels de la DGA.

Les premiers essais en vol sur NH 90 ont eu lieu en 1997.

Lors de sa mise en service, le NH 90 est le premier hélicoptère au monde équipé d'un tel système.

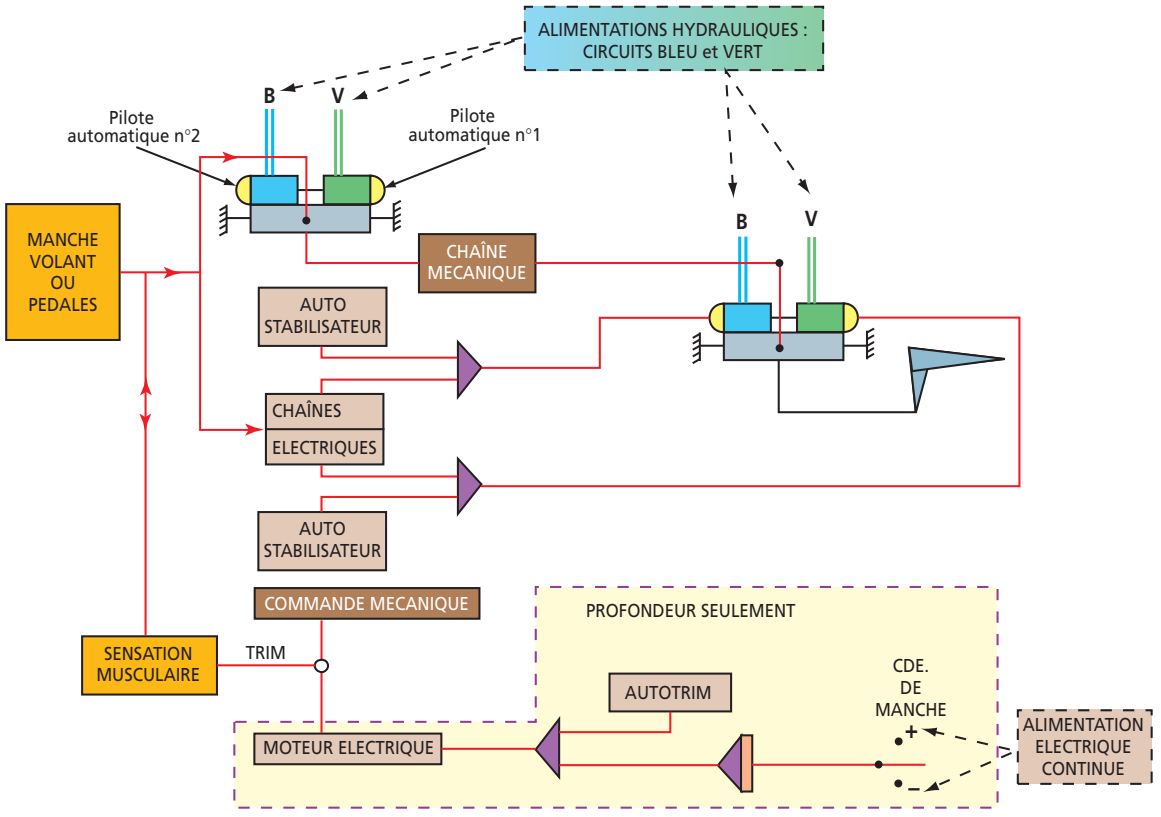
On mesure ainsi le chemin parcouru en cinquante ans, de l'Alouette au NH 90, dans la conception des commandes de vol !

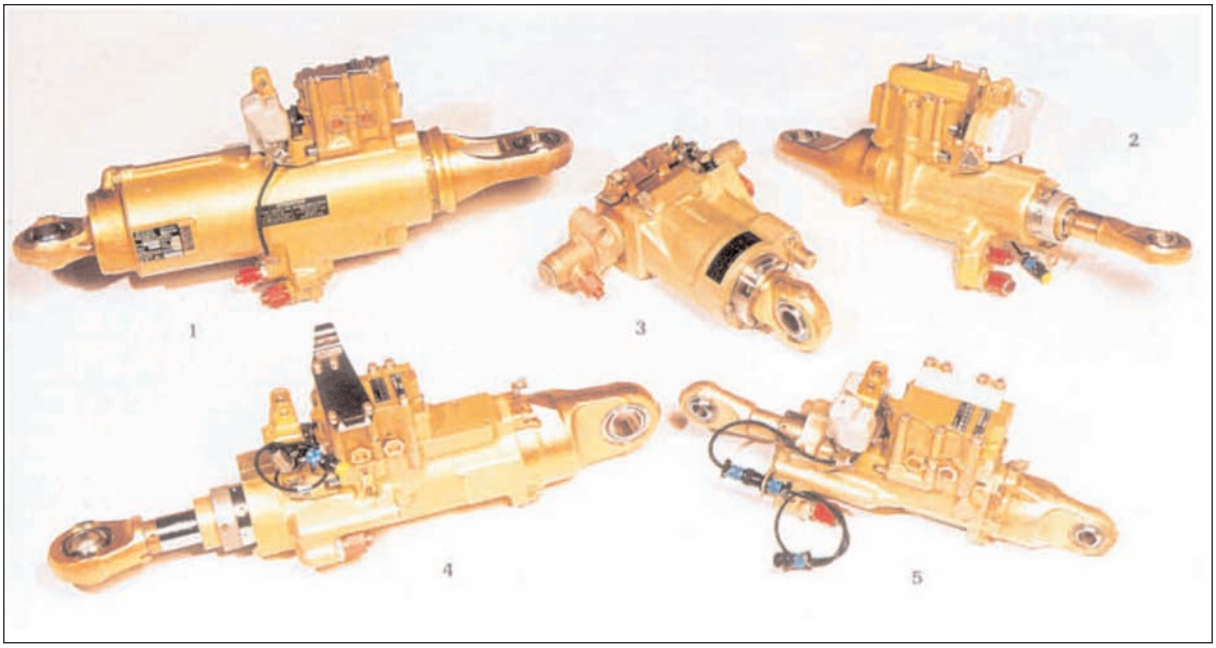
Marcel CADO

Nota : Cette annexe a été rédigée avec le concours de M. Raymond DEQUÉ, ancien ingénieur à la direction Technique de Sud-Aviation et de M. Jean-Charles FOUCHÉ, de la direction Technique de Dassault-Aviation.

Références : Rapport CEV sur les essais en vol de servo-commandes (1958-1959).

Schéma du système de commandes de vol de CONCORDE





Les servocommandes de l'Airbus A 300 (Air Equipement) (SourceGIFAS).
1 : Direction, 2 : Profondeur, 3 : Spoilers aérofreins, 4 : Ailerons toutes vitesses,
5 : Ailerons basses vitesses.

ANNEXE A 3

LE PILOTAGE AUTOMATIQUE

LE PILOTAGE AUTOMATIQUE DES AVIONS

À la sortie de la guerre, la situation générale de l'industrie française des Équipements n'était guère brillante et si, pour répondre aux besoins immédiats des utilisateurs nationaux, on dut bien souvent faire appel soit à des achats directs à l'étranger, en particulier aux États–Unis et en Grande-Bretagne, soit à des réalisations sous licence, le souci de retrouver un niveau valable était réel aux échelons centraux de la Direction technique. Ce souci se traduisit par la mise en place effective et rapide des moyens nécessaires aux développements des nouveaux matériels.

Dans le domaine plus particulier du pilotage automatique, il existait cependant quelques matériels dont la conception datait d'avant-guerre et qui furent utilisés dans certains programmes aéronautiques.

C'est ainsi que les pilotes automatiques Alkan (du nom de l'ingénieur Robert Alkan, véritable pionnier dans ce secteur qui avait poursuivi ses travaux aux États-Unis pendant la guerre avant de regagner la France à la fin de celle-ci) réalisés par la Société française d'équipements pour la navigation aérienne (SFENA, créée en 1947) furent installés sur les avions SO 30P Bretagne et Nord 2501.

Ces matériels étaient composés d'éléments mécaniques et électro-mécaniques commandant des moteurs pneumatiques pour actionner les timoneries des commandes de vol. Ils se limitaient à des fonctions simples de surveillance (cap et altitude), sans possibilité d'adaptation aux conditions de vol.

Cependant, le noyau d'ingénieurs, qui se constitua à la SFENA, autour de R. Alkan et de B. Hamel, directeur technique de la SFENA, orienta tout naturellement ses études vers le développement de systèmes modernes de pilotage automatique, capables, à terme, de concurrencer les matériels américains et britanniques (Lear, Sperry, Bendix, Smiths…) qui équipaient la plupart des avions civils et militaires de cette époque.

Ce développement bénéficia, dès son départ, d'un soutien sans faille, tant financier que technique, de la part de l'État, via le Service technique aéronautique[1], dans le cadre d'une coopération étroite entre tous les acteurs concernés : industriels, services officiels (Service technique, Centre d'essais en vol) et utilisateurs.

Il se fit suivant trois axes principaux :

- les études de lois de pilotage, correspondant aux différentes fonctions envisagées ;
- les études technologiques portant sur les détecteurs, les amplificateurs, les servomoteurs ;
- la conception des chaînes de pilotage, sur le plan des liaisons entre l'homme et la machine et sur le plan des sécurités.

(1) À la section Équipements, sous l'impulsion de l'ICA Robert Galerne et de l'IPA Marcel Cado

Les moyens utilisés étaient constitués par les bureaux de calcul et d'études de l'industriel, les moyens d'essais privés ou étatiques pour la mise au point proprement dite des matériels et les moyens aériens du CEV (avions de servitude de tous types) et des avionneurs pour la mise au point, en vol, des chaînes de pilotage et leur adaptation au support.

1. PREMIÈRE ÉTAPE (années cinquante - début des années soixante)

Les efforts portèrent en priorité sur :
- l'étude des fonctions de base de pilotage automatique : amélioration de la stabilité de l'avion et de ses qualités de vol ; tenue d'assiette, de cap, d'altitude et approche ILS ;
- la réalisation de chaînes de pilotage à base d'amplificateurs à relais vibrants, puis d'amplificateurs magnétiques, de servo-moteurs électriques et de détecteurs spécifiques (gyromètres et accéléromètres).

Un premier stabilisateur de cap fut ainsi essayé sur Vampire en 1953, et ensuite quelques applications, limitées mais marquantes, conduisirent à la réalisation en série des premières chaînes de pilotage automatique SFENA.

Parmi ces réalisations, il faut noter celle des servo-amortisseurs de lacet pour les avions de combat SO 4050 Vautour, et GAMD SMB.2 et surtout celle de l'auto-commande de profondeur pour le SMB 2 (premier vol en 1956) et le Mirage III (premier vol en 1958).

Par son originalité, ce dernier matériel mérite que l'on retrace son histoire.

1.1. L'auto-commande de profondeur SFENA

Cette auto-commande était destinée à améliorer les qualités de pilotage des avions militaires à réaction dont le domaine de vol s'était considérablement élargi, avec, corrélativement, des variations importantes dans l'efficacité des gouvernes.

Grâce à un dynamomètre détectant l'action du pilote, et à un ensemble gyromètre-accéléromètre détectant les mouvements de l'avion, elle permettait d'homogénéiser les efforts par g dans tout son domaine de vol, tout en améliorant la stabilité.

Les études furent lancées en 1955 et furent l'objet d'une étroite coopération entre l'industriel SFENA (J. Pagnard), le Service technique aéronautique (R. Galerne) et le CEV (L. Vandenberghe).

La première version à servo-moteur électrique (auto-commande AC341) destinée à l'avion de combat GAMD SMB 2 fit ses premiers essais en vol en 1957 sur un avion de servitude Mystère II du CEV, et équipa ensuite, à partir de 1959, la série des avions SMB 2.

La deuxième version, destinée au Mirage III (auto-commande AC342), à servo-moteur électrohydraulique et d'une technologie plus moderne (amplis magnétiques) fit ses essais en vol de mise au point en 1958 et 1959.

Ces mises au point et ces adaptations au support s'avérèrent fort délicates, car elles introduisaient directement le pilote humain dans la boucle de pilotage.

Il fallait résoudre de nombreux problèmes : seuils d'effort, impressions curieuses de pilotage comme le "grenaillage" des commandes, et, bien entendu, sécurités pour obtenir un équipement pleinement satisfaisant, en utilisation, pour les pilotes de l'armée de l'Air.

Dans cette mise au point, la contribution des équipes d'essais en vol du CEV fut, sans aucun doute, déterminante.

D'autres versions, rénovées sur le plan de la technologie, virent ensuite le jour : en 1976 et 1977 pour les Mirage III R et III E (avec, sur ce dernier, l'adjonction d'une surveillance d'altitude qui en faisait un véritable pilote automatique simplifié), et en 1980 une version dite de "nouvelle génération" pour le Mirage V, version basse altitude (avec boîtier spécial de sécurité) pour le tir canon air-sol (auto-commande B R 9).

À signaler également la réalisation d'une présérie, pour le SM B2, comprenant non seulement une auto-commande en profondeur, mais également une auto-commande en gauchissement.

1.2. Études de pilotage automatique pour avions de transport

Parallèlement à ces premières réalisations en série se développèrent de nombreuses études de pilotage automatique proprement dit, pour les avions de transport.

C'est dans cette période, en effet, que furent réalisés et essayés en vol les premiers pilotes automatiques dotés de toutes les fonctions de base demandées pour les avions de transport (tenue d'assiette, de cap et d'altitude, approche automatique ILS).

Ces pilotes automatiques prototypes furent essayés et mis au point sur des avions de servitude du CEV, dont les équipes eurent, là encore, une influence déterminante sur la conception des chaînes de pilotage et, en particulier, de leurs sécurités.

Ces essais commencèrent, dès 1955, sur Junker JU 52 puis se poursuivirent, en 1956 et 1957, sur Nord 2501 (PA SFENA 315).

La mise au point de ces chaînes de pilotage se fit trop tard pour leur application au Transall (pilote automatique Sperry SP 40, construit sous licence par la SFIM, premier vol en 1961), au Breguet Atlantic Mk I (PA SFIM-Sperry premier vol en 1961 également), ainsi qu'à la Caravelle de Sud-Aviation (PA Lear), mais elle permit aux équipes de la SFENA et aux services officiels de se familiariser avec tous les problèmes d'adaptation, de sécurités, de procédures d'essais, d'évaluation des performances. Ainsi se constitua une base solide sur laquelle devait se développer ultérieurement les applications aux avions de transport (famille des PA Tapir et Mini-Tapir) qui viendront concurrencer les productions étrangères dès le début des années 1970 dans les programmes d'avions internationaux (Airbus, Atlantique Mk II).

Cependant, ces efforts d'étude et de développement ne furent pas totalement vains au cours de cette période, sur le plan de la production en série, car elles débouchèrent sur une première application en série, avec les Breguet 1050 "Alizé" de la Marine nationale (PA SFENA 318- essais en vol de mise au point en 1957-1958).

2. DEUXIEME ÉTAPE (années soixante à soixante-dix)

Cette deuxième étape vit se nouer des relations de plus en plus étroites entre équipementiers et avionneurs, évolution naturelle éminemment souhaitable, compte tenu de l'imbrication de plus en plus grande de l'avion, de ses systèmes (en particulier, les commandes de vol) et des chaînes de pilotage automatique, mais toujours sous le contrôle des services officiels, pour l'orientation des études et la définition de base des matériels.

Pendant cette période, les études et réalisations s'orientèrent dans deux directions principales particulièrement importantes pour la mise à niveau international des matériels réalisés en France :

– étude et mise au point de fonctions ou de conceptions nouvelles (atterrissage automatique, auto-adaptation) ;
– études et réalisations de chaînes de pilotage automatique couvrant tout le domaine de vol d'un avion subsonique ou supersonique, de combat ou de transport.

2.1. Étude et mise au point de fonctions nouvelles

L'atterrissage automatique

Le lancement de ces études en France fut précédé d'une campagne d'information sur le développement de ces systèmes à l'étrangers, en particulier au Royaume-Uni et aux États-Unis. Cette campagne fut confiée à un groupe d'experts composé de représentants de l'aviation civile (R. de Foresta), du STTA (G. Guibé), du CEV (R. Larrieu) et du STAé (M.Cado).

Dans les années soixante, ce groupe fut ainsi amené à participer, en 1961, à des démonstrations en vol de différents systèmes comme le système d'atterrissage automatique Smith's à Bedford ou le système Bell à Atlantic City, centre d'essais de la Federal Air Agency (FAA) et à assister, en 1963, au symposium de l'International Air Transport Association (IATA) à Lucerne, premier symposium concernant l'atterrissage tous temps qui réunissait utilisateurs (en particulier compagnies aériennes), industriels, services officiels et qui aborda souvent de façon très animée les conditions d'utilisation de ces futurs systèmes.

Par ailleurs, un groupe de travail franco-britannique fut créé pour débattre des orientations de la définition de ces systèmes et des conditions de sécurité et de précision que nécessitait leur utilisation, tant au point de vue du pilotage que du radioguidage (systèmes ILS, ASV 23 de Thomson-CSF et autres).

Parallèlement, deux programmes d'études financées par l'État étaient définis puis lancés en France, l'un confié à Sud-Aviation pour application au S E 210 Caravelle, l'autre à la SFENA pour l'application à ses futures chaînes de pilotage.

Programme Caravelle

Ce programme démarra en 1961 au bureau d'études de Sud-Aviation à Toulouse sous la responsabilité de J. Lepers et de G. Pichon.

En liaison avec le constructeur du pilote automatique de l'avion (l'équipementier américain Lear), Sud-Aviation réalisa un coupleur spécifique, utilisant un radio-altimètre TRT, permettant de faire l'arrondi automatique et la tenue de vitesse pendant toute la phase d'approche et d'atterrissage. Un boîtier de sécurité, réalisé également par Sud-Aviation, limitait les évolutions de l'avion à un couloir de sécurité, toute sortie de ce couloir déclenchant une alarme, ordonnant la remise des gaz.

Les premiers vols d'essais débutèrent au printemps 1962, sous la conduite d'A. Turcat et de R. Guignard. La certification fut obtenue en 1965. Elle autorisait l'utilisation de ce système en catégorie III A d'atterrissage tous temps (hauteur de décision : 50 pieds, visibilité horizontale : 150 mètres).

Une cinquantaine d'appareils fut équipée de ce dispositif qui fut mis en service d'abord sur les Caravelle d'Air Inter (première compagnie aérienne au monde à utiliser en vol régulier l'atterrissage automatique) puis sur des Caravelle d'Air France.

Programme SFENA

Les études furent lancées en 1960 ; un premier prototype fut réalisé et essayé au CEV sur NC 702 en 1961 et 1962 pour des essais préparatoires puis installé sur des avions de servitude Morane Paris (PA SFENA 418).

L'objectif était de mettre au point les lois de pilotage pour l'approche et l'arrondi automatique ainsi que les sécurités assurées suivant le principe du "moniteur" (c'est-à-dire surveillance directe du fonctionnement de la chaîne de pilotage) ; une "auto-manette" était également installée pour la tenue de vitesse en approche.

Les vols d'essais se déroulèrent de 1965 à 1967 et démontrèrent qu'il était parfaitement envisageable d'utiliser un pilote automatique monitoré pour réaliser en toute sécurité une approche et un atterrissage automatiques.

Ces essais permirent également aux équipes d'essais en vol du CEV de parfaire la méthodologie des essais nécessaires à la certification des systèmes d'atterrissage automatique (en particulier trajectographie).

Forte de cette expérience, la SFENA put ainsi présenter, en 1972, un projet de pilote automatique avec atterrissage automatique qui fut retenu pour l'Airbus A 300.

La consécration de ces études fut la certification de l'Airbus A 300 obtenue en 1979 en catégorie III B (hauteur de décision : 15 pieds, visibilité horizontale : 50 mètres).

L'auto-adaptation

En 1961, la SFENA, dans le cadre de son contrat d'études avec le STAé, lança une étude de caractère général pour explorer les possibilités offertes, dans le domaine du pilotage automatique, par une nouvelle notion appelée "auto-adaptation" qui permettait en principe de s'affranchir de données aérodynamiques pour adapter un pilote automatique à un avion dans tout son domaine de vol.

Notion très séduisante dans son principe car entraînant, par voie de conséquence, une simplification des réalisations, donc une amélioration de la fiabilité, une diminution des délais de fabrication, donc des prix de revient, une utilisation possible sur de nombreux types d'avions et une disponibilité pratiquement immédiate dès son premier vol.

Aux États-Unis, des études et des essais avaient d'ailleurs été réalisés dans ce domaine, dès les années cinquante, sur des avions tels que le F 100, le F 102 et le X 15. En France, un Mirage III du CEV fut équipé d'une telle chaîne "auto-adaptative" et fit ses essais en vol entre 1969 et 1971.

Les résultats étaient prometteurs, mais, malgré les perspectives offertes par une telle conception, force est de reconnaître que ces études n'eurent pas de suite, pas plus en France qu'aux États-Unis, d'ailleurs. Était-ce dû à la présence, en tout état de cause, de centrales aérodynamiques sur les avions, ou alors, comme C. Frantzen, ingénieur du CEV chargé des essais l'a exprimé sous forme de boutade, "à la crainte de voir la disparition des centres d'essais en vol ?"

En tout état de cause, cette étude est cependant exemplaire et mérite d'être relatée car elle démontre combien les jeunes équipes de la SFENA étaient capables d'aborder, dès 1960, des études avancées à caractère quelque peu révolutionnaire, avec des délais de réaction très courts, malgré des moyens souvent limités pour passer de l'étude à l'expérimentation en vol.

Et puis, qui sait si cette notion ne refera pas surface pour la conduite des futurs aéronefs ?

2.2. Études et réalisations de chaînes de pilotage pour les avions de combat et de transport subsoniques et supersoniques

Ces chaînes de pilotage remplissent, bien entendu, toutes les fonctions classiques demandées aux pilotes automatiques de cette génération, mais également, pour les programmes d'avions de transport, la fonction atterrissage automatique, qui faisait, par ailleurs, l'objet d'essais systématiques pour sa mise au point (voir paragraphe précédant).

Il est à noter également que l'utilisation de ces pilotes automatiques était très souvent associée à celle d'un directeur de vol comme sur Mirage IV, Concorde et Airbus, et c'est cet ensemble qui constituait le système de conduite de vol de l'avion.

Les applications en série les plus marquantes qui se succédèrent sans interruption furent :
- pour les avions de combat : le Mirage IV et le Mirage F1 ;
- pour les avions de transport : le Concorde (objet d'une coopération SFENA-Elliott) ; l'Airbus A 300 ; le Nord 262 (familles Tapir et Mini Tapir) ; l'Atlantique Mk II pour la Marine nationale.

Le pilote automatique du Mirage IV (PA SFENA 331)

Les premières études de ce pilote automatique furent lancées en 1957. De nombreux problèmes nouveaux étaient à résoudre :
- intégration déjà importante dans les autres systèmes de l'avion : utilisation des centrales gyroscopique et aérodynamique ;
- utilisation à harmoniser avec celle du directeur de vol qui était réalisé également par SFENA ;
- utilisation de servo-moteurs électro-hydrauliques réalisés par la division Équipements de GAMD ;
- nouvelle technologie à base d'amplis magnétiques.

Cette mise au point et cette adaptation ne se firent pas sans poser quelques problèmes, tels des phénomènes de pompage en tenue d'altitude dus à des retards dans les circuits de la centrale aérodynamique, mais elles furent grandement facilitées par le montage d'un pilote automatique prototype sur un avion de servitude du CEV : le Vautour BR9.

Les premiers vols de mise au point sur cet appareil se déroulèrent en 1960, dans une première version à servo-moteurs électriques pour s'adapter aux commandes de vol d'origine du Vautour, puis dans sa version Mirage IV à servo-moteurs électro-hydrauliques en 1961, après modification des commandes de vol du Vautour.

Les équipes étaient constituées de J. Liferman, ingénieur CEV chargé des essais, et de J. Pagnard et J. Charlier de Chily, ingénieurs SFENA.

Parallèlement, chez l'avionneur, un exemplaire de ce pilote automatique était monté sur le Mirage IV A n°01, pour adaptation à l'ensemble de son domaine de vol.

Les vols de mise au point par l'avionneur et ceux de contrôle par le CEV se déroulèrent sur cet appareil en 1961 et 1962.

Les problèmes d'adaptation aux systèmes de bord de l'avion et à son domaine de vol furent bien souvent délicats à résoudre, mais l'ampleur des moyens mis en place (avion de servitude du CEV doublant le Mirage IV) et la coopération étroite entre les différents acteurs de cette coopération firent que ces problèmes, bien que nouveaux, furent résolus sans trop de difficultés et dans les délais voulus : le premier pilote automatique de série sortit d'usine en 1964.

Une deuxième version de ce pilote automatique fut mise au point en 1982 et 1983 pour s'adapter au nouveau système d'armes de la version Mirage IV P, en particulier à sa centrale à inertie, avec une nouvelle fonction, l'approche automatique ILS (hauteur de décision : 200 pieds).

Le pilote automatique du Mirage FI (PA SFENA 505)

Le pilote automatique SFENA du Mirage F1 fut de technologie et de conception voisines de celles du Mirage IV (liaisons avec centrales gyroscopique et aérodynamique de l'avion, commande de servo-moteurs électro-hydrauliques) mais avec, d'emblée, la fonction approche automatique ILS.

Il constitua la deuxième application en série d'un pilote automatique SFENA sur avion de combat supersonique.

Ses études furent lancées en 1966, et ses essais d'adaptation et de mise au point se déroulèrent d'abord sur un avion de servitude, le Mirage III B 01 en 1970 et 1971, puis sur avion Mirage F1 en 1971. Ces essais portèrent principalement sur la mise au point de la fonction approche automatique et sur celle des sécurités nécessaires pour permettre le vol à basse altitude et à grande vitesse (hauteur minimale d'utilisation : 2 000 pieds).

Le premier exemplaire de série sortit en 1973.

Autres réalisations pour avions de combat

D'autres versions de chaînes de pilotage automatique SFENA de même nature, mais de fonctions plus simples furent également mises au point, en 1979 et 1980, pour le Jaguar et le Super Étendard.

Le pilote automatique du Concorde

L'expérience acquise par la SFENA dans le programme Mirage IV et la similitude existant entre les deux avions, tant dans le domaine de vol que dans la conception des commandes de vol, firent que, tout naturellement, SFENA fut associée, dès 1961-1962, pour l'étude et la réalisation du pilote automatique du Concorde, aux sociétés Elliott et Bendix, dans le cadre du consortium international SFENA-Elliott-Bendix.

Bendix apportait sa technologie (circuits, liaisons électriques) et participa au développement des équipements prévus pour les avions prototypes, mais seules SFENA et Elliott assurèrent l'étude et la réalisation des équipements pour les avions de présérie et de série.

La fonction "atterrissage automatique" était demandée à cet ensemble, d'où la conception de ce système avec deux chaînes de pilotage automatique indépendantes pour assurer la sécurité nécessaire, chacune de ces chaînes commandant un des corps d'un servo-moteur électrohydraulique qui, lui-même, actionnait les commandes de vol de l'appareil.

L'utilisation de cet ensemble était étroitement associée à celle d'un directeur de vol réalisé également par SFENA, et dont la conception et la présentation s'inspirèrent directement des idées d'André Turcat, pilote d'essai du Concorde.

Cet ensemble de commandes automatiques de vol comportait également une automanette pour la conduite des moteurs ; branchée automatiquement au-delà de Mach 2 pour la protection de l'appareil, elle servait plus généralement pour la tenue de vitesse, en particulier en approche.

Quelques problèmes d'adaptation furent rencontrés, en particulier dans le vol à haute altitude, en atmosphère tropicale.

Ceci étant, le Concorde 001 effectua ses premiers atterrissages automatiques en mai 1971 et reçut la certification française en catégorie III B (visibilité horizontale de 50 mètres) en 1977.

Le pilote automatique de l'Airbus A 300 B

La SFENA fut retenue en 1972 pour la réalisation du pilote automatique de l'Airbus A 300 B, après une compétition très difficile avec les constructeurs américains. Dans cette compétition, les compétences de la SFENA acquises avec Concorde et l'atterrissage automatique jouèrent un rôle primordial.

Il était, bien entendu, demandé à cet équipement de pilotage automatique de réaliser l'atterrissage automatique en catégorie III B, ce qui entraînait, pour avoir le niveau de sécurité nécessaire, la mise en place de deux chaînes de pilotage automatique indépendantes, autosurveillées, commandant chacune, comme sur Concorde, l'un des deux corps d'un servomoteur électro-hydraulique.

Dans cette première version Airbus, la technologie, bien que très évoluée (utilisation d'amplis opérationnels LM 101) restait analogique.

La certification atterrissage automatique catégorie III B, avec une hauteur de décision de 15 pieds et visibilité horizontale de 50 mètres, fut obtenue en 1979.

La réalisation en série fut confiée au groupement SFENA-Bodenseewerke-Smiths Industries, sous maîtrise d'œuvre SFENA.

Autres réalisations pour avions de transport

S'inspirant directement des matériels essayés sur les avions de servitude du CEV (N 2501, N 262), la SFENA développa, dans les années soixante-dix, toute une famille de pilotes automatiques pour avions de transport, civils ou militaires : les familles Tapir et Mini-Tapir. Le Tapir fut installé sur les Fokker F 27 d'Air Inter et de l'Aéropostale, ainsi que sur les Nord 262 de l'armée de l'Air. Le Mini-Tapir fut retenu pour la version Marine du N 262 en 1980, ainsi que sur la version Mk II du Breguet Atlantique en 1983.

Sur ces derniers appareils, le pilote automatique était utilisé en liaison avec un directeur de vol et était muni de sécurités permettant des missions de longue durée, à basse altitude, au-dessus de la mer.

3. TROISIÈME ÉTAPE (à partir de 1975) : le passage au numérique

Le passage au numérique entraîna une véritable révolution dans la conception des systèmes de pilotage automatique non seulement sur le plan de la technologie, mais également sur le plan de l'intégration corrélative de ces systèmes avec les autres systèmes de navigation et de gestion de l'avion.

Les études sur l'introduction des techniques numériques dans les calculateurs de pilotage automatique commencèrent dès le début des années soixante-dix, tant à la SFENA pour les avions qu'à la SFIM pour les hélicoptères, dans le cadre des marchés d'études du Service technique aéronautique.

Tout d'abord, simple transposition, en numérique, de l'architecture des calculateurs analogiques, elles aboutirent dans un premier stade, en ce qui concerne les avions, à la réalisation d'un pilote automatique, à base du nouveau calculateur SFENA UMP 6800, qui fit ses premiers essais en vol sur un Mystère 20 du CEV, en 1975.

Ces essais permirent à la SFENA de proposer un pilote automatique, en version numérique, pour le Mirage 2000 (PA SFENA 605, à base de calculateur UMP 6800).

Cette version fit ses premiers essais en vol fin 1977-début 1978 sur un Mirage III B de servitude équipé d'une centrale à inertie SAGEM. Elle était conçue pour être reliée au système Digibus mis au point par Électronique Marcel Dassault pour assurer l'interconnexion des systèmes du Mirage 2000.

La mise au point des différentes fonctions (approche automatique, vol à basse altitude 500 pieds, par couplage au radar) se poursuivit dans les années 1979 et 1980, tant sur le Mirage 2000 que sur le Mirage III B de servitude du CEV. Elle aboutit à la sortie en série du premier pilote automatique numérique de conception française pour avion de combat.

Ceci étant, sur avion de combat, ce fut là la dernière mise en œuvre d'une chaîne de pilotage automatique à calculateur séparé, car sur Rafale, dernier programme en cours d'avion de combat, l'intégration des fonctions de pilotage automatique proprement dites dans l'ensemble des systèmes de commandes de vol de l'appareil est totale, à l'exception toutefois de l'auto-manette, marquant ainsi la fin de la spécificité des chaînes de pilotage automatique.

Parallèlement à ces applications sur avion de combat, la SFENA développa également une version numérique de son pilote automatique pour les nouvelles versions d'Airbus.

Contrairement aux avions militaires qui utilisent le Digibus, pour les avions civils les liaisons avec les autres systèmes – systèmes de navigation et surtout le Flight Management System (FMS) véritable cerveau de conduite de l'appareil – se firent suivant l'ARINC 429. Ceci entraîna, bien entendu, toute une série d'études d'adaptation complémentaires non dénuées de difficulté. Une première version de ce pilote automatique fut ainsi montée, en 1980, sur l'A 300 Garuda et certifiée atterrissage automatique catégorie III B en 1980.

Après le Garuda, ce fut l'Airbus A 310 qui fut équipé de cette version et certifié atterrissage automatique catégorie III B en 1983.

Enfin, la dernière version proposée par SFENA, avant qu'elle ne devienne Sextant Avionique, en juillet 1989, fut celle de l'Airbus A 320, avec, dans cet appareil, une intégration encore plus étroite avec les autres systèmes de l'avion : FMS, centrale aérodynamique, etc. Cette version à calculateurs doublés fut certifiée atterrissage automatique catégorie III B en 1987, parachevant ainsi les succès de la SFENA dans le domaine du pilotage automatique.

Comme on peut le voir, le pilote automatique, ou tout au moins ses calculateurs spécifiques restent encore, sur avion civil, une entité séparée, ceci étant dû en grande partie aux problèmes de sécurité liés à l'atterrissage automatique, mais ses relations avec les autres systèmes sont devenues si étroites, si imbriquées que son fonctionnement ne peut plus en être séparé et que sa mise au point nécessite désormais un véritable banc complet de simulation pour vérification de ses liaisons avec les autres calculateurs et la mise au point de ses logiciels.

4. CONCLUSION

Dans une certaine mesure, l'histoire du développement du pilotage automatique en France depuis 1945 présente un caractère exemplaire, car elle permet de se rendre compte combien la persévérance, l'esprit d'initiative, la recherche, dès le départ, d'objectifs ambitieux mais réalistes, la coopération et la bonne entente entre les équipes concernées,

qu'elles soient industrielles ou officielles, permirent à l'industrie aéronautique française d'atteindre, dès les années soixante-dix, un niveau de compétence internationale reconnue par tous, et d'acquérir, dans la conduite du vol des aéronefs dans les conditions d'utilisation et de sécurité les plus délicates, une expérience incontestable et incontestée.

Et même si le pilote automatique, en tant qu'entité indépendante, doit disparaître un jour, cette expérience dans la mise en œuvre de ses fonctions, quel que soit le moyen utilisé, intégré ou pas, restera définitivement acquise.

Marcel CADO

LE PILOTAGE AUTOMATIQUE DES HÉLICOPTÈRES

Contrairement au pilotage automatique des avions, celui des hélicoptères n'avait fait l'objet d'aucune approche particulière jusqu'à la fin des années quarante.

Cependant, l'extension du domaine d'utilisation de ces appareils (hélicoptères de plus en plus lourds, conditions de vol sans visibilité, missions spéciales de certains utilisateurs) se heurta très rapidement aux problèmes de stabilité rencontrés sur ce type d'aéronef, en particulier en vol stationnaire. D'où la nécessité, apparue très vite, de mettre en place des aides au pilotage permettant de répondre à ces nouvelles conditions d'utilisation.

Comme dans beaucoup de domaines, les Américains avaient montré la voie avec leur programme d'hélicoptère lourd de lutte anti-sous-marine Sikorsky HSS IN.

En France, ce fut la Marine nationale, pour les besoins de son futur hélicoptère lourd de lutte anti-sous-marine, qui fut à l'origine du démarrage des études de pilotage automatique pour hélicoptère.

Très vite cependant ces études s'orientèrent dans deux directions :
- pilote automatique complet pour les hélicoptères lourds de transport et de lutte anti-sous-marine ;
- stabilisateur et pilote automatique simplifiés pour les hélicoptères légers.

1. PILOTAGE AUTOMATIQUE DES HÉLICOPTÈRES LOURDS

Pour répondre aux besoins et aux demandes de la Marine nationale, une première phase d'exploration fut lancée en 1955 par le Service technique aéronautique pour mieux appréhender les problèmes spécifiques soulevés par le pilotage automatique des hélicoptères tant sur le plan de l'adaptation à l'appareil que sur celui des conditions d'utilisation.

Les actions s'orientèrent ainsi dans deux directions :
- un examen approfondi de la conception du système de pilotage de l'hélicoptère Sikorsky-HSS IN, dont la Marine avait acquis quelques exemplaires en attendant la naissance du programme Super Frelon ;
- une réalisation expérimentale d'un système de pilotage automatique répondant aux besoins de la Marine.

Des stages chez Sikorsky et des vols d'essais sur la base aéronavale de Saint-Raphaël permirent d'étudier les chaînes de pilotage automatique de l'hélicoptère HSS IN.

En ce qui concerne les problèmes liés aux lois de pilotage nécessaires pour permettre le vol stationnaire automatique en écoute SONAR (mission anti-sous-marine), un hélicoptère HUP 2 (hélicoptère Piasecki bi-rotor) de la Marine nationale fut mis à la disposition des services de la DCAé (Direction des constructions aéronautiques) pour lancer une première phase expérimentale.

1.1. Phase expérimentale

Cette phase expérimentale eut un déroulement relativement original, car menée en dehors des industriels équipementiers qui se verront ensuite confier la réalisation des pilotes automatiques :

– les lois de pilotage en vol stationnaire SONAR, adaptées aux caractéristiques très particulières des hélicoptères furent étudiées par les Giravions Dorand, bureau d'études spécialisé dans la mécanique du vol des hélicoptères à partir des coefficients aérodynamiques, calculés par ce même bureau d'études (à noter qu'en parallèle, des élèves de SUP-AÉRO, à l'occasion de leur projet de 3e année, étudièrent ces mêmes lois de pilotage sur les calculateurs de l'école, avec une très bonne correspondance dans les résultats) ;
– l'adaptation mécanique aux chaînes de commande de vol de l'HUP 2 fut faite par l'atelier aéronautique de l'arsenal de Toulon de la DCN et les lois de pilotage élaborées par un coupleur réalisé par les Giravions Dorand ;
– les vols permettant de vérifier l'adéquation des lois de pilotage se déroulèrent, en 1958, à la CEPA de Saint-Raphaël.

L'expérimentation menée par l'équipage E. Le Moustre-R. Larrieu (ingénieur d'essais CEV) s'avéra quelque peu délicate en raison de la faible autonomie de l'appareil, mais concluante, car confirmant les lois étudiées théoriquement.

1.2. Phase d'application au Super Frelon

L'étude et la réalisation du pilote automatique destiné au futur hélicoptère lourd de lutte anti-sous-marine de la Marine nationale qui devait devenir le Super Frelon SE210 furent confiées à la SFIM (Société de fabrication d'instruments de mesure), sous la responsabilité de J. Delaunay, qui disposait d'une licence de réalisation de calculateurs de pilotage automatique SPERRY.

Mais, si la SFIM disposait ainsi de la technologie d'un calculateur, il lui restait à concevoir, étudier, réaliser et mettre au point un ensemble de pilotage automatique répondant aux besoins multiples de la Marine nationale :
– pilotage automatique en vol de croisière (cap-altitude) ;
– pilotage transparent pour permettre l'intervention permanente du pilote ;
– vol stationnaire automatique en écoute SONAR ;
– transition automatique de la croisière au vol stationnaire.

Il fallait également réaliser l'adaptation aux commandes de vol de l'hélicoptère, à travers un bloc de servo-moteurs électrohydrauliques (déjà monté sur l'hélicoptère Sikorsky HSS IN et qui sera réalisé sous licence par Air-Équipement).

Les essais en vol d'adaptation et de mise au point se déroulèrent en 1962 et 1963, avec la participation et la coopération étroite des équipes de Sud-Aviation, du CEV et de la Marine (ces deux dernières fortes de l'expérience sur HUP2 et HSS IN).

Des problèmes furent rencontrés bien entendu, mais ils furent résolus, sans trop de difficultés, et le pilote automatique SFIM 112S sortit en série à partir de 1967.

Nota : Le choix se porta sur la société SFIM (bien que non spécialisée à l'époque dans les études de pilotage automatique) pour ne pas disperser les efforts des équipes de la SFENA déjà très occupées par leurs études de pilotage automatique pour avion. Cette dernière se verra, par contre, confier les études de chaînes de stabilisation simplifiées, destinées aux hélicoptères légers, dérivées des chaînes de servo-amortisseurs pour avion de combat.

1.3. Les familles de pilotes automatiques SFIM pour hélicoptères

Du pilote automatique SFIM 112 S devait dériver toute une série de pilotes automatiques pour hélicoptère dont l'évolution de la définition, tant au point de vue de la technologie que pour la sécurité, traduit bien l'évolution des équipements de pilotage des dernières décennies.

Après le Super Frelon, la SFIM dériva en 1968 une deuxième version de son PA 112 S, le PA 127, de technologie très voisine mais réduit aux fonctions de base permettant le vol sans visibilité (tenue de cap et d'altitude). Sur le plan de la sécurité, toujours critique pour un hélicoptère dans ces conditions de vol, le PA 127 disposait d'un système de passivation des pannes par surveillance du fonctionnement des chaînes de pilotage. Cette version fut retenue pour les premières séries du SA 330 PUMA.

Elle fut suivie en 1972-1973 par les versions PA 137 et 139 toujours destinées aux hélicoptères de transport (Puma et Super Frelon export) mais de technologie plus élaborée avec une intégration des sécurités dans une chaîne simple auto-surveillée. Plusieurs centaines de ces matériels furent réalisées dans les années soixante-dix.

Parallèlement à ces réalisations industrielles, le CEV mena dans les années soixante-dix toute une campagne d'essais sur le pilotage des hélicoptères dans les conditions de vol par mauvaise visibilité, tant en croisière qu'en approche sous forte pente.

Les difficultés rencontrées pour assurer la sécurité du vol avec un appareil intrinsèquement instable et dont les qualités de vol se sont plutôt dégradées, avec l'apparition de nouveaux types d'hélicoptères, conduisirent à une double conception pour les chaînes de pilotage automatique, suivant que l'appareil dispose d'un équipage à deux ou à un seul pilote.

Pour les hélicoptères à deux pilotes, un PA monochaîne, avec chaîne de surveillance pour éviter les écarts brutaux en cas de panne, fut considéré comme suffisant ; en revanche, avec un seul pilote, il fut considéré comme indispensable d'avoir un PA, double chaîne *fail operative*, c'est-à-dire permettant par reconfiguration manuelle ou automatique de poursuivre le vol automatique après une première panne.

De la prise en compte de cette philosophie de la sécurité, la SFIM conçut deux nouvelles familles de pilote automatique dans les années 1977-1980 :

- un PA simplifié, le PA 85, qui fut installé sur l'hélicoptère Gazelle, puis sur Ecureuil, et plus récemment sur hélicoptère Bell 407 aux États-Unis, avec options multiples à la demande du client ;
- la famille des PA 155 qui équipa le Super Puma et le Dauphin, comprenant deux chaînes de pilotage fail operative avec reconfiguration manuelle et une fonction approche automatique avec, en option, un quatrième axe de pilotage (pas collectif).

Les servo-moteurs de ces PA étaient constitués soit par un bloc électro-hydraulique Sikorsky à double entrée (Super Puma), soit par des vérins électriques à sécurité intégrée (Dauphin).

1.4. Introduction des technologies numériques

Tous les types de pilote automatique précédents conçus jusqu'aux années quatre-vingt utilisaient une technologie fondamentalement analogique, tout en comportant de plus en plus de circuits opérationnels intégrés. Comme pour les pilotes automatiques avion, un marché d'études pour la numérisation des calculateurs de pilotage fut passé à la SFIM par le STAé dans les années soixante-dix.

Ceci conduisit, au début des années quatre-vingt, à la réalisation d'un coupleur de vol CDV 155 utilisant un calculateur numérique à microprocesseur avec commande directe du pas collectif, en liaison avec un PA 155 analogique sur les autres chaînes ; cette installation fut montée sur des hélicoptères Super Puma et Dauphin.

Cette première application du numérique fut suivie, à la fin des années quatre-vingt, par la réalisation d'un pilote automatique complet à quatre chaînes numériques duplex, le PA SFIM 165, installé sur le Super Puma MK II et proposé à l'exportation pour l'Afrique du Sud et l'Inde.

Cette évolution technologique permit de faire un dernier saut en 1994-1995 avec l'apparition du concept "Avionique modulaire intégrée", retenue pour les nouveaux hélicoptères d'Eurocopter, qui fit l'objet d'un accord SFIM/Sextant/Eurocopter pour la définition de l'ensemble visualisation-pilote automatique.

Le pilote automatique "Avionique nouvelle" se caractérise par des calculateurs sous forme de modules insérés dans des racks, une généralisation des liaisons numériques (avec les vérins notamment) et le développement de nouveaux vérins et de postes de commande plus compacts, plus légers et plus fiables.

La dernière application est celle liée à l'hélicoptère Eurocopter NH 90, qui présente la particularité d'avoir des commandes de vol entièrement électriques.

Pour cet hélicoptère, la SFIM développe le FCC (Flight Control Computer). Chaque FCC (au nombre de deux par hélicoptère) est composé de deux chaînes numériques (chaîne active/chaîne moniteur) et deux chaînes analogiques (chaîne active/chaîne moniteur).

Les chaînes numériques et analogiques sont complètement indépendantes et dissemblables en termes de conception et de technologie de mise en œuvre.

En cas de dysfonctionnement d'une chaîne, le contrôle est repris par une autre chaîne selon la priorité suivante :

- chaîne numérique FCC1 ;
- chaîne numérique FCC2 ;
- chaîne analogique FCC1 ;
- chaîne analogique FCC2.

Cet ensemble quadruplex assure ainsi à l'appareil un niveau de sécurité très élevé, tant pour l'accomplissement de la mission que pour la survie de l'appareil.

En résumé, les grandes étapes dans le développement du pilotage automatique des hélicoptères furent les suivantes :

- 1956 : lancement des études de base sur les lois de pilotage ;
- 1959 : lancement de l'étude du PA du Super Frelon ;
- 1967 : sortie en série des premiers pilotes automatiques ;
- 1972/1973 : PA avec sécurité intégrée pour Puma et Super Puma export ;
- 1977/1980 : PA analogique fail operative pour Super Puma et Dauphin ;
- 1983 : première chaîne de pilotage numérique des modes supérieurs (pas collectif) , pour application aux Dauphin et Super Puma. ;
- 1988/1990 : PA entièrement numérique pour Super Puma MK II ;
- 1995 : PA numérique répondant au concept Avionique modulaire intégrée, destiné aux nouveaux appareils d'Eurocopter (EC 135-EC 155) ;
- ensemble de pilotage à chaînes numériques et analogiques pour le NH 90 à commandes de vol électriques.

2. PILOTAGE AUTOMATIQUE DES HÉLICOPTÈRES LÉGERS

Parallèlement aux études de pilotage automatique des hélicoptères lourds, il était également apparu intéressant de développer, à partir de matériels existants, un équipement plus simple, ayant, pour fonction principale, l'amélioration des qualités de pilotage des hélicoptères, en particulier en vol stationnaire.

Ces matériels furent réalisés par la SFENA à partir des servo-amortisseurs pour avions (Vautour, SMB2) utilisant les mêmes éléments (amplificateurs, gyromètres, vérins) mais avec des lois de pilotage adaptées aux caractéristiques de l'hélicoptère.

Le lancement de ces études put ainsi se faire très rapidement en 1956 et, dès mai 1957, un premier vol eut lieu sur une Alouette II pilotée par J. Boulet, chef pilote des essais en vol de Sud-Aviation. Les essais de contrôle du CEV se firent quelques mois plus tard, fin 1957, sous la responsabilité de R. Larrieu. De cette chaîne de base expérimentale fut dérivée la famille des Servo amortisseurs série (SAS) SHERPA qui, après essais de mise au point au CEV de Brétigny fut retenue, en 1967, pour l'équipement de la flotte des Alouette III antichar de l'ALAT (équipée par ailleurs d'une lunette de visée stabilisée SFIM et missiles antichar SS 10-SS 11).

En 1968, une deuxième famille, le SAS Ministab fut développée pour équiper les hélicoptères Gazelle du programme franco-britannique. Elle fut commandée en série en 1970 et réalisée à plus de 1 000 exemplaires.

Cet équipement fut également proposé à l'exportation où il rencontra un certain nombre de succès, liés à sa simplicité et à son coût relativement bas :

- commande de SAS SHERPA pour les Alouette III de la Marine indienne, en 1969 ;
- obtention d'un supplément de certification de type (procédure obligatoire aux États-Unis pour l'utilisation d'un équipement nouveau jouant sur la sécurité d'un aéronef) sur hélicoptère Bell 206 Jet Ranger aux États-Unis, en 1973 ;
- adaptation à l'hélicoptère Agusta-Bell 212 et développement d'un pilote automatique simplifié, l'Helistab, en 1974. Ce matériel fut commandé en 1975 pour équiper 12 Agusta-Bell de la Marine espagnole ;
- en 1975 également, obtention de la certification IFR sur Agusta-Bell 212, avec un ministab Duplex.

Ces succès à l'exportation furent malheureusement endeuillés par l'accident survenu fin 1975 à l'hélicoptère de démonstration Agusta, au cours duquel disparut l'ingénieur d'essais de la SFENA R. Lafouasse, fils de l'ingénieur en chef Lafouasse, du Service technique aéronautique.

Le développement de ces activités aux États-Unis entraîna la création, en 1977, d'une filiale de la SFENA à Santa-Clara (Californie). Cette filiale SFENA Corporation reçut un contrat de l'US Navy pour développer un équipement destiné à la version Marine TH 57 (Trainer Helicopter) du Bell 206 B utilisé pour l'entraînement IFR des équipages de l'US Navy et des Marines. Cette version fit l'objet d'une commande d'une cinquantaine d'exemplaires en 1982.

Enfin, en 1983 et 1984, des suppléments de certification de type pour une version Ministab, couplée avec un calculateur-directeur de vol numérique SFENA, furent obtenus sur le Bell 206 Long Ranger et le Bell 222 de la police de New-York.

L'histoire de ces SAS Ministab est une illustration d'une application, réussie à moindres frais, des chaînes de pilotage déjà développées pour les avions, application couronnée par des succès industriels à l'exportation, en particulier sur le marché américain. Sur le marché français, cet équipement dans la version pilote automatique simplifié fut également retenu pour l'hélicoptère Tigre de l'Aérospatiale, en préférence à un pilote automatique SFIM, plus complet, mais, bien entendu, de prix plus élevé (à noter que cet hélicoptère ne peut être, à proprement parler, classé dans les hélicoptères légers).

3. PILOTAGE AUTOMATIQUE D'HÉLICOPTÈRES TÉLÉCOMMANDÉS

Pour illustrer la maîtrise à laquelle les équipes des industriels et du CEV étaient parvenues dès les années soixante dans le pilotage automatique des hélicoptères, il est intéressant de rappeler l'expérience de l'hélicoptère télécommandé.

Ce programme fut lancé par la Marine nationale, en concurrence avec le programme Malafon, pour la défense anti-sous-marine.

L'étude en fut lancée en 1960 et la réalisation des chaînes de pilotage, dérivées de chaînes de pilotage avions, fut confiée à la SFENA. Après quelques mois de mise au point au CEV de Brétigny, les essais d'appontage eurent lieu en 1963, en Méditerranée, sur la frégate La Galissonnière, avec, comme télépilote, R. Larrieu.

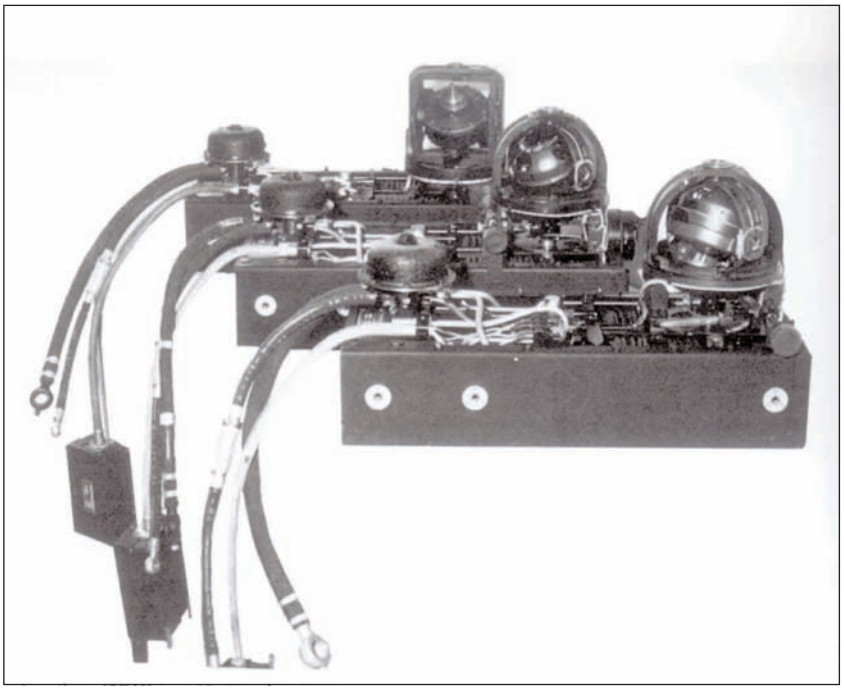
Quoique quelque peu acrobatique, cette expérience peut être considérée comme une réussite, même si elle ne fut pas suivie d'un lancement en série.

Marcel CADO

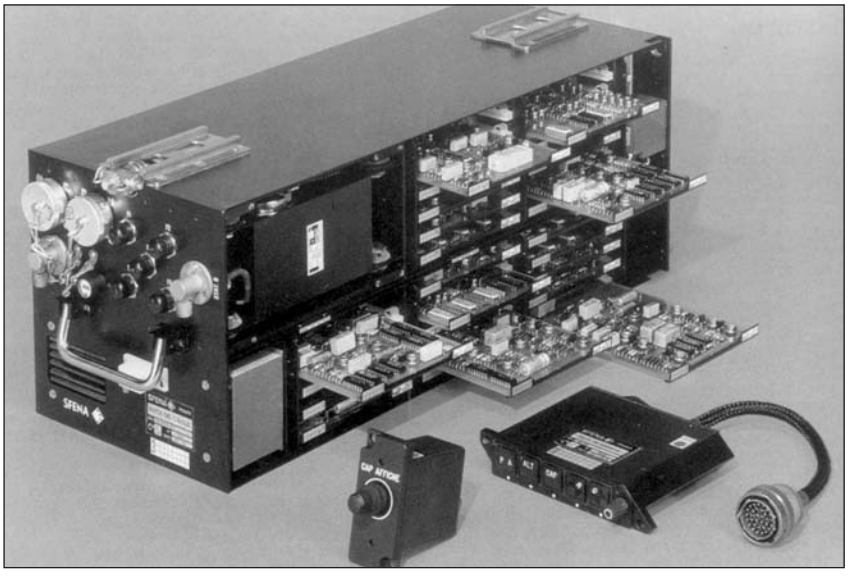
Nota : Cette annexe a été rédigée avec le concours de :

- Raymond DEQUÉ, ancien ingénieur à la Direction Technique de Sud-Aviation ;
- Roger LARRIEU, ancien ingénieur Essais en vol à la Section Équipements 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 (anciennement division de la SFIM).

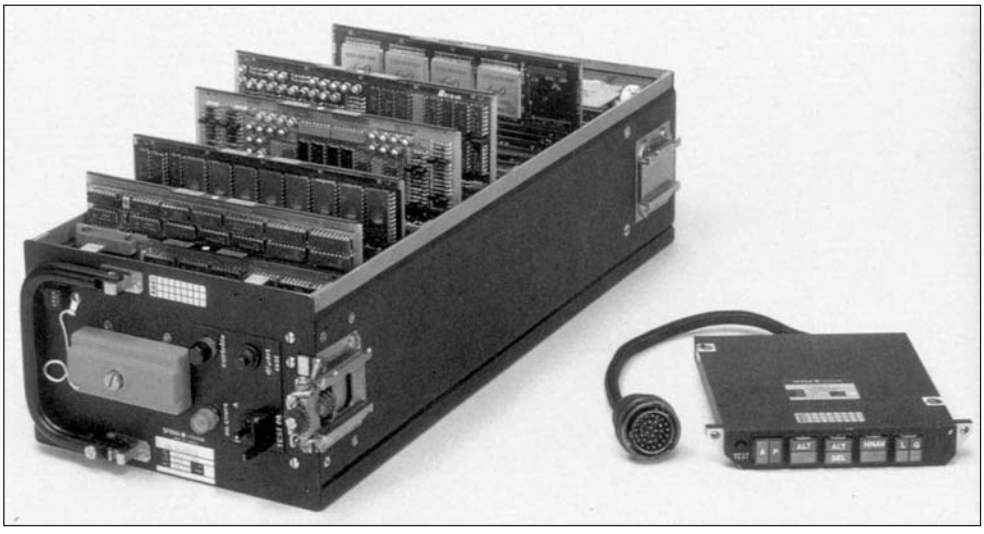
Références : Rapport d'essais en vol du CEV de 1958 à 1989.



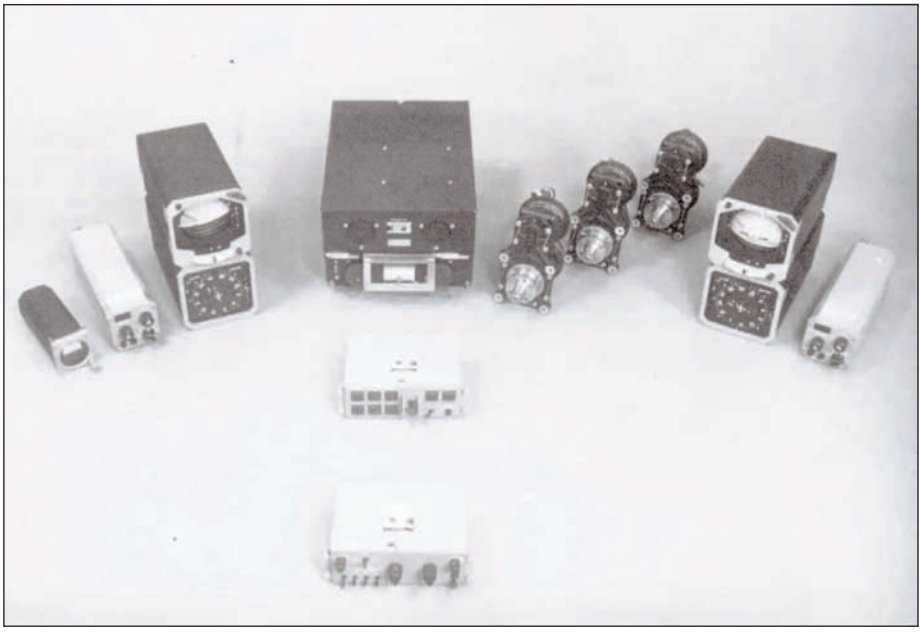
Pilote automatique Alkan type 15 du Noratlas (1951) (Source GIFAS).



Pilote automatique SFENA type 505 du Mirage F1 (1970) (Source GIFAS).

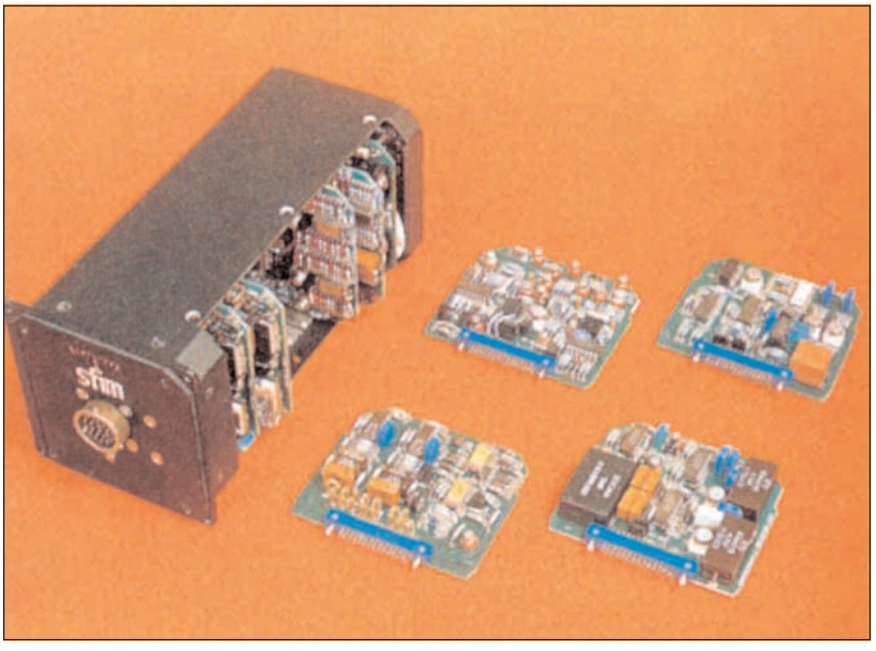


Pilote automatique SFENA type 605 du Mirage 2000 (Source GIFAS).



Pilote automatique SFENA type 705 de l'Atlantique ANG (1977) (Source GIFAS).

Pilotes automatiques SFENA pour hélicoptères (Source GIFAS).



Calculateur du pilote automatique SFIM type 85 pour hélicoptères Gazelle et Ecureuil (Source GIFAS).

ANNEXE A 4

LES SIMULATEURS DE VOL

Dans les simulateurs de vol, on peut distinguer deux grandes familles de réalisations :
- le simulateur d'étude, destiné à la mise au point au sol des équipements et systèmes d'un aéronef, en reproduisant les conditions d'utilisation et les conditions de pannes pour vérifier leur bonne adéquation aux spécifications imposées et aux performances désirées, et ceci quelles que soient les modifications appliquées aux matériels ;
- le simulateur d'entraînement, permettant de créer au sol des conditions d'entraînement identiques à celles rencontrées par le pilote en vol, afin de réduire le temps et les dangers de l'apprentissage sur un véritable aéronef, en recréant, en particulier, non seulement les conditions normales de vol, mais également toutes les situations de panne et conditions météorologiques susceptibles d'être rencontrées en vol.

Sans nier l'importance technique des simulateurs d'étude dans le développement des programmes d'aéronefs, ils n'ont pas, sur le plan industriel et économique, le même impact que les simulateurs d'entraînement qui font l'objet d'un véritable développement industriel, tout à fait comparable à celui des aéronefs et des matériels aéronautiques associés. Nous nous attacherons donc essentiellement à retracer l'histoire de la grande famille des simulateurs d'entraînement, en France.

1. NAISSANCE DE L'ACTIVITÉ SIMULATION

La situation en 1945

Après la guerre 1939-1945, la société LMT (Le Matériel Téléphonique) reprit, en marge de ses activités principales qui étaient la production de matériels de télécommunication, la fabrication d'entraîneurs dérivés de l'appareil américain communément appelé Link Trainer. Ces appareils ne représentaient pas un avion particulier, mais ils permettaient d'initier au pilotage et aux procédures de navigation. Le mouvement du poste de pilotage créait une certaine ambiance de vol, mais avec un réalisme assez limité. Ces appareils faisaient appel, pour les mouvements de la cabine, aux techniques électromécaniques et pneumatiques.

La société LMT réalisa ainsi sous licence jusqu'en 1948 l'entraîneur au PSV LMT type 10, puis, à partir des années cinquante, l'entraîneur au PSV LMT type 141 qui fut construit à plus de soixante exemplaires entre 1953 et 1958. Mais LMT n'était pas encore en mesure de suivre techniquement l'évolution des entraîneurs et d'arriver au niveau de qualité de simulation que les Américains et les Britanniques avaient atteint.

Les différents acteurs concernés

Au début des années cinquante, d'importants progrès furent réalisés dans les calculateurs analogiques (réponse des servo-moteurs, stabilité des amplificateurs, qualité des potentiomètres). Les performances de ces chaînes de calcul permettaient d'envisager la réalisation de véritables simulations reproduisant les caractéristiques des aéronefs.

Pour ces premières réalisations de simulateurs, au sens propre du terme, trois sociétés étaient en course :

– LMT, bien sûr, forte de son expérience dans le domaine des entraîneurs ;
– SEA (Société d'électronique et d'automatisme) qui avait acquis une grande réputation dans le domaine des calculateurs, grâce, en particulier, aux études lancées par son créateur F.H. Raymond ;
– Giravions Dorand, petite société à surface financière limitée, mais qui avait réalisé sur contrat du Service technique aéronautique (Section voilures tournantes) le simulateur d'étude pour hélicoptère DX 50, en 1954-55. Ce simulateur comportait une cabine de pilotage, un système de visualisation et une simulation (déjà) des oscillations de l'appareil en roulis et en tangage. La société Giravions Dorand avait également réalisé, sur contrat du Service technique (Section équipements), un entraîneur pour avion école Stampe destiné à la base-école de Saint-Yan, sur crédits de l'aviation civile. Elle disposait, pour ses études, d'une équipe d'une dizaine d'ingénieurs, dirigée par un ingénieur britannique, S.M. Poole, transfuge de Redifon UK.

En face de ces industriels-réalisateurs :
– les avionneurs : GAMD, SNCASO, SNCASE, SNCAN, Breguet, et les principaux fabricants d'équipements et d'armements avaient à fournir aux fabricants de simulateurs les données (paramètres aérodynamiques, caractéristiques de fonctionnement, enregistrements sonores, etc.) ainsi que des matériels, comme le poste complet de pilotage ;
– les services officiels : état-major de l'Air , état-major de la Marine, Direction des constructions aéronautiques, Comités directeurs des programmes internationaux (Atlantic, Concorde), l'aviation civile ;
– les compagnies aériennes, futures clientes de ces simulateurs, comme Air France et Air Inter.

Les premiers simulateurs

Les premières demandes se firent en 1957. Elles concernaient la réalisation, en deux exemplaires, d'un simulateur d'entraînement pour le Nord 2501 de l'armée de l'Air, ainsi que la réalisation d'un simulateur de Caravelle pour Air France.

La première fut confiée aux Giravions Dorand (dont l'équipe avait été renforcée, à cette occasion, par l'intégration de S.M. Poole) et la deuxième à la SEA. Mais ces deux programmes eurent des fortunes diverses : l'État, pour cause de restrictions budgétaires, annula la commande des simulateurs du Nord 2501, et la SEA rencontra de nombreuses difficultés dans la réalisation du simulateur de la Caravelle, qui fut livré avec plus d'un an de retard. La SEA reçut, par ailleurs, pratiquement à la même époque, la commande pour l'armée de l'Air de deux simulateurs du SO 4050 Vautour, sur contrat du Service technique aéronautique (Section avions), mais elle rencontra, pour ceux-ci également, beaucoup de difficultés dans leur réalisation et leur mise au point.

Le simulateur du Mirage III

C'est dans ce contexte que se déroula la consultation pour la réalisation de deux simulateurs demandés par l'armée de l'Air pour son Mirage III. Le choix du Service technique aéronautique (Section équipements, qui devait regrouper toute l'activité simulateurs) se porta sur la société LMT, pour les raisons suivantes :
–SEA n'était pas en mesure de présenter une offre crédible, tant qu'elle n'avait pas mené à bien la réalisation des simulateurs du Vautour ;
– Giravions Dorand maîtrisait bien les techniques de simulation et possédait une équipe de haut niveau technique, mais n'avait pas la surface financière (surtout après l'annula-

tion du programme Nord 2501) ni les moyens industriels suffisants pour se voir confier un tel programme de simulateurs (la réalisation d'une dizaine d'exemplaires était en effet envisagée).

Restait LMT, mais celle-ci n'avait guère évolué de la technique Link à la véritable technique simulateurs et proposait une licence américaine. Finalement, encouragées par les services officiels, LMT et Giravions Dorand se rapprochèrent pour faire jouer leurs atouts respectifs, ce qui se traduisit par le transfert, chez LMT, de l'équipe simulateurs Giravions Dorand, avec S.M. Poole, comme responsable du projet.

Cet accord fut conclu en 1958 et les deux simulateurs Mirage III C, réalisés entre 1959 et 1960, furent livrés dans les délais voulus à l'armée de l'Air, l'un sur la base de Mont-de-Marsan, l'autre sur celle de Colmar. Les réceptions de ces matériels s'effectuèrent dans de bonnes conditions, avec l'aide des pilotes du CEV et du CEAM de Mont-de-Marsan.

Grâce à l'inventivité et au dynamisme de l'équipe Poole-LMT, associés aux moyens industriels d'une grande société comme LMT, on aboutit ainsi à la réalisation d'un matériel de qualité équivalente à celle des réalisations américaines. Ce simulateur était, d'ailleurs, le premier au monde à être entièrement transistorisé. Il était capable de tenir, avec ses quatre baies d'électronique, dans une seule remorque de camion, comme le voulait l'armée de l'Air. Robuste et fiable, avec une qualité de simulation excellente, il obtint également un grand succès à l'exportation (Australie, Afrique du Sud) et plaça ainsi LMT dans le groupe des réalisateurs de simulateurs d'entraînement au niveau international.

Entre 1961 et 1970, LMT fabriqua une dizaine de simulateurs pour les différentes versions françaises et export du Mirage III, la version Mirage III E avion d'attaque au sol, étant d'ailleurs complétée par un simulateur de radar CAE (Canadian Aviation Electronics).

Autres réalisations

En 1959, l'étude et la réalisation du simulateur de l'Étendard IV Marine furent également confiées à LMT, après consultation de SEA et de LMT (choix du moins-disant). Ce simulateur d'entraînement comportait un système de visualisation particulièrement intéressant pour l'appontage sur porte-avions, avec maquette du porte-avions et caméra mobile reproduisant les mouvements de l'appareil.

En 1960, un simulateur de Caravelle, financé sur crédits de l'aviation civile et destiné à Air France, fut également commandé à LMT par le Service technique aéronautique (Section équipements), pendant que SEA livrait le sien, avec plus d'un an de retard dû aux nombreuses difficultés rencontrées.

Toujours en 1960, un appel d'offres fut lancé, dans le cadre de l'OTAN, par le comité directeur du Breguet Atlantic, pour la réalisation d'un simulateur tactique de cet appareil. Le choix du réalisateur se fit après une consultation internationale qui incluait des sociétés américaines et canadiennes, avec certaines règles de répartition du travail à respecter. Cette consultation fut préparée par la Section avions et par la Section équipements du Service technique aéronautique qui procédèrent à l'établissement des clauses techniques et à l'évaluation des offres des industriels. À cette occasion furent conclues des alliances entres industriels français, américains et britanniques. Finalement, ce fut SEA, associée à LINK, qui remporta le contrat, devant LMT et CAE.

En 1964, la compétition pour le simulateur d'étude du Concorde trouva de nouveau, face à face, SEA et LMT. Grâce à une proposition technique d'avant-garde (utilisation d'un calculateur numérique très bien adapté pour la simulation), LMT remporta cette compétition et put ainsi réaliser, en 1967, son premier simulateur avec un mouvement cabine (celui-ci était réalisé par CAE). Ce simulateur fut installé à Toulouse, dans les locaux de Sud-aviation et fut associé à un banc de commandes de vol pour étudier Concorde dans ses différentes configurations d'utilisation.

Ce programme fut le dernier à faire l'objet d'une confrontation directe franco-française, car en 1966 SEA disparut, du fait du Plan Calcul, malgré ses remarquables créations en informatique et des réalisations incontestables, même si elles avaient rencontré certaines difficultés, dans le domaine des simulateurs d'avions civils et militaires.

À partir de cette date, restée pratiquement le seul industriel français dans ce secteur, LMT développa rapidement cette activité et put ainsi, grâce à son marché captif français, relever avec succès le défi de l'exportation.

2. DÉVELOPPEMENT DE L'ACTIVITÉ SIMULATEURS

À partir de 1970, le développement de cette activité, bien assise sur le marché captif national, se fit, d'une part, dans le sillage de l'exportation des matériels militaires français : avions Mirage, hélicoptères, d'autre part, grâce à la percée de LMT dans le secteur de l'aviation civile. Il faut aussi signaler le développement de l'activité de LMT dans les simulateurs de char de combat et de conduite de véhicules terrestres.

Sur le plan militaire, aux simulateurs Mirage III E et Étendard IV, vinrent s'ajouter, dès 1970, le simulateur de l'avion de transport militaire Transall et celui de l'hélicoptère SA 330 Puma, simulateur qui fut le premier d'une longue famille de simulateurs d'entraînement pour hélicoptères (une vingtaine réalisée pour les appareils de l'ALAT, Aviation légère de l'armée de Terre : Puma, Super Puma, Gazelle, Tigre...).

À la fin des années quatre-vingt furent également réalisés :

– un simulateur pour le Super Étendard de la Marine nationale ;
– deux autres simulateurs Transall ;
– un simulateur pour le Mirage F1 ;
– quatre simulateurs pour le Mirage 2000 de l'armée de l'Air française.

À ceux-ci s'ajoutèrent six simulateurs Mirage 2000 pour l'exportation, mais également une quinzaine de simulateurs de l'avion américain F 16 pour diverses armées de l'Air étrangères.

Au total, ce sont plus de 180 simulateurs de tous types que la division Simulateurs de LMT, devenue en 1980 division Simulateurs de Thomson-CSF, aura réalisés pendant ces trente dernières années pour le compte des armées françaises et étrangères, dont plus de 150 en tant que maître d'œuvre, plus de 50 pour les armées françaises (Air, Mer, Terre) et une cinquantaine pour les armées britanniques.

Dans le domaine de l'aviation civile, la réalisation du simulateur Concorde, puis ultérieurement celles des simulateurs des avions Caravelle et Mercure d'Air France ouvrirent à LMT la voie du marché de l'aviation civile.

Dans ce domaine, si le volume d'affaires est important, la concurrence y est très rude, car les compagnies aériennes sont uniquement préoccupées, à juste titre, par la rentabilité de leurs investissements, sans aucune priorité nationale. Le développement de l'activité de

LMT s'y fit surtout grâce à l'Airbus, car la concurrence internationale, américaine et britannique croyait peu à l'avenir de cet avion et ne s'était donc pas préparée pour l'étude de son simulateur.

À ce jour, plus d'une centaine de simulateurs ont été réalisés pour les différents types d'Airbus. Sur sa lancée, la division Simulateurs a également réussi à s'implanter chez les clients de Boeing, en réalisant plus de 200 simulateurs pour les familles d'avions Boeing.

C'est ainsi que, actuellement, plus de 80 compagnies aériennes sont devenues ses clients !

3. LA SITUATION ACTUELLE

Évolution de la technologie

Dans la réalisation d'un simulateur, le calculateur, élément essentiel des matériels des années soixante et soixante-dix, a perdu petit à petit de son importance. Il est de plus en plus souvent remplacé par des calculateurs standards, chargés des programmes de calcul, intégrant très souvent les logiciels utilisés par les systèmes montés sur avion (avions civils) ou utilisant des éléments réels (avions militaires) ayant leur propre programmation, et assurant les liaisons entre le poste instructeur, les réseaux et générateurs tactiques, et les dispositifs d'interface avec le poste de pilotage, le mouvement cabine et surtout le système de visualisation procurant aux pilotes une vue de plus en plus réaliste de l'environnement extérieur.

Les systèmes à maquette et caméra ont laissé, en effet, la place à la génération d'images synthétiques utilisant les bases de données les plus diverses pour la représentation de terrains réels, de zones entières de missions, de pistes d'atterrissage, etc.

Plusieurs systèmes ont été ainsi développés par LMT, devenue en 1977 division Simulateurs de Thomson-CSF, puis aujourd'hui de Thales :

- systèmes VISA, utilisés dans les simulateurs Mirage 2000 N, Super Étendard et dans le centre de simulation du CEV d'Istres ;
- système SPACE.

Mais un nouveau venu dans le domaine de la simulation, SOGITEC, filiale de Dassault-Aviation, est devenu dans l'activité visualisation (voir le paragraphe suivant pour les autres domaines d'activité de SOGITEC) le principal fournisseur, en France, de systèmes de génération d'images (gammes Apogée et Médaillon).

Ces systèmes sont dans la lignée des pionniers de la synthèse d'images temps réel : les machines G I 1000 et G I 10000 utilisées dans les simulateurs d'hélicoptère du CELAR et de l'ALAT. Ils sont installés dans les simulateurs des Mirage 2000-9 et F 16 destinés aux Émirats, dans celui des Mirage 2000-5 destinés à Taiwan, et dans les simulateurs du Tornado, du Hawkeye et de l'Awacs (américain et allemand).

En dehors du générateur d'images, le système de visualisation comporte également un système de présentation proprement dite de ces images, utilisant :

- soit le casque ;
- soit la projection directe sur écran, ce qui offre un champ de vision important (avions de combat) ;
- soit des images collimatées apportant plus de confort, mais avec un champ plus limité (avions de transport et hélicoptères).

Autre élément important du simulateur : le mouvement cabine, utilisé pratiquement systématiquement, dont la conception reste classique avec calculateur numérique et vérins électriques et hydrauliques, mais qui reste souvent réalisé par le maître d'œuvre simulateur (Thales-CAE).

La situation industrielle et commerciale

Sur le plan national

THALES

Le principal réalisateur de simulateur sur le plan national reste, bien entendu, la division TT&S de Thales (Thales Training & Simulation), issue de la division Simulateurs de LMT, avec deux centres principaux :

- l'un en France, à Cergy-Pontoise (650 personnes) pour les avions militaires, les hélicoptères, les chars et véhicules terrestres, dont les prochains objectifs sont le simulateur de l'hélicoptère NH 90. Ce centre assure la formation des pilotes d'Eurocopter, en liaison avec cette société et, dans le cadre d'un consortium européen, il participe à la réalisation de 27 simulateurs pour l'avion Eurofighter ;
- l'autre au Royaume-Uni, à Crawley (1200 personnes dans les locaux de la société Redifon/Rediffusion, absorbée par Thomson-CSF en 1994 (belle revanche, quand on se souvient de la situation dans les années 1960-1970), qui se consacre essentiellement aux simulateurs d'avions civils (Airbus, Boeing).

SOGITEC

La division TT&S de Thales est maintenant concurrencée, sur le plan national et à l'exportation, par SOGITEC, filiale de Dassault-Aviation. Le développement de cette société dans l'activité simulateurs étant relativement récent, les faits marquants de ce développement sont rappelés ci-après.

Créée au début des années soixante, cette société avait son activité initiale principalement orientée vers la documentation, en particulier pour la maintenance et les procédures de contrôle, d'où le développement progressif d'outils pour l'entraînement dans l'application de ces procédures et, plus généralement, pour la simulation de la maintenance.

Ces simulateurs de maintenance étaient, en particulier, destinés aux programmes export des avions Dassault (Alphajet, Mirage F 1, Super Étendard).

Devenue en 1984 filiale de Dassault Aviation, SOGITEC développa son activité, non seulement dans la réalisation de simulateurs de maintenance, mais également dans celle de simulateurs de mission (partielle ou totale), avec systèmes de projection d'images de synthèse et des reconstitutions de cockpit. De nombreux simulateurs de ce type furent livrés aux pays ayant acheté le Mirage 2000 export (Inde, Egypte, Pérou, Abou Dhabi).

En 1990, SOGITEC réalisa sa première percée dans le domaine, jusque-là réservé, de la défense nationale, en se voyant confier la réalisation du simulateur SHERPA (hélicoptères Puma et Super Puma) destiné à la base-école du Luc de l'armée de Terre.

Ce fut ensuite, au début des années quatre-vingt-dix, la réalisation de trois entraîneurs aux missions de navigation-bombardement pour les Mirage 2000 D de la base aérienne de Nancy, puis celle d'un simulateur complet de missions, avec mouvement cabine spécifique des vols à basse altitude, toujours pour ces Mirage 2000 D.

Parallèlement, SOGITEC, dans le sillage de sa maison-mère, poursuivit le développement de son activité à l'exportation, avec la réalisation d'un simulateur complet accompagnant la livraison des Mirage 2000 5 de Taiwan, ainsi que de deux entraîneurs de mission pour ces mêmes Mirage et pour ceux du Qatar.

En 1998, SOGITEC reçut la commande de la rénovation du Centre d'entraînement au combat du CEAM de Mont-de-Marsan (projet CEC) particulièrement performant avec ses simulateurs pilotés fonctionnant en liaison avec des serveurs de situations tactiques très évolués. Ce centre doit être mis en service début 2004.

Parmi les dernières réalisations en cours, il faut également mentionner celle de deux entraîneurs de mission pour le Rafale Marine (Base aéronavale de Landivisiau et porte-avions Charles-de-Gaulle), et, sous la maîtrise d'œuvre de Dassault-Aviation, celle de quatre simulateurs de mission pour le Rafale Air et de quatre autres pour le Rafale Marine.

De nouvelles commandes à l'exportation sont également à signaler :

des simulateurs et entraîneurs de mission pour les Mirage 2000-9 d'Abou-Dhabi et pour les Mirage 2000-5 de la Grèce ;

plusieurs commandes de systèmes de visualisation, pour le Hawkeye, pour le F 16 d'Abou-Dhabi et pour l'Eurofighter.

Avec ses effectifs de 600 personnes et ses deux centres de Suresnes et de Bruz, SOGITEC est devenue ainsi un acteur reconnu, dans le domaine de la simulation, tant sur le plan national que sur le plan international.

Sur le plan international

Sur le plan international, le principal concurrent de Thales reste CAE (Canadian Aviation Electronics), numéro 1 mondial de la simulation, forte de ses 4 000 employés et de ses filiales allemande et britannique, ces deux industriels se partageant pratiquement le marché de l'aviation civile (70 % pour CAE, 30 % pour Thales).

Aux États-Unis, restent deux constructeurs importants :

– Lockheed-Martin, qui se consacre aux programmes militaires (F 16, chars) ;

– Raytheon-LINK.

À signaler également, mais de moindre importance, Flight Safety (spécialiste des centres de formation) et un département de Boeing.

C'est donc une ascension particulièrement remarquable que l'activité simulateurs a réussie en France et dans le monde, à partir de la petite division simulateurs de LMT, avec aujourd'hui deux acteurs bien en place, Thales, l'héritier, bien sûr, qui s'est hissé au niveau des plus grands sur le plan international, mais qui est solidement complété par SOGITEC.

Marcel CADO

Annexe rédigée avec le concours de :

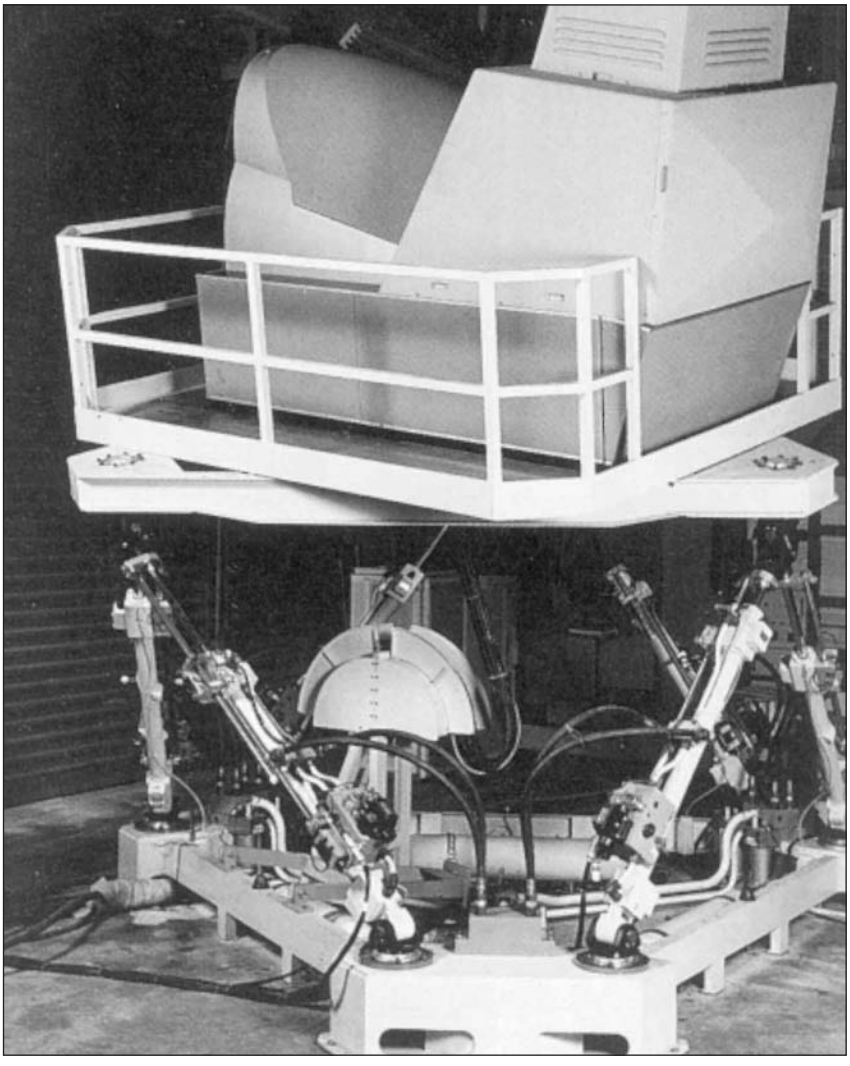
– Gilbert BONN, Ingénieur Général de l'Armement, ancien ingénieur à la sous-section Pilotage de la Section Équipements du Service Technique Aéronautique, en charge des études de simulateurs ;

– Jean MAYOU, Directeur de la division Électronique de SOGITEC ;

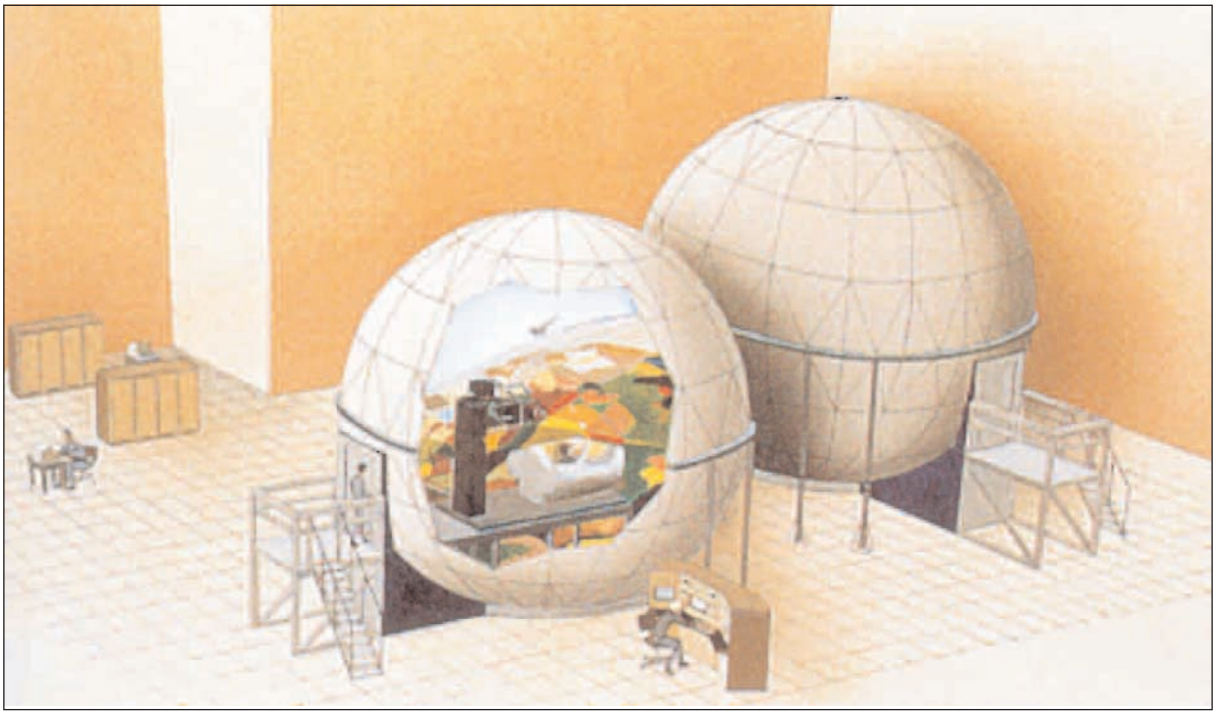
– Christian MATHEY, Directeur Technique de Thales Training&Simulation.

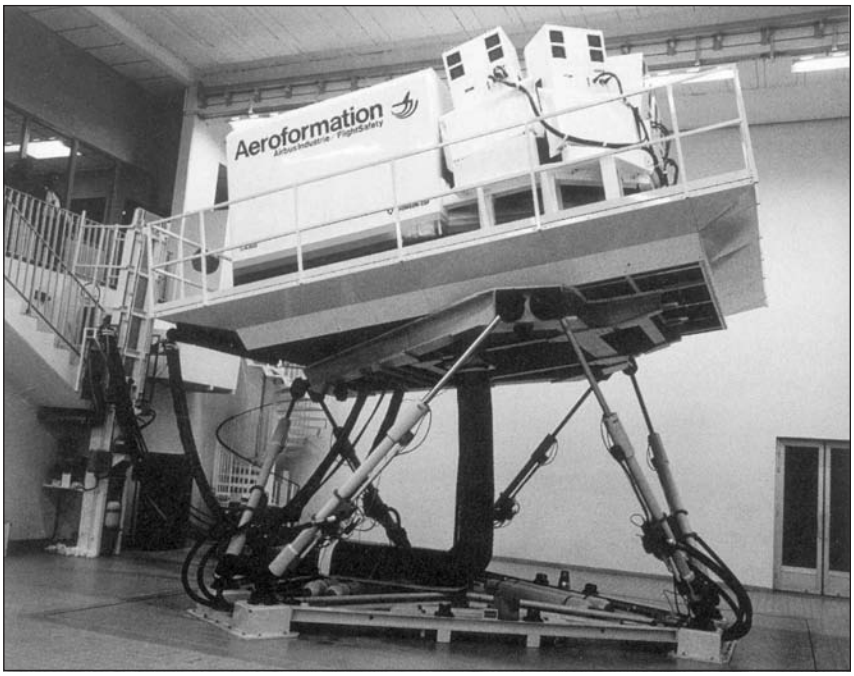
Références : La simulation d'entrainement pour aéronefs et véhicules spatiaux, D.M. Savescu, Mémoire de DEA, CNAM-Université de Paris, 1957.

Simulateur d'avion de combat (Source GIFAS).



Simulateur de combat aérien à deux cabines (Source GIFAS).





Simulateur d'entraînement pour avion de transport type 350 (Source GIFAS).

Le hall de simulation du Centre d'Essais en Vol à Istres.

Vue intérieure de simulateur d'entraînement d'avion de transport (Source GIFAS)

ANNEXE A 5

LA NAVIGATION AUTONOME POUR L'AÉRONAUTIQUE ET L'ESPACE DE L'ESTIME À L'INERTIE

PRÉAMBULE

Naviguer, c'est conduire un véhicule d'un point à un autre, en sachant répondre aux questions : où suis-je, quelle orientation prendre pour arriver à destination, dans combien de temps, en sécurité ?

L'élaboration de cartes de plus en plus précises et l'utilisation d'un compas, d'une montre fidèle et d'une mesure de vitesse ont été, pendant des siècles, les moyens autonomes de la navigation des navires.

À ses débuts, l'aviation ne disposait pas d'équipements différents pour la navigation, que l'habitude a conduit à qualifier de "navigation à l'estime". Toutefois, après la guerre ont été développés des calculateurs spécialisés qui ont remplacé les tracés et mesures sur cartes, en même temps que des gyroscopes amélioraient la mesure du cap élaboré par le compas magnétique et que le radar doppler mesurait directement la vitesse-sol.

Ces solutions et techniques n'étaient pas transposables pour le guidage et la navigation des missiles à longue portée, mais l'impératif d'autonomie demeurait fondamental. Seules les centrales inertielles pouvaient répondre aux objectifs, mais au prix d'évolutions technologiques considérables en mécanique, magnétisme, électricité, optique et électronique. Cette étape a conduit à la solution dite de "navigation par inertie" qui, partie des lanceurs spatiaux, militaires ou civils, a gagné tous les véhicules aériens, avions de transport, avions d'armes, hélicoptères.

La présente annexe ne traite pas des moyens de radio-navigation qui sont présentés dans le document établi par le groupe Électronique, pas plus qu'elle n'évoque les équipements destinés au guidage et à la navigation des missiles balistiques et stratégiques ni ceux destinés aux missiles tactiques qui sont décrits dans les annexes correspondantes A6 et A7.

Cette annexe ne traite pas non plus de la "navigation astronomique" qui fut la transposition sur les avions dont l'équipage comprenait un navigateur (bombardiers lourds de la Seconde Guerre mondiale et avions de transport transatlantiques de la période des années cinquante), des procédés de mesure de la hauteur des astres depuis longtemps utilisés sur les navires au long cours. Ces avions étaient équipés de sextants périscopiques comprenant une lunette d'observation et une référence de verticale gyroscopique. La mesure de la hauteur de l'astre ne donne pas le point mais un lieu de points où cette hauteur est valable à cet instant. Ce lieu est la "droite de hauteur". La navigation astronomique était, pour les avions de transport ou de bombardement, un moyen d'être indépendant d'une infrastructure sol, mais elle

exigeait un personnel spécialisé qui devait travailler dans des conditions difficiles. Elle imposait aussi l'installation d'une coupole transparente, d'une trentaine de centimètres de diamètre, placée au plafond de la cabine. Le temps nécessaire pour déterminer une droite de hauteur était de l'ordre de 6 minutes, soit près de 15 minutes pour un point. La navigation astronomique qui impliquait la présence d'un navigateur dans l'équipage s'est imposée tant qu'il n'y avait pas d'autre moyen autonome suffisamment fiable.

En revanche, l'emploi de l'inertie dans les lanceurs spatiaux civils, tels que le lanceur Ariane, est analysé dans la présente annexe.

Au sein même de la navigation par inertie, il convient de préciser les différentes technologies successivement utilisées, les spécificités des solutions, selon les emplois opérationnels, les liens entre les emplois sur avions et dans les sous-marins lanceurs d'engins. Enfin, un panorama de l'inertie en France permet de situer nos compétences industrielles.

LA NAVIGATION À L'ESTIME

En 1937, un brevet était déposé en France par le général Garnier portant sur un calculateur mécanique de position, dont le prototype fut réalisé en 1939 par la Société Lip de Besançon. Il utilisait un loch à hélice à impulsions électriques Jules Richard pour la mesure des distances parcourues et un cap magnétique gyrostabilisé, issu d'un gyrocompas Alkan, pour projeter les distances selon les axes géographiques et donner ainsi le point estimé de l'avion. Les performances ne furent pas aussi bonnes que prévu, mais les bases étaient jetées.

Pendant l'Occupation, en 1942, Crouzet accueillait à Valence, en zone libre, Fred Lipman et trois de ses cadres, dont l'ingénieur responsable de ce projet. En 1945, le STAé lui confiait l'étude et la réalisation du premier totalisateur d'estime Garnier-Crouzet.

1. ESTIME BASIQUE

L'échec relatif du premier totalisateur d'estime provenait plus de l'imprécision des capteurs que des moyens mécaniques du calcul.

Côté anémométrie, mesure de la vitesse par rapport à l'air, le loch à hélice est insuffisant et, dès 1942, Crouzet s'attache à développer des capsules à libre déformation sous l'effet de la pression dynamique et statique, qui seront la base de ses productions de l'époque. En 1955 apparaissent de nouvelles versions de capsules asservies à balance de force, associées à un calculateur analogique mécanique pour l'élaboration de la vitesse propre.

Le concept de centrale aérodynamique ou centrale anémométrique, lié aux besoins croissants des utilisateurs des différents paramètres air élaborés à partir des mesures de la pression statique, de la pression totale et de la température d'arrêt, a fait l'objet d'un contrat du STAé en 1957. Cette centralisation de toutes les mesures relatives à l'anémométrie permit, à partir de la mesure des paramètres bruts, la correction des erreurs des prises de pression et la distribution des grandeurs élaborées, à savoir :

- pression statique et pression dynamique vraies ;
- altitude ;
- vitesse verticale ;
- vitesse anémométrique ;
- vitesse propre ;
- nombre de Mach ;
- température statique ;
- aux différents utilisateurs équipementiers pour, notamment, le contrôle du vol, le contrôle moteur, la navigation à l'estime, le système d'armement, et, plus tard, les appareils de planche de bord.

Ces centrales aérodynamiques, d'abord réalisées en technique analogique, équipèrent les différentes versions des Mirage.

Elles furent suivies d'une version numérique qui commença, en 1965, ses essais en vol à Brétigny.

Au cours des années soixante, l'exigence de performances accrues, la volonté d'organisation modulaire pour faciliter la maintenance, donc le coût global et la substitution souhaitée d'une grandeur mesurée mécanique, par une valeur en tension électrique, favorisant les

corrections devenues plus complexes (incidence, dérapage, géométrie variable), conduisirent au développement, sur contrat STAé, d'un capteur de pression modulaire à rappel électrodynamique. La performance globale, en ambiance avion, de 10^{-4} fut atteinte. Cette version modulaire de capteurs de pression statique et de pression totale a équipé les centrales aérodynamiques des différentes versions des Mirage F1 et de la série des avions Concorde.

Au-delà des années quatre-vingt, ce sont des capteurs à sortie en fréquence qui furent retenus pour les différentes versions des unités de mesures des pressions.

De nos jours, des micro capteurs Silicium résonnants de classe 10^{-4} équipent les avions militaires et les avions civils (A 320, 330 et 340, Boeing 777 et 737). Plus de 3 500 capteurs de pression haute performance de classe 10-4 ont été produits (dont 70 % pour l'exportation) par Crouzet Aéronautique, devenue Sextant Avionique, puis Thales.

Côté références directionnelles, la seule solution connue juste après la guerre consistait à lisser le cap magnétique par un dispositif gyroscopique. L'élimination des erreurs de cardans produites par les variations d'assiette de l'avion apparaît en 1957, où la Société Bézu monte le gyroscope de lissage de cap sur une plate-forme maintenue horizontale par asservissement à un gyroscope de verticale. La référence de cap prend le nom de centrale gyroscopique. À partir de 1960, les centrales issues de ce premier modèle sont produites en série par la SFIM.

Les premiers calculateurs des totalisateurs d'estime d'après-guerre sont essentiellement mécaniques : des sphères de 4 cm de diamètre, orientées en fonction du cap et tournant proportionnellement à la vitesse, entraînent, par friction, des galets donnant ainsi les deux composantes de la vitesse suivant les axes géographiques et, déterminent ainsi le parcours en longitude et latitude.

Ces équipements équiperont d'abord le Noratlas, puis le Vautour et l'Alizé, avec parfois des prolongements tels que plateaux tactiques et calculateurs de vent.

2. L'APPORT DU RADAR DOPPLER

En 1960, une nouvelle référence de vitesse apparaît : le radar doppler. Il présente l'avantage de fournir directement la vitesse sol, avec certains inconvénients liés à la qualité des ondes réfléchies, affectée par les variations d'attitude de l'avion et par la nature du sol ou de la mer. Les premiers modèles à antenne mobile "décrochent" assez souvent. La vitesse doppler est donc plutôt utilisée comme information de recalage de la vitesse sol "estimée". C'est le cas sur les premiers systèmes de navigation du Breguet Atlantic et du Transall.

Cependant, au fil des évolutions techniques des équipements (centrale anémométrique, centrale gyroscopique), la navigation à l'estime avec radar doppler devient la règle dans les années soixante. Les précisions s'améliorent et les fonctions remplies se diversifient et s'enrichissent, par exemple par le calcul automatique du vent.

Une deuxième génération de calculateur d'estime apparaît chez Crouzet avec des performances améliorées. Toujours analogique, le calculateur utilise des servomécanismes et bénéficie d'importants gains en fiabilité et en volume, grâce à l'utilisation de transistors et de machines tournantes miniatures. Ils équiperont de nombreux programmes : Mirage III, Breguet Atlantic, Transall, Super Frelon. Ce programme d'hélicoptère de lutte ASM néces-

site de résoudre le délicat problème de la mesure de la vitesse air sur hélicoptère, notamment aux basses vitesses. Des anémomètres spécifiques ont été développés par Crouzet.

Le Mirage IV sera doté d'un calculateur de navigation et de bombardement EMD, qui, avec plus de 25 asservissements et 200 machines tournantes, constitue le plus puissant calculateur analogique embarqué à bord d'avions français.

Le radar doppler, produit anglo-saxon à l'origine, fait école en France chez EMD, avec l'Alto qui équipe le Super Frelon. Les références de cap deviennent de plus en plus précises. Dans le Breguet Atlantic, par exemple, le cap ne doit presque plus rien au champ magnétique terrestre, grâce à la qualité de gyroscopes portés par une plate-forme à axes de cardan asservis.

À partir des informations fournies par les différents senseurs, le calculateur Crouzet établit les données de navigation et les transmet à la table de navigation et à la table tactique Breguet-Crouzet, faisant la liaison avec le système de navigation et d'attaque.

3. ESTIME PRÉ-INERTIELLE

En 1967, le programme Jaguar retient, pour les avions français, un ensemble de navigation comprenant un radar doppler EMD RDN 72, associé à une centrale de cap et de verticale SFIM et à un calculateur Crouzet 90 utilisant les techniques numériques, des circuits imprimés multicouches (14) et un câblage en circuits souples.

Une nouvelle génération d'indicateurs Crouzet permet la commande du système et la visualisation des informations de navigation horizontale en coordonnées polaires, aussi bien en mode "estime" qu'en mode radionavigation : Tacan, VOR, DME. Le système répond aux spécifications d'emploi des trois versions du Jaguar pour l'armée de l'Air, la Marine et l'entraînement. Il constitue un exemple typique de ce que sera la navigation pré-inertielle des avions d'arme du début des années soixante-dix, Jaguar mais aussi Mirage III et V.

Le Mirage Milan utilise une version perfectionnée, avec une centrale bigyro de SFIM associée au doppler ; les fonctions d'attaque sont traitées par deux calculateurs, un Crouzet, l'autre faisant partie du viseur Thomson-CSF.

Quelques années plus tard, le Mirage FI bénéficiera de ce type de système, amélioré par un calculateur numérique Crouzet microprogrammé et reconfigurable.

Cependant, un tel système ne pouvait rivaliser avec l'inertie pure déjà montée sur les avions américains, en particulier pour les missions de bombardement. Un dernier perfectionnement sera l'adjonction d'accéléromètres sur le cœur de la centrale bigyroscopique autorisant un mode de fonctionnement de type inertiel en combinant, dans la boucle d'érection, le signal accélérométrique intégré à la vitesse fournie par le radar doppler.

Le premier système hybride inertie-doppler de ce type, associant un doppler EMD, une centrale SFIM et un calculateur numérique Crouzet est essayé en vol en 1973-1974. Ces équipements seront produits en petite série, pour l'exportation, à partir de 1978.

4. LE CAS DES HÉLICOPTÈRES

Le vol à vue avec carte a longtemps été le moyen de navigation des hélicoptères. Un programme d'essais en vol d'un indicateur prototype Crouzet (écran de 180 mm sur lequel étaient projetées des diapositives de cartes géographiques) sur Alouette III au CEV en 1966, utilisant une architecture dérivée du système Mirage III, permit d'engager, avec l'ALAT et le STAé, une phase de définition des besoins opérationnels et de détermination des performances pour les hélicoptères de l'armée de Terre. Leurs missions opérationnelles, de reconnaissance ou d'attaque, sont fréquentes et peuvent être de courte durée. La préparation est réduite au minimum et les zones de posé, souvent au coin d'un bois, sont dépourvues de toute infrastructure de soutien, à part le ravitaillement en carburant. Le poids, le volume et surtout le coût doivent être en rapport avec le support hélicoptère. Le chemin était difficile.

C'est seulement dans les années soixante-dix que les évolutions technologiques et l'apparition de nouveaux programmes comme les Pumas et les projets d'hélicoptères armés permirent de proposer des solutions répondant aux besoins de l'armée de Terre.

Les développements effectués pour les avions d'arme, tant des références : radar doppler, anémométrie, cap et verticale, que du calculateur numérique de Crouzet, ont permis de réaliser en 1973, avec la division Hélicoptères de l'Aérospatiale, un système expérimental sur Alouette III pour essai opérationnel par l'ALAT.

Parallèlement, la Marine choisissait un système du même type pour l'équipement en série de l'hélicoptère de lutte ASM WG 13 Lynx.

Le système NADIR, proposé par Crouzet, est retenu en 1976 pour équiper les hélicoptères Puma et Gazelle. Le système se compose d'un radar doppler EMD RDN 80, d'un compas gyromagnétique SFIM, Crouzet fournissant l'anémométrie basse vitesse, le calculateur, le poste de commande et les indicateurs. Les contraintes évoquées imposent des solutions nouvelles pour tous les constituants : par exemple, le calculateur est intégré dans un boîtier de commande situé en planche de bord. Une demande croissante d'amélioration des performances pour les hélicoptères armés va conduire rapidement à la nécessité de la solution inertie-doppler.

Le programme d'hélicoptère franco-allemand Tigre lance des consultations au niveau mondial et oblige la France à proposer une solution compétitive face aux équipements américains envisagés par le partenaire d'outre-Rhin.

Les services officiels, ayant depuis 1977 apporté leur soutien aux travaux de Crouzet et de SFENA dans le domaine de l'inertie, accueillent favorablement les propositions conjointes des deux sociétés pour l'étude et la réalisation d'un système de navigation inertie-doppler où la référence inertielle est une centrale à composants liés utilisant des gyrolasers produits par SFENA.

Le système expérimental SEXTAN I volera, en première mondiale, sur hélicoptère au CEV de Brétigny le 27 décembre 1979. Le boîtier principal comprenait 3 gyrolasers et 3 accéléromètres SFENA et un nouveau calculateur Crouzet multiprocesseurs 32 bits effectuant l'ensemble des calculs de la plate-forme virtuelle et de la navigation multisenseurs. En 1982, une version SEXTAN II sera essayée en vol sur avion d'arme.

La poursuite du développement permettra, dès 1989, à la société Sextant Avionique, dans laquelle Crouzet et SFENA ont fusionné, d'être retenue pour équiper l'hélicoptère franco-allemand Tigre avec un système de navigation hybride inertie-doppler doté d'une unité inertielle à gyrolaser triaxe monobloc miniature. Le calculateur à haut niveau d'intégration et la centrale occupent un volume réduit à 5,5 litres et ont un poids de 5,5 kg.

5. CONCLUSION

En France, la navigation à l'estime est née en 1945 chez Crouzet.

Encore actuellement, elle continue à servir sur le plus récent hélicoptère de combat, le Tigre. Son apogée, dans les années 1975, est aussi le moment où la concurrence de l'inertie pointe en France, avec le Super Étendard. Peu de systèmes peuvent témoigner d'une telle longévité, dépassant cinquante ans.

LA NAVIGATION PAR INERTIE

1. LES CENTRALES INERTIELLES AVEC PLATE-FORME À CARDANS

1.1. La phase étude

La navigation par inertie met en œuvre la formule de base de la mécanique, qui dit que, à partir d'un point connu, si l'on procède à la mesure des accélérations d'un mobile dans un repère donné, sa vitesse est obtenue par une première intégration dans le temps et sa position par une double intégration. Toute la difficulté vient de la traduction de cette formule dans les faits, par le choix des capteurs appropriés pour la mesure des accélérations et la définition du repère à base de gyroscopes, ainsi que de la mise en pratique des calculs.

Au début des années cinquante, les possibilités de la navigation par inertie étaient inconnues en France. Certes, on connaissait le guidage de la fusée V 2 allemande, mais sa précision était faible. Seule l'indication de vitesse axiale, fournie par intégration du signal d'un accéléromètre orienté selon l'axe longitudinal du V 2, permettait, après correction sommaire de la pesanteur et de l'accélération verticale, de déterminer la portée. Le guidage transversal était obtenu à partir du signal d'un gyroscope d'azimut, sans information de vitesse transversale.

Les études américaines

En 1955, l'attention des services officiels français fut attirée par des informations venant des États-Unis sur la navigation par inertie pour les avions. Une série d'articles de P.J. Klass parus dans Aviation Week permit de se faire une opinion des possibilités de la navigation par inertie pour les vols de plusieurs heures. L'accent était mis sur la nécessité d'obtenir des gyroscopes de très faible dérive angulaire pour les monter sur une plate-forme portant des accéléromètres de précision.

Condition impérative, l'ensemble devait constituer un "pendule de Schüler" oscillant, sans amortissement, à la période de 84 minutes autour de la verticale. Cette condition permet à la plate forme de rester horizontale, quels que soient les déplacements de l'avion à la surface de la Terre.

Une équipe du MIT, dirigée par le Dr C.S. Draper, réalisait une "centrale de navigation par inertie" stabilisée par trois gyroscopes flottants. La technologie du gyro flottant était aussi mise en œuvre par les industriels américains Kearfott et Honeywell. Elle présentait le grand intérêt d'être utilisable, aussi bien pour la navigation des avions pendant plusieurs heures que pour le guidage des missiles pendant quelques minutes.

Début des études en France

Une mission d'ingénieurs du STAé (ICA P. Schnerb et IPA J. Carpentier, de la section Équipements, et IPA R. Boucq, de la section Armement) eut lieu aux États-Unis en juillet 1955. La visite des services officiels américains et des industriels Kearfott et Honeywell fut riche d'informations techniques détaillées. Les contacts furent noués avec Kearfott dont le président Reichel vint ensuite en France pour visiter les firmes françaises susceptibles de fabriquer sous licence les gyroscopes flottants et les accéléromètres de sa société. À la suite de cette visite, Kearfott retint SAGEM comme partenaire souhaitable. Un premier accord fut signé qui permit à SAGEM d'acheter des composants Kearfott dans le cadre d'un contrat du STAé/Équipements.

À la même époque, l'IPA Jean Carpentier proposa à l'Ingénieur Général Jean Gérardin, directeur du Service technique aéronautique, un programme comportant :

– la réalisation, par SAGEM, d'une centrale de navigation par inertie utilisant des gyroscopes flottants et des accéléromètres Kearfott ;
– l'étude de gyroscopes flottants, par SAGEM, et d'accéléromètres, par SFENA, en vue de pouvoir remplacer ultérieurement les composants étrangers par des composants français ;

l'élaboration d'une coopération franco-britannique.

En parallèle, Honeywell tentait de se rapprocher de la Société Alsacienne de Construction Mécanique (SACM) pour une fabrication sous licence de ses composants inertiels en France.

En septembre 1957, une mission où le représentant du STAé (Jean Carpentier) était accompagné chez Kearfott par M. Bernard de Crémiers, de SAGEM, et, chez Honeywell, par M. Charles Bocquet, de SACM, permit de faire une comparaison détaillée des avantages respectifs des accords de licence en discussion.

Le programme de Sud-Aviation de missile sol-sol balistique tactique (SSBT) fut l'occasion, à l'initiative de Roger Béteille, de mettre en concurrence les deux groupes franco-américains. Mais, l'arrêt du SSBT en 1959 et la décision de doter la France d'un lanceur pour l'arme nucléaire mirent une fin brutale à ces projets.

Après une tentative infructueuse de fédérer les compétences françaises dans la SERNI, composée d'équipes de SAGEM, SACM et SFENA et dirigée par M. Roger Julia, président de la SACM, les études françaises de centrales inertielles se concentrèrent sur la réalisation des lanceurs de la force de dissuasion et furent confiées uniquement à la SAGEM.

Dans les années soixante, le STAé effectua des essais de composants inertiels et de centrales à inertie d'origine étrangère, achetés par le service ou prêtés par leur fabricant. Ces essais permirent de mieux évaluer les performances réelles des matériels et d'améliorer l'expertise des services. Ils portèrent sur des gyroscopes à un degré de liberté Norden, Kearfott, Sperry, et sur des centrales Ferranti, Kearfott SKN2600 et Litton LN33A.

Ces essais furent d'abord effectués dans la Cité de l'Air, en une annexe du laboratoire STAé d'équipements aéronautiques, dirigé par l'ICA G. Selles. Au milieu des années soixante, ce laboratoire fut transféré à Brétigny, où fut créé le LEA (Laboratoire d'équipements aéronautiques), à proximité et en soutien des essais en vol.

Dès le début des années soixante, le département Engins, qui allait donner naissance à la Direction technique des engins (DTEn), implanta un laboratoire inertiel au LRBA à Vernon. En 1962, la première centrifugeuse de précision y était installée pour l'essai des accéléromètres.

En avril 1970, le délégué ministériel pour l'armement décidait de regrouper à Vernon les moyens dispersés de plusieurs laboratoires dont celui du LEA et donna au LRBA une mission de centre d'essais inter-directions.

En décembre 1973, une nouvelle décision du délégué ajoutait à la mission de centre d'essais celle de centre pilote, responsable d'animer l'action d'ensemble pour les systèmes de guidage et navigation inertiels.

L'ensemble des services techniques s'appuya alors sur les équipes et les moyens du LRBA conduisant ainsi une action concertée et efficace pour l'étude, le développement et la réalisation des systèmes inertiels par les industriels français.

1.2. La filiation entre la technologie missiles et la technologie avions

Les réticences surmontées

La technologie inertielle était une priorité absolue pour la FNS (1961). Malgré les efforts du STAé et de SAGEM, elle n'arrivera – pour un programme d'avion militaire – qu'en 1973, avec le Super Étendard.

Les programmes de la force de dissuasion ont tiré les développements de la technologie inertielle

Ils faisaient l'objet d'une priorité absolue. Il n'y avait pas de force de dissuasion française crédible sans une navigation très précise des SNLE (quelques centaines de mètres après des jours ou des semaines de navigation en immersion) et un guidage inertiel fiable et performant pour les missiles.

C'était difficile, d'autant que les États-Unis avaient mis l'embargo sur tous les matériels et toutes les informations susceptibles d'aider la France dans son entreprise : les relations engagées, quelques années avant, entre SAGEM et Kearfott ont été rompues, du jour au lendemain, et les documents de travail des ingénieurs SAGEM présents chez Kearfott ont été bloqués sans aucune concession. Dans les années qui ont suivi, Kearfott a respecté, de façon très stricte, les consignes du département d'État.

L'amiral Rickover avait déclaré, à l'époque, à la Commission de la défense du Sénat (Washington) :

"La France réussira à réaliser la propulsion nucléaire des sous-marins, mais jamais elle n'atteindra les performances de navigation nécessaires pour une utilisation opérationnelle qui rendrait sa force de dissuasion crédible".

Rappelons que la Grande-Bretagne avait choisi de prendre un système de navigation américain et d'acheter les missiles balistiques aux États-Unis.

La diffusion des technologies inertielles vers des applications dans les secteurs aéronautiques et terrestres a mis un certain temps

Bien que le STAé ait engagé, dès 1956, des études et réalisations de prototypes qui nous mettaient en meilleure position technique (et industrielle du fait des moyens mis en place pour la force de dissuasion) que les Britanniques, ces derniers avaient opté pour l'approche inertielle pour leurs programmes aéronautiques dès 1964-65, tandis que l'avionneur français et les opérationnels militaires français "ne voyaient que des inconvénients à l'inertie".

Pourquoi ces réticences ?

À la différence avec la force de dissuasion pour laquelle il n'y avait pas d'autres solutions possibles, ce qui justifiait un effort important, pour l'aéronautique, il y avait déjà des solutions pour la navigation, solutions satisfaisantes pour l'avionneur (pour qui les équipements n'étaient pas la première priorité pour vendre ses avions !) et aussi par les opérationnels (pour qui la navigation était plus un art qu'une technique !).

L'inertie proposant une solution de plus, qu'apportait-elle (nous étions à la fin des années soixante, la conscience n'avait pas encore été prise de ce qu'elle apportait au-delà de la fonction navigation) ?

Mais, selon les opérationnels français, l'inertie était affligée de plusieurs vices rédhibitoires (il faut dire que les Américains étaient peut-être partis prématurément vers cette solution, et les systèmes LTN 3, qui équipaient les F 104, avaient une très mauvaise réputation) :

– le faible MTBF, ce qui était exact, mais certainement exagéré, car le système inertiel remplaçait, à lui seul, plusieurs équipements et il aurait fallu comparer à égalité de fonctions (le LTN 3 était un système à calculateur analogique et réglages par potentiomètres) ;
– la longueur du temps de mise en œuvre de ses gyros (gyros flottants au temps de chauffage et stabilisation de l'ordre de 20 à 30 mn). Combien de fois (et bien des années plus tard) avons-nous entendu un chef d'état-major de l'armée de l'Air déclarer : *« Nous montons dans nos avions et nous décollons, alors qu'il faut 30 minutes aux Allemands avec leur F 104 ! »*

1.3. L'expérience civile

En France, l'inertie pour avions est arrivée par les besoins civils.

Avec Concorde (qui, certes, avait été considéré comme un cas spécial en 1965), le premier argument en faveur de l'inertie avait été la nécessité d'une verticale vraie. La durée des accélérations excluait la solution de toute centrale de verticale et cap dont le système d'érection à la verticale (apparente) doit être coupé pendant les phases d'accélération.

À ce sujet, il est intéressant de rappeler :
– qu'un système gyro/accéléromètre ne donne la verticale vraie que s'il est bouclé de façon à ce que sa période d'oscillation soit de 84 mn, la période de Schüler ;
– et aussi, que connaître la position à la surface de la Terre, c'est connaître la direction de la verticale locale.

C'est dire que tout système inertiel doit être réglé à la période de Schüler et que seul un système de navigation inertiel donne la verticale vraie.

En 1965, SAGEM, en coopération avec Ferranti, proposait pour Concorde un système inertiel, SF500-AE51 à calculateur numérique.

Le calculateur SAGEM AE51, développé par le STAé, était déjà assez performant. Il s'est trouvé capable de réaliser des calculs de navigation inertielle proprement dits, mais aussi la conduite d'un indicateur cartographique, les calculs de conversion de coordonnées Loran en coordonnées géographiques.

En 1966, de nombreuses compagnies aériennes attendaient l'arrivée prochaine de l'inertie sur les avions long-courriers et avaient tenu à définir un standard pour permettre l'interchangeabilité d'équipement d'un type d'avion à un autre et d'un fournisseur à un autre. Boeing, qui achevait la définition du Boeing 747, attendait aussi ce standard.

À partir de l'adoption de la norme ARINC 561 par l'assemblée des compagnies aériennes le 6 décembre 1966, tout est allé très vite pour l'équipement inertiel des long-courriers. En janvier 1967, Boeing choisissait le système Carousel IV de Delco/General Motors comme équipement de navigation basique du 747 (3 systèmes par avion). En septembre 1967, Air France commandait soixante systèmes Litton LTN 51 à SAGEM pour équiper en rétrofit ses Boeing 707 et supprimer le poste navigateur.

Il était clair que Concorde ne devait pas échapper à la standardisation ARINC : en juillet 1968 Air France/Aérospatiale commandait à SAGEM des LTN 51 pour les Concorde de présérie.

SAGEM a cependant poursuivi, pratiquement seule (car Ferranti ne voulait plus dépenser un penny) le développement du système SF 500-AE 51 indispensable pour les vols Concorde prototypes (et également pour leurs essais en vol).

En octobre 1969, ARINC adoptait les standards ARINC 569 et ARINC 571 pour les références de verticale Attitude and Heading Reference System (AHRS) et pour les navigateurs Inertial Reference System (IRS) des avions moyen-courriers. SAGEM était retenu par l'avionneur pour l'Airbus A 300-B avec ses MGC 10 et MGC 30, basiques sur l'avion.

1.4. La percée sur avions militaires : importance du programme Super Étendard

Les avions de combat : la Marine nationale voulait un système d'armes moderne, capable de bombardements précis

Un évènement dans l'histoire française de l'inertie pour avions d'armes

En 1967, l'armée de l'Air avait choisi, pour le Jaguar, un système de navigation doppler, alors que la *Royal Air Force* avait adopté l'inertie.

En juin 1972, le Mirage Milan (équipé d'une centrale de verticale et d'un radar doppler) est mis en compétition avec l'A 7 américain (équipé d'un système inertiel Kearfott) pour un contrat en Suisse. L'épreuve est un exercice de tir/bombardement avec approche vers l'objectif au-dessus d'un lac. Handicapé par le doppler qui ne donne aucun signal au-dessus du lac dont les eaux sont très calmes, le Milan envoie des bombes tous azimuts alors que l' A 7 démontre une précision au but de 100-200 m.

Toute la presse en parle, M. Marcel Dassault explique, sur Europe 1, que son avion est fantastique et qu'

« il ne lui manque qu'une petite boîte noire qui s'appelle : système à inertie »

La compétition est perdue par Dassault, mais les Suisses finalement n'achèteront pas d'avions, et l'armée de l'Air française n'en est pas perturbée.

C'est l'Aéronavale qui, la première en France, s'intéresse à l'inertie pour le Super Étendard en 1971-72. Dès le début des négociations avec AMD-BA, la Marine nationale exige un système à inertie, mais la discussion porte sur les difficultés d'alignement initial du système inertiel sur porte-avions. Des solutions irréalistes sont évoquées (transfert optique, valise inertielle insérée dans l'avion au dernier moment…).

L'inertie va-t-elle être rejetée ? La solution d'alignement par filtrage de Kalman effraie l'avionneur qui renvoie le choix vers la DGA et ne veut pas s'engager forfaitairement.

Le SCAéro tient bon, il faut un système à inertie pour sa qualité de verticale et d'information de vitesse, la fonction performance de bombardement impose l'inertie. Un contrat spécifique de la DGA sera donc passé à SAGEM.

En octobre 1973, la proposition SAGEM-Kearfott est retenue pour le Super Étendard et l'alignement sera réalisé par filtrage de Kalman. Mais l'US Navy est en train d'expérimenter cette solution et, ne voulant pas être doublée, elle crée des problèmes. Finalement, après un contact de Pierre Faurre avec le professeur Kalman, l'US Navy propose une coopération (qui ne se réalisera jamais).

Il est intéressant de constater que les techniques inertielles sont abordées par ce que l'on peut imaginer de plus difficile (alignement en 8 mn à la mer). Le succès sera total. La première flottille de Super Étendard est constituée à Landivisiau en octobre 1978.

1.5. La famille SAGEM de systèmes multifonctions ULISS

Sur les bases apportées par le programme Super Étendard, SAGEM développe, avec l'aide de la DGA, un système inertiel français original, multifonction et multi-applications (aéronautique, terrestre et marine) : la famille ULISS, qui sera un remarquable succès (4 000 équipements vendus).

Revenons sur le choix du système inertiel ETNA (Étendard navigation-attaque) pour le Super Étendard.

En 1971-72, tous les systèmes inertiels (américains) en service opérationnel sur avions, militaires ou civils, utilisaient des gyroscopes flottants (la technologie développée en 1955 au MIT par le Dr Draper qui avait permis l'apparition des systèmes de guidage inertiel pour engins balistiques et de navigation pour avions et sous-marins).

Une nouvelle technologie de gyros, développée à l'origine par la société Kearfott, était arrivée à maturité (le Gyroflex, gyroscope à suspension dynamique accordée ou TRG (*tuned-rotor gyro*).

Kearfott avait bien reçu en 1968 un contrat pour le système de navigation du P3C, avion de patrouille maritime, mais Litton Industries – qui fournissait certainement 90 % des systèmes inertiels de l'USAF – arrivait, à son tour, avec un système à base de TRG.

En 1971-1972, Kearfott développait un système avec ses Gyroflex et une électronique modernisée et miniaturisée, pour contrer Litton.

Nous ne disposions en France (et en Europe) que des systèmes à gyros flottants : le S 200 qui, en 1970, avait commencé des essais en vol très satisfaisants à Brétigny aurait sans doute pu être proposé deux ans plus tôt pour un avion comme le Super Étendard (masse 20 kg, dérive : 1 mille marin/heure – temps d'alignement 10 mn). Mais il n'aurait pas été raisonnable d'aborder ce premier programme d'avion français avec une technologie que les États-Unis étaient en train d'abandonner, d'autant plus qu'il devenait clair que l'inertie serait dorénavant exigée pour tous les programmes.

Il fallait faire un recalage technologique et partir avec la technologie TRG, c'est à dire Litton ou Kearfott.

Kearfott avait été le partenaire de SAGEM pour les études de guidage inertiel (SSBT de Sud-Aviation Cannes) jusqu'au moment où le général de Gaulle ayant lancé une force de dissuasion nationale, le département d'État avait mis un embargo total sur la technologie Kearfott et interrompu toute collaboration (1960).

Toute relation de travail avait été coupée mais des contacts personnels avaient été maintenus et, en 1970-71, alors que le proto de système pour l'aéronautique n'avait aucun caractère de technologie "critique", SAGEM avait été informé de ses caractéristiques.

Litton, bien connu de SAGEM (systèmes LTN 51 retrofités sur Boeing 707 d'Air France) lui faisait une cour effrénée.

Ayant trouvé le proto Kearfott plus séduisant que les matériels de série que Litton commençait à sortir, et l'impérialisme bien connu de Litton en matière de coopération n'étant pas acceptable, SAGEM se rapprochait de Kearfott et proposait un système Kearfott-SAGEM pour le Super Étendard. Le développement du système SKN 2400 de Kearfott n'était pas tout à fait achevé et il n'avait fait que quelques vols !

Cela rendait difficile la tâche de le promouvoir auprès d'AMD-BA, mais cela offrait l'avantage considérable, apprécié par la DGA, de permettre d'envoyer une équipe solide d'ingénieurs chez Kearfott et de travailler en équipe intégrée pour accélérer le développement… les délais étant très courts.

En même temps, SAGEM avait négocié un accord très souple qui permettait de développer d'autres produits, pour d'autres applications spécifiques du marché. De plus, Kearfott s'engageait à vendre les composants inertiels pour le programme Super Étendard, et autorisait, pour d'autres programmes à venir, l'utilisation de gyros et accéléromètres de fabrication SAGEM.

La DGA/DPAI avait été exigeante avec SAGEM, et s'était montré inflexible vis-à-vis de Kearfott, jusqu'à ce que les conditions de l'accord soient favorables. SAGEM doit en remercier la DGA et comme on le verra plus loin, Kearfott n'a eu qu'à s'en féliciter.

En octobre 1973, la proposition Kearfott-SAGEM était retenue pour Super Étendard.

Les équipes Kearfott-SAGEM intégrées font très vite voler au CEV un système en configuration Super Étendard (sans le logiciel d'alignement à la mer, à ce stade).

Des clients potentiels du système Kearfott, qui n'avaient pas jusqu'alors réussi à se décider à retenir un système n'ayant pas fait l'objet d'une commande de série, rassurés par le choix français s'engagent (en particulier les Suédois pour le Viggen).

Quelque temps après, le Consortium européen (Belgique, Hollande, Danemark, Norvège) ouvre une compétition entre Mirage F1, M 53 et F 16 ; SAGEM et Kearfott, chacun de leur côté, font la promotion – contre Litton – du système type Super Étendard qui vole au CEV.

Le Consortium choisit le F 16 et son système inertiel qui sera le système Kearfott SKN 2400 ! C'est le premier succès Kearfott devant Litton pour l'aéronautique.

Un plus grand succès encore arrive quelques mois plus tard : l'USAF choisit le système Kearfott comme standard INS for F 16 (c'est à dire aussi pour les F 16 des *Foreign Military Sales*).

Grâce au choix de la DGA pour Super Étendard (et la "diplomatie" de SAGEM), Kearfott vendra quelques 8 000 systèmes SKN 2400. Kearfott en saura gré à SAGEM et adoptera une attitude très libérale quant à l'utilisation par SAGEM de sa technologie pour développer la famille ULISS pour l'aéronautique, la marine et la navigation terrestre.

Quelques 15 ans plus tard, un nouveau président de Kearfott, découvrant SAGEM, s'enthousiasmera pour la diversité des produits que SAGEM avait su développer et vendre à partir de la technologie Kearfott et décidera de prendre la licence du navigateur marine MCV 4 et poussera sur le côté les directeurs qui n'avaient pas eu le dynamisme de SAGEM !

La famille des systèmes inertiels ULISS (modulaires – multi-fonctions et multi-applications) et leurs composants inertiels : gyros TRG (S 040) et accéléromètres (A 310)

Une coordination efficace entre toutes les directions de la DGA concernées, l'expertise du LRBA et la stratégie SAGEM d'approche du marché international firent le succès remarquable d'ULISS.

Compte tenu de l'étroitesse du marché français et du marché international accessible, compte tenu des faibles séries pour chaque contrat d'avion et l'obligation pour l'avionneur de s'adapter chaque fois aux contraintes et demandes spécifiques du client, SAGEM définit une architecture de système ULISS ayant tous en commun les constituants les plus chers (composants inertiels, plate-forme, électronique de servitude…) qui sont fabriqués en série significatives, associés à des constituants spécifiques à l'application (interfaces, processeurs,

alimentations et surtout logiciels modulaires pris dans une bibliothèque très importante de modules développés et validés pour la plupart par plusieurs applications).

Tous les systèmes ULISS pour avion sont dans un boîtier standard F3 (le standard USAF : Form, Fit, Function). Cependant, SAGEM retient deux facteurs (Form et Fit) du standard, mais pas Function, qui varie selon l'application et l'avion.

Citons quelques exemples de fonctions intégrées au boîtier ULISS : navigation inertielle bien sûr, navigation hybride (inertie, inertie-GPS ou Glonass, inertie-baro, inertie-corrélation d'altitude, etc.), gestion du bus multiplexé 1553 ou Gina français, navigation-attaque, etc.

Cette architecture est très différente de l'architecture d'un équipement de navigation inertielle américain standard, fabriqué à des milliers d'exemplaires (plus de 10 000).

Elle a permis à SAGEM d'offrir aux AMD-BA et aux clients étrangers des solutions très compétitives au point de vue financier pour des petites séries (Litton et Kearfott ont des prix bas pour le système standard, mais dès qu'il faut modifier une interface ou ajouter une fonction logiciel, c'est un refus ou un prix astronomique).

D'autre part, des versions ULISS 30 ont été développées pour la navigation terrestre et l'artillerie et ULISS 40 pour la navigation marine selon les mêmes principes.

Les développements des composants inertiels (gyro S 040) pour ULISS mais aussi pour les missiles (S 050) ont été réalisés grâce à des financements mis en pool entre plusieurs services de la DGA, et une participation de la SAGEM.

L'architecture modulaire a permis de développer, à moindre frais, des versions où la plateforme était remplacée par un bloc strap-down (gyro GSD, TRG strap-down) et aussi d'assurer le passage en douceur d'ULISS 80 par exemple (gyro TRG) à SIGMA 80 (gyrolaser RLG) sans que l'utilisateur ne voie de changement (interfaces et logiciel de mission inchangés).

Comme on le verra à propos de la famille SIGMA de systèmes inertiels à base de RLG (gyrolaser), la même approche modulaire conduira à la même panoplie de solutions que pour ULISS, tant pour les applications aéronautiques que terrestres et navales.

SAGEM a réussi, avec la famille ULISS, à réaliser un équipement français, soumis pour l'exportation au seul accord du gouvernement français et ceci, au moindre coût grâce aux apports initiaux de la société Kearfott.

SAGEM a vendu de nombreux systèmes ULISS à l'exportation et même cédé des licences (en Inde notamment) sans soulever jamais la moindre objection, ni même la moindre question de la part de Kearfott ou du département d'État.

Une anecdote, pour terminer :

Quand en 1975, Daniel Dupuy (SAGEM) négociait avec l'ICA Émile Blanc (STTE) des financements pour ULISS, il faisait l'hypothèse de quelques centaines de systèmes à terme, Émile Blanc protestait : "vous en ferez plus de 1 000 !". Il était dans le vrai, puisque 4 000 systèmes ULISS ont été vendus, dans des configurations diverses ayant en commun tous les composants inertiels !

2. LES CENTRALES INERTIELLESÀ COMPOSANTS LIÉS : LE GYROLASER

2.1. La suppression de la plate-forme Émergence de la centrale à composants liés

L'exposé qui précède sur les centrales à plate-forme sous-entend que cette dernière est constituée matériellement et que ses mouvements sont commandés mécaniquement par des moteurs-couples asservis. Cette solution cinématique entraîne des conséquences : limitation dans l'étendue de mesure, échauffement, complexité de fabrication qui ont poussé à chercher des solutions abstraites pour définir, par calcul, un référentiel pour la mesure des accélérations et la détermination de la vitesse et de la position du véhicule aérospatial, selon la loi de la mécanique.

Ce concept est présent aux États-Unis dès 1965 sous le vocable strap down qui fut traduit en français selon les appellations suivantes qui décrivent le même équipement : inertie sans plate-forme, inertie liée ou inertie à composants liés. C'est sans doute ce dernier terme qui décrit le mieux la réalité de l'architecture, puisque les accéléromètres et les gyromètres sont directement et rigidement fixés sur la structure du véhicule. Il sera utilisé, de préférence, dans la suite de cet exposé.

La détermination, par le calcul, d'une plate-forme de référence fait appel à des concepts mathématiques parfois fort anciens comme le théorème d'Euler, sur les rotations dans l'espace, ou plus récents et moins connus comme les quaternions. Il n'en reste pas moins que l'application de ces théories n'a pas été possible tant que les calculateurs numériques n'ont pas atteint, sous des formes convenables pour un usage aéroporté, une capacité et une rapidité de traitement compatibles avec les mouvements des avions et des engins.

Ainsi, des industriels comme Crouzet avec son expérience d'emploi de calculateur numérique pour les applications de navigation à l'estime, ou SFENA qui, pour la conduite automatique du vol, connaissait les contraintes du calcul temps réel, pouvaient prétendre jouer un rôle majeur dans l'exercice de "suppression" de la plate-forme.

Le gyrolaser : capteur majeur des centrales à composants liés

L'annonce de la décision de Boeing, en 1978, d'équiper ses modèles 757 et 767 de centrales inertielles à gyrolaser fabriquées par Honeywell fit l'effet d'un séisme dans le monde fermé et élitiste des industriels maîtrisant les techniques des gyroscopes mécaniques pour les applications de navigation, tels que Litton, Kearfott ou Sagem. C'était, en effet, la première fois que l'effet mécanique gyroscopique n'était plus utilisé pour mesurer des vitesses de rotation.

Bref historique scientifique

La fin du XIX^{e} siècle et le début du XX^{e} virent s'affronter, dans les milieux scientifiques de la mécanique, les théories sur le "support matériel" de transmission de la lumière. Les expériences d'Albert Michelson en 1881 pour mesurer, par voie optique, la vitesse de translation de la Terre (expériences qui n'aboutirent pas, mais qui servirent aux thèses d'Einstein) conduisirent à imaginer et à réaliser des moyens d'expérimentation très performants.

Si Michelson échoua dans ses efforts pour mesurer par voie optique la vitesse de translation de la Terre, il a en revanche été le grand-père du gyrolaser, en utilisant la lumière pour mesurer la vitesse de la rotation de la Terre. En 1925, dans un réseau d'égouts désaffectés de

Chicago, il a pu, en utilisant le principe de l'interféromètre de Sagnac, mesurer une vitesse de rotation de 10°/h, composante verticale de la vitesse de rotation terrestre (15°/h), à cette latitude. Mais les deux rayons lumineux de sens opposé devaient englober une aire de 20 hectares pour aboutir à une mesure de faible précision ! L'effet laser a permis de réduire le chemin optique dans des proportions telles que, avec quelques dizaines de centimètres, on obtient aujourd'hui une précision de l'ordre du centième de degré par heure.

Il n'a fallu qu'une dizaine d'années, de 1960 (découverte du laser), au début de la décennie 1970, pour que Sperry fasse voler la première centrale inertielle à gyrolaser. Moins de dix ans après, l'aviation civile donnait ses lettres de noblesse à ces nouvelles technologies, avec le choix d'une centrale Honeywell par Boeing en 1978. Par la suite, les centrales à gyrolaser ont été adoptées sur pratiquement tous les types d'avions et d'hélicoptères, civils ou militaires.

Les raisons d'un succès

Deux motifs principaux peuvent être cités pour expliquer la généralisation du passage d'un gyroscope mécanique au gyrolaser dans le domaine des avions et des hélicoptères.

➲ Tout d'abord, malgré de nombreux problèmes technologiques à maîtriser (état de surface, qualité des miroirs, pureté du milieu gazeux...), la simplicité du capteur gyrolaser et son "splendide isolement" vis-à-vis des accélérations, de l'environnement thermique et vibratoire facilitent considérablement sa fabrication et le processus de calibration.

Il en résulte des prix de cession inférieurs à ceux des générations antérieures. La fiabilité remarquable du gyrolaser et son modèle de fonctionnement simple conduisent à des coûts de maintenance très faibles (échange de capteur sans recalibration, peu de retours au constructeur).

Les compagnies aériennes ont très vite mesuré leur intérêt économique à choisir cette voie, d'autant que, bon gré mal gré, les classiques de l'inertie Litton et Kearfott offraient des solutions gyrolaser, en concurrence difficile avec Honeywell.

➲ Le second motif concerne la conception "système". La centrale à gyrolaser est, de base, une centrale dite à composants liés (strap-down, en anglais). Elle fournit donc, contrairement aux centrales dont les gyros sont portés par une plate-forme à cardans, des informations concernant le véhicule lui-même : vitesses angulaires et accélérations.

Ces informations sont utiles pour le pilotage-guidage (mouvements autour du centre de gravité et mouvements du centre de gravité du véhicule). Ainsi, l'adoption de centrales inertielles à gyrolaser sur l'A 310 a permis à Airbus de faire l'économie de quatre gyromètres et de dix accéléromètres dont les informations étaient dévolues aux commandes électriques de vol et à la conduite automatique (servo-amortisseur et pilote automatique).

Parmi les avantages, moins importants mais significatifs qu'il apportait alors, on peut citer un volume et une masse réduits, une moindre consommation électrique, et l'absence de régulation thermique qui permet une exploitation rapide des senseurs après mise en service.

Enfin, il faut reconnaître que les centrales inertielles à gyrolaser à usage aérospatial n'auraient jamais pu voir le jour sans les apports des calculateurs numériques rapides qui permettent de définir les axes d'une référence absolue virtuelle nécessaire aux calculs de navigation

en temps réel et de combler une carence de tout système à composants liés, celle due aux aberrations des petits mouvements coniques.

Un effort considérable d'écriture et de vérification des logiciels pour le calcul en temps réel d'informations touchant à la sécurité du véhicule a été nécessaire et a fait appel aux compétences les plus en pointe dans ce domaine.

2.2. Les travaux de la SFENA avec le concours de Crouzet

À la fin des années soixante, Crouzet explore les solutions lui permettant de demeurer dans le domaine de la navigation. Des contacts avec Honeywell, déjà en cours pour les mesures de pression et la magnétométrie ASM, conduisent en 1972 à un protocole d'accord sur le gyrolaser comprenant l'acquisition de compétence, l'accès au gyrolaser et ses possibilités de développement et de commercialisation en Europe. Des ingénieurs de Crouzet effectuent alors des stages aux États-Unis et recueillent des informations sur les solutions (matériels et logiciels) de réalisation de la plate-forme virtuelle.

Parallèlement, la SFENA, spécialiste de l'inertie classique de moyenne précision, fournisseur des centrales destinées à l'AS 33, à l'Exocet et au Kormoran, en Allemagne avec BGT, ainsi qu'au Pluton, ne pouvait prétendre se positionner dans le domaine de l'inertie de grande précision par les solutions gyroscopiques traditionnelles. La SAGEM avait une position très forte et était soutenue par l'État, à la fois grâce à des crédits d'étude et par des contrats de série pour navires, lanceurs et avions.

Forte d'une coopération avec Quantel, société spécialiste des lasers à gaz dirigée par Georges Bret, dont elle prendra une participation au capital en 1976, la SFENA commença, en 1972, les premiers travaux sur le gyromètre laser, race de capteurs alors qualifiée d'"exotiques". Elle utilise, avec l'appui des organismes de recherche de la DGA (DRME, DRET) ses compétences en traitement temps réel des information et dans l'inertie pour définir les algorithmes de détermination de la plate-forme virtuelle.

Si la coopération avec Quantel permit de mieux appréhender l'aspect théorique de l'effet laser, son fonctionnement en gyromètre était nouveau. Les lasers classiques ont une architecture où la lumière cohérente utile sort de la cavité résonnante pour les applications diverses (laboratoires, chirurgie fine, découpe ou perçage, lecture optique, arme…). En revanche, dans le gyrolaser seule une infime partie du rayonnement laser sort du chemin optique pour en extraire le signal utile : une fréquence proportionnelle à la vitesse angulaire.

En outre, l'existence d'une zone aveugle au voisinage d'une vitesse de rotation nulle exige de linéariser le signal utile par un moyen mécanique (roue d'activation) et un asservissement de la forme des oscillations entretenues dans le plan perpendiculaire à l'axe de mesure.

Les travaux américains (Sperry, Honeywell) étaient peu connus. Toutefois les formes et dimensions du chemin optique, la composition du mélange gazeux de la cavité, Hélium-Néon, les technologies de base (adhérence moléculaire, performance des miroirs) avaient fait l'objet de communications donnant une bonne base de départ pour espérer obtenir les performances requises.

Jusqu'en 1977, avec une participation croissante des équipes de la SFENA à Châtellerault, l'acquisition de techniques annexes fut amorcée en respectant l'impératif d'indépendance vis-à-vis de l'étranger. Ainsi furent réalisés les processus permettant l'adhérence moléculaire

qui fixe les miroirs sur le bloc optique, l'assemblage verre-métal par thermocompression pour la mise en place des électrodes, le dégazage et le remplissage de la cavité par le mélange Hélium-Néon. À cette date, avec un gyro de 20 cm de chemin optique, on put obtenir une dérive, une linéarité et un domaine de mesure comparables aux résultats annoncés aux États-Unis et constater une durée de vie prometteuse.

Les premières applications

1978 : année charnière

Afin de préciser sa politique industrielle dans le domaine de l'inertie à composants liés, et soucieuse de préserver la position nationale, la DGA lance en novembre 1976 un appel à candidature auprès des sociétés ayant engagé des travaux dans cette voie. Les réponses de Crouzet et de SFENA sont accueillies favorablement et, en accord avec les services, les deux sociétés décident de confier l'ensemble des travaux d'étude et de développement de l'inertie à composants liés à SV2, filiale commune à parts égales, en jouant sur la complémentarité de leurs connaissances.

Les développements effectués sur le gyrolaser avaient reçu un appui des services officiels par l'intermédiaire de contrats d'étude à la SFENA qui sous-traitait ensuite à Quantel les travaux de son ressort. La politique de la SFENA, on l'a vu, était de miser sur cette nouvelle technologie, purement nationale, pour compenser à terme la diminution prévisible des activités inertielles mécaniques classiques. Au-delà de réalisations prototypes, la mise en place de moyens de production pour une série s'imposait.

C'est en 1978 que fut prise la décision d'implanter à Châtellerault les moyens industriels nécessaires. Leur ampleur résultait de l'option prise consistant à maîtriser, en interne, toutes les opérations dont on a vu qu'elles conditionnent l'obtention des performances (fabrication des miroirs, pureté du mélange gazeux, thermo-compression…). L'existence d'une équipe locale compétente en mécanique a facilité le passage en version série des montages d'activation bien adaptés à la nécessaire disparition de la zone aveugle.

Le choix de Boeing, la même année, est venu encourager les efforts de la SFENA et les justifier. On peut mentionner, à ce stade, que, périodiquement, des contacts ont eu lieu entre SFENA et Honeywell et entre SFENA et Litton. Ils n'ont jamais dépassé le stade des généralités et visaient, en fait, à trouver un allié local pour, par exemple, le choix par Air France du fabricant des centrales pour ses Airbus.

L'heure des choix

La première "sortie dans le monde" eut lieu en décembre 1979, date à laquelle débutèrent au CEV les essais en vol sur Puma d'un système de navigation inertie-doppler pour hélicoptère, baptisé Sextan, proposé par SV2 et constitué d'une UMI (unité de mesure inertielle) à gyrolaser avec une unité de calcul Crouzet. Les performances mesurées furent bonnes et le comportement, y compris en vol tactique réel, satisfaisant.

Il faut reconnaître que si la phase étude avait été soutenue convenablement par les Services concernés, d'autres ont manifesté plus de réticences à passer au stade d'un produit complet avionnable, en compétition avec les solutions classiques et pour des applications militaires. C'est seulement en décembre 1986 qu'eut lieu la recette d'une maquette fonctionnelle de centrale inertielle complète, Totem, aux spécifications des avions militaires.

Les compétences acquises par SFENA en matière de calcul temps réel pour les fonctions pilotage et l'arrivée sur le marché de microprocesseurs de plus en plus performants ont grandement facilité la définition de l'électronique particulièrement dense des centrales. C'est en effet par le calcul que sont reconstitués les axes de référence inertielle et que l'aberration des petits mouvements coniques propre aux centrales strap-down est maîtrisée.

En 1987, deux centrales Totem volent, l'une au CEV sur Mirage III pour évaluation des performances, l'autre sur Transall dans un environnement opérationnel. Les performances sont bonnes, à l'intérieur des spécifications, et le comportement, la disponibilité et la fiabilité sont très convenables.

Le premier choix pour l'équipement en série d'un avion eut lieu en 1988 pour la modernisation des Transall où une centrale Totem 200 à gyrolaser de 33 cm constituait le cœur inertiel du nouveau système de navigation dont Crouzet assurait la maîtrise d'œuvre. Le premier vol série eut lieu en 1992 et un lot de 70 centrales a été livré pour ce programme.

On peut mentionner que, dès 1984, SV2 faisait la promotion d'un système de navigation dérivé de Sextan, destiné au programme franco-allemand HAP-HAC. Huit ans après, une UMI à gyrolaser – mais sous forme monobloc triaxe (voir ci-après) – fait son premier vol en version AHRS (Attitude and Heading Reference System). Il faudra attendre encore un peu pour la série.

Un capteur inertiel original : le laser triaxe monobloc

La percée du gyrolaser triaxe monobloc

On a vu que l'architecture classique d'une centrale inertielle sans plate-forme à gyrolasers est constituée de 3 gyromètres à trajet optique triangulaire et 3 accéléromètres. C'est encore aujourd'hui celle des centrales Honeywell, les plus vendues au monde. Toutefois, même si elle ne recelait pas d'avantages significatifs, la forme carrée du chemin optique avait fait, dès le départ, l'objet de réalisations.

La combinaison de ses connaissances en géométrie, en optique et en mécanique fit germer dans l'esprit de M. Bernelin, ingénieur de la SFENA à Châtellerault, le concept d'une structure monobloc recelant trois parcours optiques carrés situés selon les arêtes d'un octaèdre régulier. Un brevet (n° 8006298) fut déposé en mars 1980. À l'époque, on ne disposait que de la théorie pour justifier qu'une telle configuration pouvait fonctionner. Mais elle présentait, toujours en théorie, et elle le démontrera, dans les faits, des avantages considérables :

- la fixité des axes de mesure entre eux est absolue ;
- on fait l'économie de 3 miroirs (6 au lieu de 9) ;
- au lieu de 3 activations mécaniques, une seule suffit, selon la trisectrice des axes de mesure ;
- l'encombrement, le poids, la consommation électrique sont plus faibles ;
- les coûts de fabrication sont très diminués.

Le gyrolaser triaxe est aujourd'hui décliné en deux versions par Thales :

- une version de trajet optique 14 cm, destinée aux applications AHRS avion ou hélicoptère ;
- une version de trajet optique 22 cm, pour centrale de navigation pour avions et lanceurs.

Entre 1992 et 1996, la percée commerciale est importante. Totem 3000, à gyro triaxe de 22 cm, est aujourd'hui commandée à plus de 400 exemplaires pour l'équipement d'avions aussi différents que les Mig 21 en Inde, les Mirage F1 espagnols, les Mirage 2000-9 des Émirats arabes unis et les C 130 d'Afrique du Sud.

Quant à la version 14 cm, outre l'équipement de l'hélicoptère Tigre, elle est sélectionnée pour des programmes engins, tels que les missiles Storm Shadow, Apache EG et Vesta/Exocet.

Ceci amène à retracer l'histoire de l'inertie pour le lanceur Ariane.

2.3. L'inertie sur Ariane IV et Ariane V

Le choix de l'Europe en faveur d'un accès autonome à l'espace a été fait en 1973. Dans une organisation multinationale contraignante régie par le principe du juste retour, la répartition des tâches entre les différents pays membres de l'ESA a donné lieu, dès le début du programme, à des compétitions sévères entre industriels européens.

Les sociétés françaises, Aérospatiale, architecte industriel du lanceur et fabricant de la structure, MATRA, responsable de la case équipements et de son intégration, SEP, chef de file pour la propulsion, ont été vite retenues en raison de leur compétence et leur dynamisme.

La part française du juste retour a débordé, conduisant à privilégier la recherche de fournisseurs étrangers. Les équipements ont été particulièrement touchés. Cette situation explique, du moins en partie, qu'un équipement majeur pour la réussite des missions, la centrale inertielle, ait été attribué à une société anglaise, Ferranti.

Ainsi, de 1973 à 1988 (quinze ans !), les différentes versions d'Ariane, Ariane 1 (premier vol en 1979), Ariane 2/3 (premier lancement mi 1984) et Ariane 4 (décollant mi 1988), près d'une trentaine au total, ont été équipées de deux centrales Ferranti de technologie mécanique classique pour le guidage et le pilotage.

Même si aucun incident notable n'avait été constaté dans le fonctionnement en vol du guidage inertiel, les ingénieurs du CNES et de MATRA étaient inquiets. En effet, la centrale Ferranti n'avait jamais pu passer sans problème les essais de qualification au sol, en particulier lors de l'exposition aux ambiances vibratoires et sonores, particulièrement violentes sur Ariane.

La "robustesse" de la technologie laser et la confirmation de ses performances par les applications sur avions civils conduisirent le CNES et MATRA à s'intéresser aux développements en Europe, en Grande-Bretagne en priorité – juste retour oblige – et en France. BAE avait commencé des études, mais l'état d'avancement des travaux chez SFENA conduisit à sa sélection en 1984 pour une centrale aux spécifications Ariane 4, utilisant des gyromètres laser monoaxe de 33 cm de chemin optique.

En 1988 eut lieu le premier vol avec la précaution légitime de mixer l'origine des centrales, Ferranti en commande et SFENA en secours. Puis, rapidement, au vu des résultats, les lancements furent exécutés avec les deux centrales fournies par SFENA. Le choix de la technologie laser de SFENA fut confirmé pour Ariane 5.

Arianespace souligne, à juste titre, que les lanceurs Ariane sont appréciés par les exploitants de satellites – les clients, en fin de compte – du fait de la très grande précision d'injection sur l'orbite de transfert. Cette qualité permet d'économiser sur la consommation de carburant par le satellite géostationnaire, pour sa mise à poste fixe définitive. Ceci entraîne une augmentation potentielle non négligeable de la durée de vie utile du satellite. Cette précision de trajectoire a pour origine principale les performances de la centrale inertielle.

À ce jour, près de 200 centrales Ariane ont été livrées dans la version à 3 gyros monoaxes de 33 cm. Une nouvelle version de centrale utilisant un gyrolaser monobloc triaxe de 22 cm a été sélectionnée en 1999 pour Ariane 5 et devrait devenir la version de base pour les lanceurs à venir.

On peut noter que c'est un programme de lanceurs civils, Ariane, qui a le premier reconnu les bonnes performances de la technologie laser française dès 1983, alors que la décision de moderniser les Transall a dû attendre 1988, année du premier vol d'une centrale SFENA sur Ariane. La dualité civil-militaire a donc joué, mais dans un sens inverse et original.

2.4. Les travaux de la SAGEM : la famille SIGMA

SAGEM et SFENA avaient en 1978 des positions de départ différentes pour le développement des systèmes inertiels à gyrolasers et ont mis en œuvre des approches différentes.

L'approche originale à l'économie de SAGEM, pour arriver juste à temps sur le marché ***(cf. planche : La transition "douce" d'ULISS vers SIGMA)***.

Il faut d'abord souligner que caractériser un système à inertie par la technologie (comme nous le faisons tous) de son gyro, c'est commode mais c'est aussi négliger beaucoup d'autres technologies et compétences tout à fait indispensables, et non moins difficiles que celle du gyro (en particulier, l'accéléromètre et le logiciel dont certaines subtilités enseignées par l'expérience font la différence !)

Par ailleurs, si le gyrolaser comporte beaucoup moins de pièces et de pièces mécaniques en mouvement que le gyro à suspension dynamique, il n'empêche que pour concevoir et réaliser un gyrolaser on n'échappe pas aux problèmes mécaniques de stabilité thermique de stabilité dans le temps, d'état de surface, d'absorption ou rejet de traces d'impureté, de précision géométrique etc., ce sont les problèmes des gyros TRG mécaniques.

Les pionniers des gyrolasers ont très vite constaté que la belle simplicité conceptuelle du gyrolaser était très altérée par des phénomènes physiques et mécaniques/optiques très pernicieux.

SAGEM avait identifié un certain nombre de ces problèmes et engagé une veille technologique dès le début des années soixante-dix, mais avait estimé qu'il ne fallait pas partir trop tôt et essuyer les plâtres, avec le danger de partir sur des pistes sans issue et investir trop tôt en moyens de production pour ne pas risquer qu'ils soient périmés quand le marché serait là.

Par contre, il faudrait être prêt quand le marché serait là et travailler sur un nombre limité de points durs pour se former une compréhension des problèmes, ceci n'impliquant pas de grosses dépenses.

SAGEM disposait de toutes les compétences (accéléromètres, logiciels), il manquait le gyrolaser qui serait le moment venu à intégrer dans une architecture système éprouvée.

En 1979 une étape intéressante est réalisée (essais en vol en 1980) avec le remplacement de la plate-forme du système ULISS par un bloc strap-down avec des gyros GSD (TRG *strap-down*) afin d'expérimenter les algorithmes de "plate-forme virtuelle" des systèmes *strap-down*.

Cette approche "à l'économie" de SAGEM apparaissait à des services de la DGA comme une sorte de désintérêt de sa part, ce qui avait, c'est compréhensible, conduit la DGA à financer la SFENA pour des développements, puis des investissements à Châtellerault en 1978.

Quand on demandait à SAGEM : "Vous n'investissez pas dans la technologie laser ?" SAGEM répondait : "La technologie laser viendra prendre la place de la techno TRG, elle ne viendra pas en plus, la reconversion de nos salles blanches se fera naturellement et progressivement. Voyez les moyens et les traitements optiques en place, il faudra en introduire quelques nouveaux. En outre les personnels compétents sont là (usine de Montluçon)".

En 1978, la question suivante se posait : sur le marché accessible à une société française, quand arrivera la demande de systèmes gyrolasers ?

Le monopole d'Honeywell (Boeing 757-767) avec RLG remplaçant le monopole de Delco/Carrousel IV (Boeing 747) avec gyros flottants ne laissait pas beaucoup d'espoir d'entrer sur le marché civil, même auprès d'Airbus Industries, sans payer un droit d'entrée faramineux. Sur Ariane, déloger Ferranti avant 1985 ne paraissait pas possible.

Sur Mirage 2000 et retrofits divers, les jeux étaient faits pour ULISS jusqu'en 1990 au moins, pensait SAGEM.

En fait, SAGEM avait ajusté ses efforts et ses dépenses pour être prête à faire voler un système en 1984 environ. Ce qui a été réalisé :

- un système SIRSA (ARINC 704) a fait 70 vols d'évaluation en juin 1985 sur Boeing 747 d'Air France (voir plus loin) ;
- en mars 1986, SIGMA faisait son premier vol sur Mirage 3 au CEV ;
- en mars 1989, SIGMA (avec un gyro de 32 cm) était retenu pour le Rafale (avec des séries limitées et lointaines) ;
- en 1990, choix pour ASTER du gyro de 8 cm, ainsi que pour HERMES du gyro 16 cm (sans suite) ;
- début 1996, SAGEM est retenu pour le NH 90, pour un système de navigation incluant 2 SIGMA (gyrolaser de 16 cm) ;
- en octobre 2000, SAGEM est retenu pour le programme AASM (avec gyrolaser de 8 cm).

Depuis le début des années quatre-vingt-dix, des ventes très substantielles de SIGMA 30 (terrestres) et SIGMA 40 (Marine) représentant des quantités supérieures aux quantités aéronautiques ont eu lieu. Fin 2000, 600 SIGMA avaient été livrées, la cadence était de 20 par mois.

SAGEM a continué à vendre des systèmes ULISS jusqu'en 1995 pour des programmes engagés et pour des compléments de programmes. Le basculement d'ULISS sur SIGMA est alors intervenu pour tous les nouveaux programmes.

Les avantages de la technologie gyrolaser sont en effet déterminants (sauf pour la précision, mais, en même temps, les hybridations et calibrations utilisant le filtrage de Kalman se sont généralisées, réduisant l'importance de la précision en inertie pure).

3. PANORAMA DE L'INERTIE EN FRANCE

3.1. La France, seul pays au monde – hors États-Unis – à maîtriser l'ensemble des technologies inertielles

Le développement et la maîtrise industrielle des technologies inertielles a été, pour la France, une grande entreprise couronnée de succès. L'inertie performante était indispensable pour la crédibilité de sa force de dissuasion ***(cf. annexe A 6)***, et, dans tous les domaines de l'armement, elle assure son indépendance nationale et sa liberté à l'exportation. Son utilisation dans ces différents domaines fait l'objet de la présente annexe et des annexes A 6 et A 7.

En 1960, quand les programmes nationaux ont été lancés, c'était un défi.

L'inertie fait appel à une gamme très large de technologies, sollicitées pour la plupart à leurs limites extrêmes.

Pour plusieurs d'entre elles, il fallait gagner un ou deux ordres de grandeur par rapport aux connaissances scientifiques du moment. Nous citerons seulement deux exemples.

Magnétisme

La précision au but des engins balistiques est directement proportionnelle à la précision du facteur d'échelle de l'accéléromètre axial, lui-même proportionnel à la valeur du champ magnétique de l'aimant qui est au cœur des accéléromètres pendulaires, la stabilité dans le temps de ce champ doit être de quelques 10^{-5}.

Le professeur Néel, prix Nobel de physique pour ses travaux sur le ferromagnétisme, l'hystéresis et la stabilité des champs magnétiques, consulté, avouait que ses travaux réalisés avec les meilleurs appareils de physique du moment n'avaient qu'une précision de 10^{-3}.

Il a fallu que les industriels fabriquant les accéléromètres pour centrales et le centre technique de la DGA au Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques (LRBA) développent des méthodes et moyens d'essais nouveaux pour gagner un facteur 100.

Métrologie du 1/100 de micron

L'objectif de précision en navigation inertielle autonome recherché pour les SNLE ne pouvait être obtenu qu'avec le GSE (gyro à suspension electrique) "l'Étoile en bouteille".

Une sphère creuse (Ø40 mm) en beryllium tournant à grande vitesse dans l'ultravide (sa constante de temps de ralentissement est de vingt-cinq ans !), suspendue par un champ électrique, constitue une référence de direction dont la dérive s'exprime en 10^{-6} degrés/heure.

Pour obtenir cette précision, il faut que les défauts de sphéricité en rotation soient de l'ordre de 1/100 micron (une colline par rapport au diamètre de la Terre !), ils sont mesurés et compensés par logiciel. Les défauts locaux de surface sont de l'ordre des distances interatomiques. SAGEM et ALCATEL ont mis au point les méthodes de fabrication et, encore plus difficile, les appareils de métrologie capables de mesurer ces dimensions. Seuls AUTONETICS aux USA et SAGEM en France ont su réaliser des appareils de cette classe, avec des précisions tout à fait identiques.

Toutes les technologies présentées par les planches jointes sont soit en fabrication, soit disponibles si une application se présente, soit à un stade avancé de développement à la SAGEM ou chez Thales (équipes ex-SFENA puis Sextant Avionique).

Depuis trente-cinq ans, les nouvelles technologies de gyroscopes viennent s'ajouter aux technologies éprouvées sans jamais les éliminer complètement pour certaines applications.

À un moment donné, pour résoudre un problème, il existe souvent trois technologies méritant considération :

– la technologie éprouvée en service opérationnel depuis des années et présentant, de ce fait, des avantages logistiques ;
– la technologie arrivée à maturité, disponible pour des programmes à court/moyen terme ;
– la technologie en développement qui devrait présenter des avantages (surtout coût et fiabilité) au moment où le programme considéré arrivera au stade de la série ;

Cependant, à la fin des années quatre-vingt-dix, la technologie gyrolaser s'impose presque dans tous les cas. Cette suprématie d'une technologie n'existait pas dix ans plus tôt : les gyros flottants, les gyros suspension dynamique et les gyrolasers étaient toujours en compétition.

Les technologies gyros flottants et gyros à suspension dynamique ont connu des périodes de vie industrielle de l'ordre de trente ans (1955-85 pour les premiers, 1965-1995 pour les seconds). Le gyrolaser qui a déjà vingt ans de vie industrielle n'a pas réellement de concurrents (1980–…).

A-t-on besoin d'un remplaçant ou bien répond-t-il à toutes les attentes ?

Oui, il serait souhaitable de disposer d'une technologie moins chère surtout en bas de gamme, pour élargir les domaines d'utilisation. Le FOG (gyro à fibre optique) a déçu au point de vue coût (et aussi miniaturisation). Les travaux actuels portent principalement sur des solutions gyros vibrants de divers types.

3.2. La révolution du filtre de Kalman et les systèmes de navigation hybrides

En annexe figure un historique des divers développements de 1970 (publication des travaux du professeur Kalman et leur diffusion) à 2000.

La première application au monde, toutes industries confondues, du filtrage Kalman qui a été la plus probante est l'alignement des systèmes inertiels des Super Étendard sur porte-avions en 1974. Le filtrage de Kalman a permis des performances améliorées avec des composants inertiels beaucoup moins chers.

Pour illustrer la puissance du filtre de Kalman, citons le cas des systèmes de géodésie : un système ULISS pour avion (ses erreurs sont, sur avion en inertie pure, de 0,5 NM/hr de Nav) complété par un filtre de Kalman prenant en compte des "recalages" à vitesse nulle quand il est déplacé au sol sur des distances de quelques kilomètres, a des erreurs qui ne dépassent pas 20 cm.

C'est la fin de la course à la performance pour les composants inertiels.

En vol, le filtre calibre les composants inertiels et cette calibration est acquise pour quelque temps après disparition des autres capteurs (GPS ou corrélation d'altitude par exemple).

Le filtre de Kalman permet l'alignement d'un système inertiel sur une base mobile : l'alignement des systèmes Super Étendard, en utilisant les infos du système inertiel du porte-avions est bien connu. Mais cet alignement inertie/inertie est également capable "d'harmoniser le missile sous les ailes d'un avion" (pas de points d'harmonisation mécanique chers) et d'initialiser son système inertiel, les résistances des avionneurs à cette solution sont enfin levées.

Le "filtre unique" mis au point par SAGEM pour le NH 90 consiste en un mode de fonctionnement unique (pas de distinction entre alignement et navigation dont les modes sont nombreux, mais le pilote n'a pas à les choisir). Il utilise les infos inertie-doppler-air

data–GPS–référence inertielle du bateau porteur-loch-vitesse nulle, un posé de 20 secondes. Après 15 minutes, la précision de navigation absolue est de 20 m. Il s'accommode, bien entendu, de l'absence totale ou épisodique de chacun des capteurs autres que l'inertie. Le système s'aligne au sol, sur bateau et en vol.

3.3. L'apport des références inertielles aux différents véhicules

La précision de navigation n'a pas toujours été le critère déterminant du choix de la solution inertielle, comme le montre la planche suivante.

Illustration : L'apport des références inertielles aux véhicules.

4. ÉPILOGUE : UN BILAN TRÈS POSITIF DE QUARANTE ANNÉES DE POLITIQUE VOLONTARISTE DE LA DGA DANS LES DIVERS DOMAINES DE L'INERTIE

Très grande est la diversité des solutions technologiques répondant à un éventail ouvert d'applications opérationnelles, allant de la navigation des SNLE au guidage très bon marché de munitions intelligentes, de la navigation aérienne générale à l'optimisation de la durée de vie des satellites de télécommunication, ou encore à la diagraphie des forages pétroliers (sonde inertielle de 6 mètres de long, 60 mm de diamètre fonctionnant à 170°C en cours de forage).

Dès le début des années soixante, le département Engins, qui allait donner naissance à la Direction technique des engins (DTEn), implanta un laboratoire inertiel au LRBA de Vernon (Eure). En 1962, la première centrifugeuse de précision y était installée pour les essais d'accéléromètres. En avril 1970, le délégué ministériel pour l'armement décidait de regrouper à Vernon les moyens dispersés de plusieurs laboratoires et donna au LRBA une mission de centre d'essais interdirections. En décembre 1973, une nouvelle décision du délégué ajoutait à la mission de centre d'essais, celle de centre pilote, responsable d'animer l'action d'ensemble pour les systèmes de guidage et de navigation inertiels.

L'ensemble des services techniques s'appuya alors sur les équipes et les moyens du LRBA qui conduisit ainsi une action concertée et efficace pour l'étude, le développement et la réalisation par les industriels français des systèmes inertiels.

La politique volontariste de la DGA, complétée par l'action du CNES, a permis à la France de disposer d'une industrie compétitive au plan international.

La SAGEM, société dont les compétences et les expériences croisées couvrent depuis près de quarante ans tous les domaines d'application de l'inertie, se positionne comme une des premières sociétés du secteur au monde, après seulement deux ou trois sociétés américaines.

Le chiffre d'affaires de la SAGEM dans l'inertie représente 10 % du CA mondial (hors ex-URSS)

Il est réalisé dans toute la gamme des applications inertielles :
– guidage des engins balistiques (toutes générations) ;
– guidage des engins air-sol, air-mer, sol-air, sol-sol ;
– navigation/attaque des avions de combat et hélicoptères de combat ;
– navigation des drones de reconnaissance ;
– stabilisation de ligne de visée et navigation de chars ;
– navigation des sous-marins lanceurs d'engins et des sous-marins d'attaque ;
– navigation et conduite de tir de bâtiments de surface.

La SFENA est partie plus tardivement dans le domaine des centrales inertielles en misant sur l'innovation technologique apportée par le gyrolaser qui s'est révélée la meilleure.

Le gyrolaser s'est rapidement généralisé sur tous les véhicules aérospatiaux et sur les engins tactiques.

Les centrales à gyrolaser développées par SFENA ont été poursuivies à travers les évolutions des structures industrielles : création de Sextant, puis naissance de Thales Avionics. La production s'est centrée sur le gyrolaser monobloc triaxe qui, en deux versions de précision, est monté sur des véhicules aussi variés que les Mirage 2000 à l'exportation, les Mig 21 indiens, l'hélicoptère Tigre, les missiles Storm Shadow, Apache EG et le lanceur Ariane IV et V.

La France a surmonté les nombreux défis que posait la maîtrise industrielle, celui des performances et des coûts spécifiques à chaque domaine d'application, celui de la fiabilité opérationnelle des matériels. Dans ce domaine, le LRBA a également joué un rôle essentiel.

Le handicap des séries plus faibles que celles des concurrents américains a été largement surmonté grâce à une approche de "sur-mesure modulaire" mieux adaptée aux spécificités des marchés français et exportation (hors États-Unis) que l'approche "brutale" de l'équipement standard des équipementiers américains pour le marché américain.

Outre le secteur fondateur des systèmes balistiques traité dans l'annexe A 6, trois secteurs, qui ont fait l'objet de la présente annexe, ont été difficiles d'accès pour l'industrie française, chacun pour des raisons différentes.

L'aéronautique militaire

Les États-Unis, et dans une moindre mesure le Royaume-Uni, étaient partis sur ce marché dès le début des années soixante avec des systèmes inertiels à gyros flottants et calculateurs analogiques : les systèmes Litton des F 104 avaient des temps d'alignement initial très longs et une mauvaise fiabilité.

Les systèmes inertiels Marconi-Elliott des Jaguars britanniques avaient les mêmes défauts et, en outre, étaient volumineux. Ceci a créé une réputation désastreuse à l'inertie en France auprès de l'armée de l'Air et de l'avionneur, qui se félicitaient de ne pas être affligés de l'inertie.

Il a fallu attendre 1974 pour que la DGA et la Marine nationale retiennent, pour le Super Étendard, le système inertiel (gyro à suspension dynamique et calculateur numérique) proposé par SAGEM. L'armée de l'Air a résisté plus longtemps et la société Avions Marcel Dassault a commencé à installer des systèmes inertiels SAGEM sur les Mirage F1 Exportation (Maroc, Irak…) avant d'y venir quelques années plus tard pour les F1 français.

Le lancement du système du Super Étendard a marqué le décollage de la SAGEM pour l'aéronautique : Mirage F1 Export, rétrofits de Mirage 5 par Dassault d'abord puis par SAGEM, Jaguar indien puis Mirage 2000.

Quatre mille systèmes ULISS ont été vendus par SAGEM pour des programmes aéronautiques, terrestres et navals.

La technologie gyrolaser est arrivée à partir de 1988 : systèmes SFENA pour Transall, hélicoptères Tigre, Mirage 2000 export et SAGEM pour Rafale et, plus récemment notamment pour les Sukkoi 35 de l'Indian Air Force, et le NH 90.

L'aéronautique civile

Le premier avion civil équipé d'origine de systèmes inertiels (3 systèmes) a été le Boeing 747. Dès l'adoption en décembre 1966 du standard ARINC 561, Boeing, ne jouant

pas le jeu de la standardisation, donnait l'exclusivité à Delco (groupe General Motors) pour les 500 premiers avions, avec le système Caroussel IV (gyros flottants) et l'imposait, de fait, aux longs courriers du monde entier.

La même situation se renouvelait pour les Boeing 757/767 en 1978 avec le système à gyrolaser d'Honeywell. Quand en 1982 le problème de l'équipement des Airbus A 320 s'est présenté, le monopole mondial d'Honeywell était établi. On ne peut regretter un défaut de dynamisme de la part de l'industrie française : il n'y avait rigoureusement rien à faire…

Les lanceurs spatiaux

Lors du lancement du programme Ariane, en 1973, la DTEn et la SAGEM disposaient de la plate-forme inertielle déjà qualifiée pour lanceurs balistiques, répondant exactement aux besoins.

Les impératifs politiques de "juste retour" et le caractère militaire et donc classifié du produit ont, cependant, conduit les gouvernements et l'ESA à remercier la Grande-Bretagne, qui s'était fait prier, de son entrée dans le programme Ariane, en attribuant à Ferranti (qui était très loin d'avoir une solution) le guidage inertiel (gyros flottants) d'Ariane. Ferranti n'a jamais réussi à satisfaire à toutes les épreuves de qualification du CNES, bien que, jusqu'en 1988, Ariane ait été équipée de deux centrales Ferranti. Ce n'est qu'en 1988 que SFENA a réussi à placer, en passager d'abord, sa centrale gyrolaser, puis à se substituer complètement à Ferranti.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La force de dissuasion a été le moteur du développement et de l'industrialisation des techniques inertielles et a permis la mise en place de moyens dans l'industrie et au LRBA (la centrifugeuse de précision et les tables d'essais pour gyroscopes et plates-formes notamment) ainsi que la constitution d'équipes très performantes.

L'inertie est certainement le meilleur exemple de la politique volontaire et cohérente conduite par la DGA dont les directions ont coordonné, depuis maintenant plus de quarante ans, les travaux réalisés dans tous ses domaines d'utilisation, en exploitant au maximum les synergies.

Les trois secteurs où le succès s'est fait attendre (aéronautique militaire, lanceurs spatiaux) ou était inaccessible (aéronautique civile) n'altèrent en rien l'œuvre remarquable accomplie et la force de la position française en regard de l'industrie américaine.

Des progrès considérables sont encore attendus en matière de coût des composants inertiels et donc des systèmes avec la maîtrise de nouvelles technologies en développement chez SAGEM, mais aussi chez Sextant Avionique, qui avait repris les activités de SFENA et est devenue maintenant Thales Avionics.

CONTRIBUTION :
Gérard BONNEVALLE, Jean CARPENTIER (STAé)
Claude VUILLEMIN (Crouzet)
Daniel DUPUY (SAGEM)
Michel HUCHER (SFENA)

COORDINATION :
Michel HUCHER, Daniel PICHOUD

BIBLIOGRAPHIE

– Schuler M., *Die Storüng von Pendel und Kreiselapparaten durch die Beschleuniung der Fahrzeuge*, Physikalische Zeitschrift, 1923.

– Draper C.S., Wrigley W., Grohe L.R., T*he Floating Integrating Gyro*, Aero. Eng. Rev., Vol. 15, n° 6, June 1956.

– Draper C.S., Wrigley W., Hovorka J., *Inertial Guidance*, Pergamon Press, 1960.

– Savant C.J., Howard R.C., Solloway C.B., Savant C.A., *Principles of Inertial Navigation*, McGraw Hill, 1961.

– Cannon R.H., *Alignement of Inertial Systems by Gyrocompassing – Linear Theory*, Journal of Aerospace Sciences, pp. 885-895, November 1961.

– Carpentier J., Radix J.C., Bouvet J., Bonnevalle G., *Navigation par inertie*, Dunod, 1962.

– Fernandez M., Macomber G.R., *Inertial Guidance Engineering*, Prentice Hall, 1962.

– Pitman G.R. (Editor), *Inertial Guidance*, Wiley, 1962.

– Leondes C.T. (Editor), *Guidance and Control of Aerospace Vehicles*, Ch. 4, Pinson J.C., McGraw Hill, 1963.

– Broxmeyer C., *Inertial Navigation Systems*, McGraw Hill,1964.

– Lange B.O., Parkinson B.W., *Error Equations for Inertial Navigation with Special Application to Orbital Determination and Guidance*, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 17, pp. 209-246, 1966.

– Radix J.C., *La navigation par inertie*, Collection "Que sais-je ?", PUF, 1967.

– De Crémiers B., *Navigation par inertie sur de longues distances*, Symposium AGARD Oxford, septembre 1967.

– Jurenka F.D., Leondes C.T., *Optimum Alignement of an Inertial Navigator*, IEEE Trans. on AES, Vol. 3, n° 6, pp. 880-888, November 1967.

– AGARD Conference Proceedings n° 43, *Inertial Navigation – Systems and Components*, May 1968.

– Schmidt S.F., Weinberg J.D., Lukesh J.S., *Case Study of Kalman Filtering in the C-5 Aircraft Navigation System*, JACC-68, University of Michigan, July 1968.

– Radix J.C., *Le gyroscope*, Collection "Que sais-je ?", PUF,1969.

– Wrigley W., Hollister W.M., Denhard W.G., *Gyrocope Theory Design and Instrumentation*, The M.I.T. Press, 1969.

– Sorenson H.W., *On the Treatment of Inertial Measurement Unit Data in Optimal Linear Navigation Policies*, IEEE Trans. on AES, Vol. 5, n° 3, pp. 429-440, May 1969.

– Faurre P., *Système de navigation à inertie hybride optimisé*, AGARD Symposium on Hybrid Navigation Systems, Delft, September 1969.

– Faurre P., et al., *Navigation inertielle optimale et filtrage statistique*, Dunod, 1971.

– Faurre P., Camberlein L., *Étude et réalisation de filtres de Kalman pour sytème inertiel*, AGARD Lecture Series n° 82 On Practical Aspects of Kalman Filtering Implementation, May 1976.

– AGARD Lecture Series No 82, *Pratical Aspects of Kalman Filtering Implementation*, May 1976.

– AGARD Lecture Series No 95 *Strap Down Inertial Systems*, 1978

– Freidland B., *Analysis of Strapdown Navigation Using Quaternions*, IEEE, Vol. AES 4.5, 1978.

– Camberlein L., Paccard J., de Crémiers M., Alidade, *Optimisation coût-performance de l'alignement d'un système inertiel sur porte-avions*, AGARD Symposium Proceedings, pp. 63.1-63-18, May 1979.

– Camberlein L., *Évolutions techniques de la navigation par inertie pour avions*, Revue Navigation, Institut Français de Navigation, pp.287-310, juillet 1979.

– Colin J., *Début des essais en vol du Sextant SV2, une première européenne pour les gyromètres laser*, Air et Cosmos n° 794, 1980.

– Camberlein L., de Crémiers M., Chermette D., *La navigation optimale inertie-corrélation d'altitude une solution attrayante au problème de la navigation pour avion d'attaque au sol*, Symposium AGARD, Athènes, octobre 1981.

– Albert J.P., *La navigation par inertie utilisant le gyrolaser*, Tout l'électronique, n° 478, 1982.

– Barriac J., *Un système marin de navigation à inertie à gyros accordés : la Minicin de SAGEM*, Revue Navigation de l'IFN, juillet 1982.

– Radix J.C., *Principe de fonctionnement des gyromètres laser*, ENSAé, 1983.

– AGARD Lecture Series n° 133, *Advances in Strapdown Inertial Systems*, May 1984.

– Camberlein L., Nicaise P., *A Redundant Strapdown Reference for Advanced Aircraft Flight Control Systems*, Gyro Symposium, Université de Stuttgart, Septembre 1984.

– Camberlein L., Mazzanti F., *Calibration Technique for Laser Gyro Inertial Navigation Systems*, Symposium Gyro Technology Proceedings, pp. 5.1-.12, University of Stuttgart, September 1985.

– Antoulas A.C. (Editor), Mathematical System Theory *The Influence of R.E. Kalman*, Ch. 1, pp.89-134, Faurre P., et al., *Kalman Filtering and the Advancement of Navigation and Guidance*, Springer-Verlag, 1991.

– Radix J.C., *Systèmes inertiels à composants liés*, CEPADUES, 1991.

– Camberlein L., Capit B., *ULISS G, système inertie-GPS intégré "tout-en-un" et "tout-en-vue"*, Revue Navigation de l'IFN, pp. 37-55, janvier 1992.

– Hucher M., *Le gyrolaser*, Nouvelle Revue Aéronautique et Astronautique, n° 1, 1993.

– Bonnaudet E., Robert P. *La technologie du gyrolaser*, Nouvelle Revue Aéronautique et Astronautique, n° 1, 1995

– Pleska E.M.A., Kieffer J.F., Bouniol P., *Les senseurs inertiels du XXI^e siècle*, Revue Scientifique et Technique de la Défense, n° 49, 2000.

Témoignage de Gérard J. BONNEVALLE
concernant les études et réalisations de prototypes effectuées
dans les années soixante,sous l'impulsion
du Service technique aéronautique (section des Équipements).

LA NAVIGATION PAR INERTIE POUR L'AÉRONAUTIQUE

ÉQUIPEMENTS DE NAVIGATION POUR AVIONS

Selon l'orientation proposée en 1955 par Jean Carpentier à l'Ingénieur Général Gérardin, directeur du Service technique aéronautique, l'essentiel des travaux d'études et de développement pour la réalisation d'un équipement de navigation par inertie pour avions militaires fut confié à la SAGEM. Quelques études spécifiques furent aussi confiées à la SFIM, à une équipe particulière dirigée par Monsieur Horath, ingénieur allemand transfuge de l'après-guerre.

Pendant une dizaine d'années environ, des contrats annuels relativement importants furent notifiés à la SAGEM par le STAé, sous la responsabilité directe de Jacques Bouvet, chef du bureau Navigation, puis de ses successeurs. Dans les premières années, un dialogue particulièrement fréquent était entretenu avec les bureaux analogues d'autres directions techniques, notamment de la direction des Engins.

Au début des années soixante, le STAé finança des investissements pour un atelier beryllium mis à la disposition de l'équipe Horath pour la réalisation de paliers à gaz pour toupies de gyroscopes flottants. Quelques années plus tard, l'équipe et ses moyens furent très logiquement transférés à la SAGEM qui était directement concernée par le bon aboutissement de ces travaux.

En complément à ces contrats, le STAé assura aussi le soutien, à un niveau financier sensiblement plus restreint, de certaines études auprès de SFIM-Bézu pour perfectionner les centrales bigyroscopiques existantes. Ce type de matériel équipait alors de nombreux avions, fournissant la référence de verticale et de cap nécessaire au pilotage et à la navigation. Il fut retenu jusqu'à la fin des années soixante pour la totalité des avions militaires français.

Dans le cadre de contrats annuels d'études, le STAé soutint également à la SFENA des études de composants inertiels (gyroscopes secs à un degré de liberté à paliers activés, accéléromètres pendulaires asservis) et de centrales à inertie de moindres performances et coûts, susceptibles de constituer des éléments appropriés pour réaliser des systèmes hybrides inertie-doppler sur avions ou des ensembles de guidage d'engins tactiques. Georges Bonfils dirigeait ces travaux.

Les centrales bigyroscopiques SFIM-Bézu et SAGEM firent l'objet de nombreuses campagnes d'essais au Centre d'essais en vol de Brétigny-sur-Orge, sur avions de servitude (Nord 2501, SO30 Atar, NF11, Caravelle) et sur avions d'armes prototypes (Transall, Atlantic, Mirage 3, Mirage 4, Mirage 5, Jaguar A).

Trois prototypes de centrale à inertie SFENA 300 furent expérimentés en laboratoire puis en vol en 1965-1966 sur Caravelle et sur Canberra, pour en évaluer les performances en tant que références de verticale et de cap.

Au cours des années soixante, le STAé put également faire effectuer des essais de composants inertiels et de centrales à inertie d'origine étrangère, achetés par le Service ou mis à sa disposition temporairement par leur fabricant. Ces essais permettaient de mieux évaluer les performances réelles de ces matériels et plus généralement d'améliorer l'expertise des Services. Ils concernèrent plus précisément des gyroscopes à un degré de liberté Norden, Kearfott, Sperry, des centrales à inertie Ferranti, Kearfott SKN2600, Litton LN33A. Fut également expérimenté un équipement Kollsman de visée astronomique, envisageable comme moyen de recalage automatique d'une navigation inertielle de longue durée.

Les essais officiels de composants inertiels français ou étrangers furent d'abord réalisés non loin de la Cité de l'Air, dans une annexe particulière du laboratoire STAé créé à l'origine pour les essais de matériaux aéronautiques et dont Gabriel Selles avait considérablement étendu le domaine d'activité. Au milieu des années soixante, la totalité du laboratoire, y compris cette annexe, fut transférée à Brétigny, où fut établi le Laboratoire d'équipements aéronautiques (LEA), à proximité et en soutien technique des essais en vol. Quelques années plus tard, le laboratoire inertiel était définitivement détaché du LEA, ses moyens transférés à Vernon et fusionnés avec le laboratoire inertiel du LRBA.

Le programme du STAé confié à SAGEM avait pour objectif de développer par étapes successives un système de navigation par inertie pour avion de combat, à partir de composants inertiels flottés, à un degré de liberté, issus de la filière d'origine Kearfott.

Ce projet impliquait des études approfondies et des développements technologiques importants dans de nombreux domaines différent. Il comportait des phases d'études de base et d'études appliquées, de réalisation de maquettes et de prototypes expérimentaux, d'essais pour la mise au point, l'expérimentation et l'évaluation de composants et d'ensembles complets, effectués dans les laboratoires du constructeur à Argenteuil, du STAé et sur avions au CEV.

LES ÉTAPES PRINCIPALES DU PROGRAMME STAÉ-CEV-SAGEM DE NAVIGATION PAR INERTIE POUR AVIONS

➲ Les premières commandes (1957) eurent pour but la réalisation d'une maquette fonctionnelle, sans contrainte particulière d'encombrement ni de condition d'emploi. Après l'étude et la réalisation d'une maquette de principe "un axe", puis la réalisation d'une centrale d'attitude (équipée de trois gyroscopes flottants Kearfott 2502-2 et d'un accéléromètre double Kearfott), les ensembles complémentaires permettant la fonction navigation furent étudiées et réalisées, avec la coopération de SFENA pour la fourniture des intégrateurs. L'ensemble était volumineux et lourd (plus de 200 kg) et de consommation électrique importante. L'expérimentation en vol sur Nord 2501 (1961) confirma la bonne compétence de l'équipe SAGEM conduite sous l'autorité scientifique et technique unanimement reconnue de Bernard de Crémiers. Elle mit aussi, bien sûr, en évidence la longueur du chemin restant à parcourir et l'importance des obstacles à surmonter en termes de performances, d'encombrement, de fiabilité, de conditions d'emploi… et de coûts, pour une utilisation opérationnelle.

➲ Un marché STAé de 1962 commanda à SAGEM l'étude et la réalisation d'un système prototype type S105. La plate-forme inertielle de dimensions et masse beaucoup plus réduites (22,5 litres et 16 kg) pratiquement identiques à celles de la plate-forme Litton LN3-2A des F104, était susceptible, par son encombrement et ses conditions d'installation, de préfigurer un modèle d'équipement utilisable sur avion de combat. Cette plate-forme comportait quatre axes de cardans, configuration mécanique redondante pour des conditions de vol "normales" mais nécessaire lors de manœuvres particulières engagées par le pilote (passage de la "boucle" par exemple). Elle était stabilisée par trois gyroscopes flottants type S10675B et munie d'accéléromètres pendulaires type S10625A. Ces composants inertiels miniaturisés avaient été étudiés et réalisés par SAGEM. La plate-forme était associée à un ensemble électronique purement "analogique" assurant l'alimentation électrique et le conditionnement thermique ainsi que de multiples fonctions spécifiques : asservissements des axes de cardans, commande des gyroscopes, bouclage des accéléromètres pendulaires, traitement des signaux et calculs pour l'alignement initial au sol et la navigation en vol. Cet ensemble électronique expérimental était encore particulièrement encombrant et pesant (près de 50 litres et 60 kg) et présenta des performances relativement médiocres (en fiabilité et précision) pour la plupart de ses fonctions spécifiques. Le système S105 fut expérimenté en laboratoire, sur Nord 2501-5, puis sur Mirage III A en 1965.

➲ Les contrats suivants concernaient l'étude et la réalisation d'un système prototype type S106 partiellement "numérique", associé à un calculateur numérique universel. Ce système comportait une plate-forme pratiquement identique à celle du S105 et des circuits électroniques digitalisés pour le dialogue avec le calculateur. En l'absence, sur le marché national, de calculateur numérique avionnable, le STAé fit l'acquisition, auprès de la société californienne Librascope, de calculateurs universels ASN-24, dont le modèle avait été développé pour l'aéronautique navale américaine.

Deux exemplaires de ce calculateur furent approvisionnés (en 1962-63) aux États-Unis, l'un mis à la disposition de SAGEM à Argenteuil pour des travaux techniques et de programmation, le second destiné à des essais, au sol et en vol, au CEV.

Cette opération, initialisée et conduite avec détermination par Jacques Bouvet, fut probablement pour les Services de la DTIA une des premières ouvertures de domaine dans le monde du "numérique" opérationnel embarqué.

Après une phase de familiarisation, l'ASN-24 fut programmé (en langage machine) pour expérimentation au CEV, avec des logiciels de navigation et d'échanges et des moyens d'acquisition et enregistrement de données numériques. Il fut ensuite utilisé comme calculateur universel associé au S106. L'ensemble fut expérimenté en vol sur la Caravelle 116, dédiée par le CEV à la mise au point et à l'évaluation des équipements de navigation.

En parallèle avec cette opération expérimentale ASN-24, le STAé lançait, auprès de la SAGEM, des études technologiques (notamment de mémoire à tambour magnétique miniaturisé et haute densité) puis de développement et réalisation de prototypes d'un calculateur universel embarqué type AE51. Ce calculateur fut associé à une plate-forme SAGEM-Ferranti pour constituer le système de navigation par inertie retenu en 1965 par les avionneurs et les services officiels franco-britanniques pour l'équipement des Concorde prototypes.

➲ Les prototypes S105 et S106 nécessitèrent une longue période de mise au point et d'évaluation au CEV, une montée en puissance de l'équipe d'assistance technique SAGEM, traditionnellement constructeur d'équipements pour la Marine et encore peu familière des activités d'essais en vol.

Le déroulement des essais au laboratoire ou en vol n'eut pas à supporter de graves défauts de fiabilité des composants inertiels, qui faisaient l'objet d'études d'améliorations technologiques conduites en parallèle avec les études systèmes. Peu d'intervention à "cœur ouvert" durent être effectuées par SAGEM pour le remplacement de gyroscopes ou d'accéléromètres. Les essais effectués montraient que la qualité des composants inertiels, notamment la stabilité de la dérive des gyroscopes, permettait en inertie pure d'escompter limiter, dans 95% des cas, l'erreur de navigation à un mille nautique par heure de vol, objectif visé à l'époque par les utilisateurs potentiels civils et militaires.

Les circuits électroniques prototypes eurent, au contraire, à supporter de multiples interventions, dépannages ou modifications de mise au point, fort préjudiciables au bon déroulement des programmes d'essais et à ses imbrications dans l'ensemble des activités du CEV, et peu encourageantes pour un choix à relativement court terme d'un équipement de technologie analogue.

Outre la fiabilité, un point important d'achoppement pour l'utilisation opérationnelle militaire d'un tel équipement était le temps de mise en œuvre nécessaire pour sa mise en œuvre au sol avant roulage et décollage (temps de stabilisation thermique de la plate-forme et de ses composants inertiels, puis de réalisation, en mode automatique et autonome, de la compensation de la dérive moyenne des gyroscopes et de l'alignement initial du cœur de la plate-forme). Sur les systèmes prototypes, ce temps de mise en œuvre pouvait atteindre une heure. Bien des progrès seraient nécessaires pour atteindre une durée admissible (stabilité des composants, précision des calculs et traitements de signaux, filtrage optimal…).

Au moment des choix d'équipements de navigation pour le Jaguar A, ces défauts firent préférer au côté français une solution techniquement et opérationnellement beaucoup plus éprouvée (analogue dans son principe à celle du Mirage III E, mais avec un calculateur de navigation en technologie numérique).

Six à sept ans plus tard, la poursuite des actions, les progrès accomplis, les conditions opérationnelles particulières de mise en œuvre à partir de porte-avions et de missions principales au-dessus de la mer conduisaient à retenir un système de navigation par inertie SAGEM pour le Super-Étendard. Le succès de cette décision devait largement orienter le choix de l'inertie pour les grands programmes d'avions et hélicoptères militaires suivants : Mirage 2000, ATL 2, Rafale, Tigre, NH90…

➲ À la fin des années soixante, le Centre d'essais en vol expérimenta de nouveaux systèmes prototypes SAGEM.

Les S108 (1967) étaient équipés de composants inertiels de même type, mais quelque peu améliorés et d'une électronique de plate-forme plus performante et plus compacte associée à un calculateur ASN24V de conception plus moderne. Le CEV put constater un certain progrès dans la durée d'alignement initial et la précision de navigation en vol. Il eut également l'occasion d'effectuer des premiers essais en vol de navigation hybride constitué par ce système inertiel et un radar doppler Marconi AD560.

Fin 1970, le LEA recevait et expérimentait le prototype S200 d'une nouvelle génération de système, intégrant dans un boîtier unique (environ 25 l et 20 kg) la plate-forme, l'électronique de servitude et de bouclage digitalisé de la plate-forme. Les calculs d'alignement et

de navigation autonome étaient effectués par un analyseur différentiel digital (DDA) intégré également dans le même boîtier. Cet ensemble assurait ainsi sa fonction complète de navigateur inertiel de manière autonome, sans nécessiter de liaison avec un calculateur numérique de bord.

GUIDAGE INERTIEL DE MISSILES TACTIQUES : AS 33

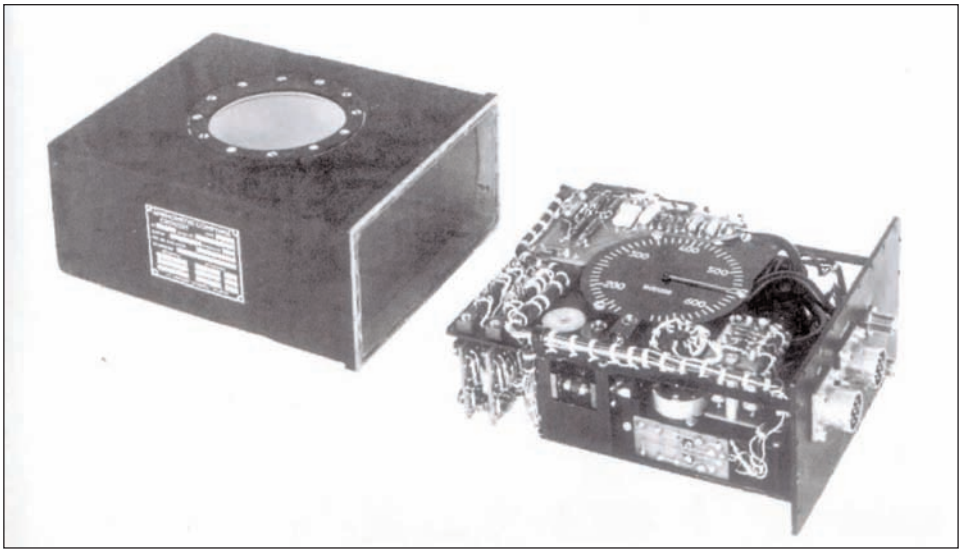
Pour ce programme en coopération franco-allemande, la direction était exercée par le STAé. La responsabilité technique était exercée par le bureau Navigation pour le système de guidage inertiel du missile et l'adaptation aux systèmes de navigation des avions auxquels les missiles étaient destinés à l'origine : le Mirage III E et son système de navigation doppler, pour l'armée de l'Air ; le F104 G et son système de navigation par inertie Litton LTN 3, pour la Luftwaffe.

Le système de guidage était original : son principe, conçu par M. Emile Stauff (directeur des Engins tactiques à Nord-Aviation), était basé sur un dispositif inertiel à deux gyroscopes à deux degrés de liberté – un gyroscope de verticale et un gyroscope dit axial – supportant trois accéléromètres pour la mesure des accélérations axiale et transversales, avec calcul analogique des vitesses et des écarts par rapport à un objectif géographique, et l'élaboration des ordres de guidage.

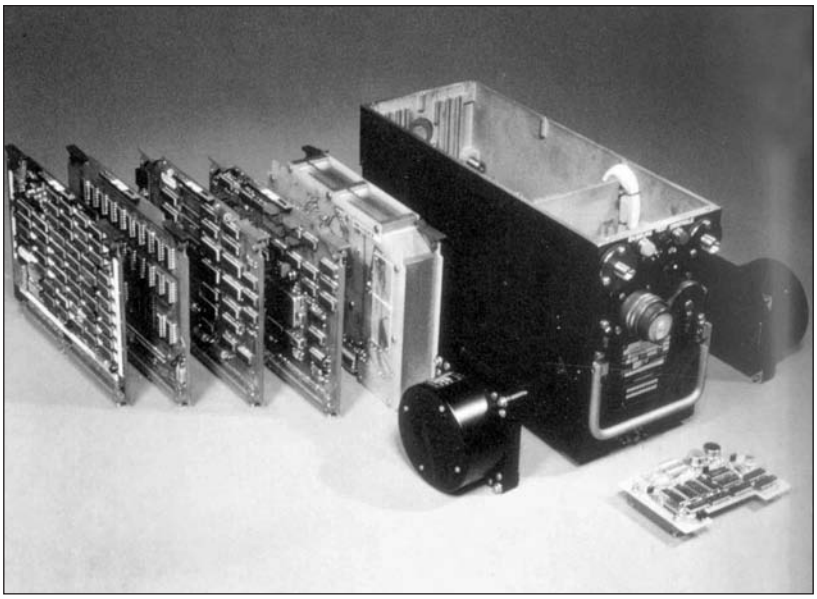
Le cœur inertiel "éclaté" fut étudié et réalisé en double source, en sous-traitance de Nord-Aviation par SFENA (en coopération avec Bodenseewerk), d'une part, et par SAGEM, d'autre part.

Le programme d'ensemble AS 33 fut arrêté avant l'achèvement complet du développement, mais les bonnes performances constatées de son système de guidage conduisirent à adopter cet ensemble, centrale inertielle et calculateur analogique, pour plusieurs générations de missiles tactiques, le Cormoran AS 34 développé par la RFA, et les MM 38, MM 40, AM 39, développés par Nord-Aviation. Pour ces missiles, cet ensemble constituait un dispositif de pré-guidage avant guidage terminal par auto-directeur. Le Pluton fut également équipé de cet ensemble.

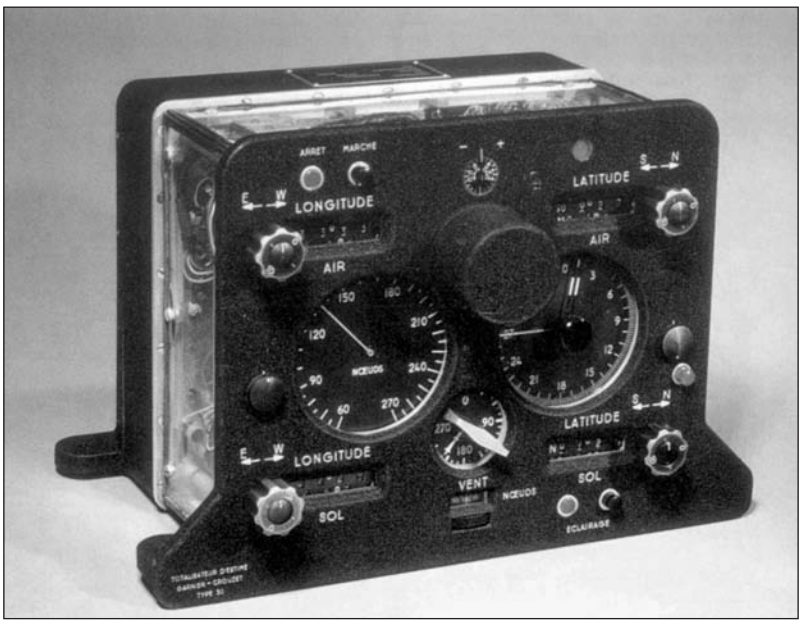
Gérard Bonnevalle



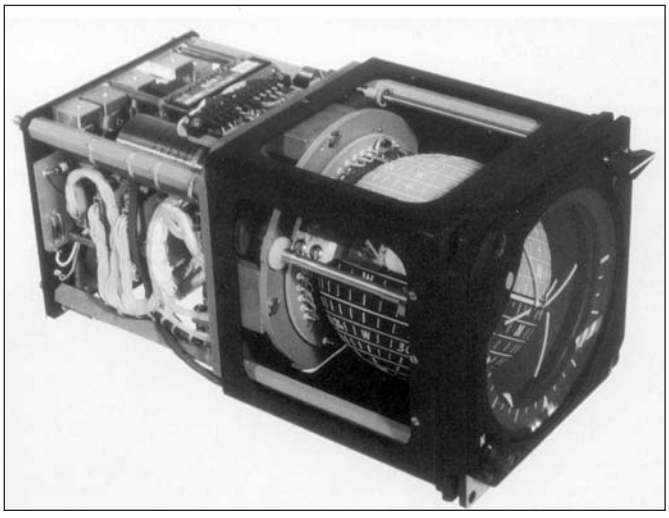
Anémomètre compensé Crouzet type 24 (Source GIFAS).



Centrale aérodynamique Crouzet type 90 (1980) (Source GIFAS).



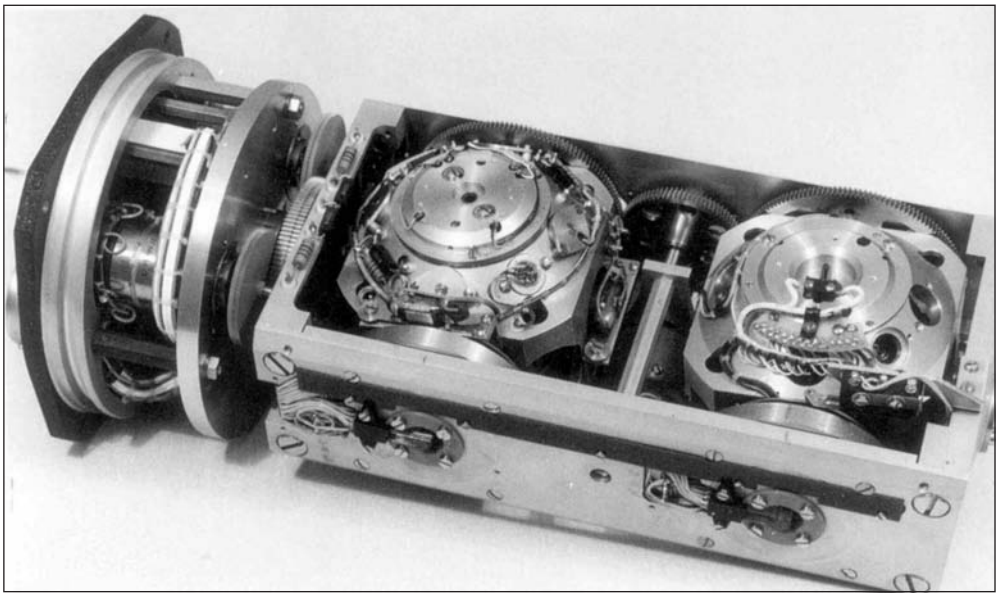
Totalisateur d'estime Crouzet (1950) (Source GIFAS).



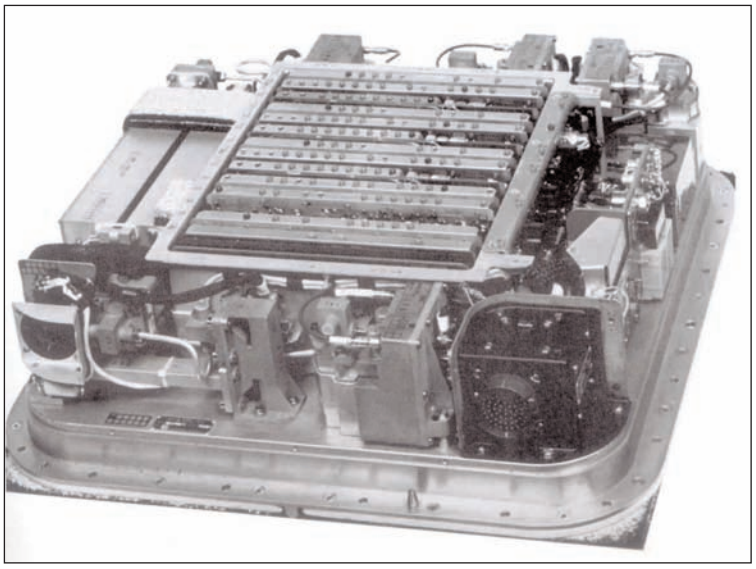
Indicateur sphérique SFIM, permettant la présentation combinée des informations d'assiette et de cap délivrées par une centrale gyroscopique (Source GIFAS).

SEXTAN. Système de navigation Crouzet – SFENA pour hélicoptère
(Source GIFAS)
De gauche à droite :
– l'indicateur de navigation
– le poste de commande, avec visualisation alphanumérique à tube cathodique
– la centrale de navigation hybride, avec son bloc de trois gyros laser
– le magnétomètre statique trois axes
– les capteurs anémométriques
– la sonde de température.
N.B : Un radar Doppler, non représenté ici, fournit l'information de vitesse/sol à la centrale.

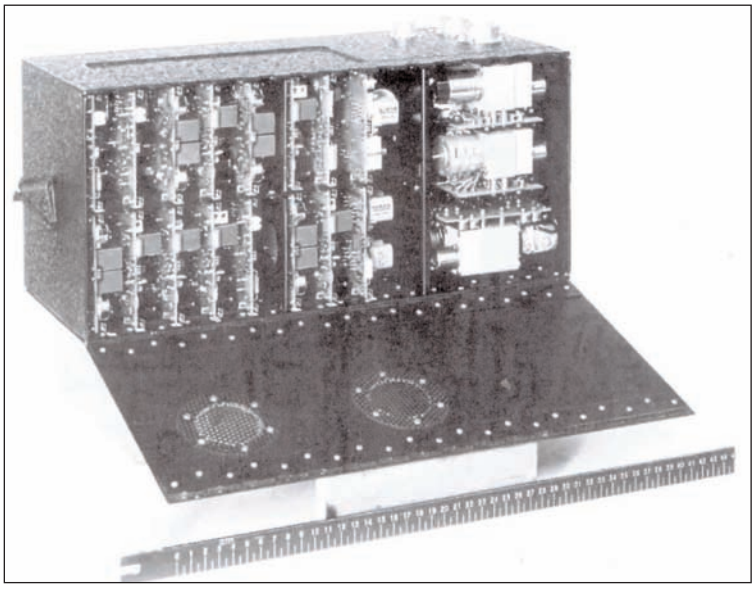
Calculateur et indicateur de navigation NADIR (Crouzet), pour hélicoptères Gazelle et Puma (Source GIFAS).



Centrale bigyroscopique miniature SFIM (Source GIFAS).

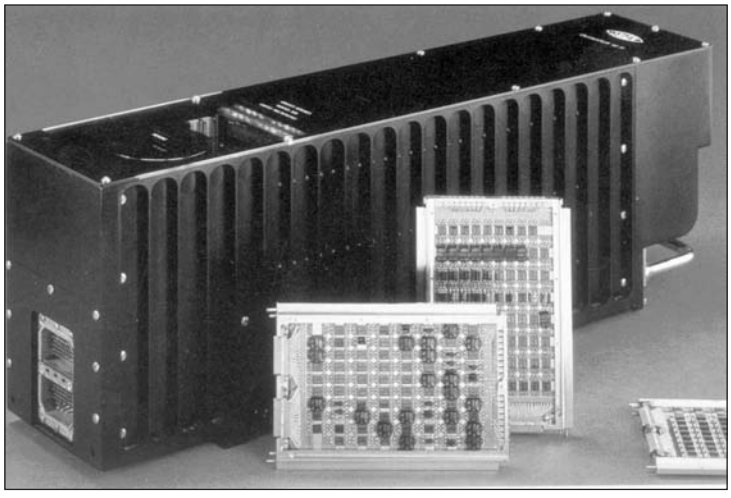


Radar Doppler de Navigation RDN type 72 ESD (1970), pour Jaguar (Source GIFAS).

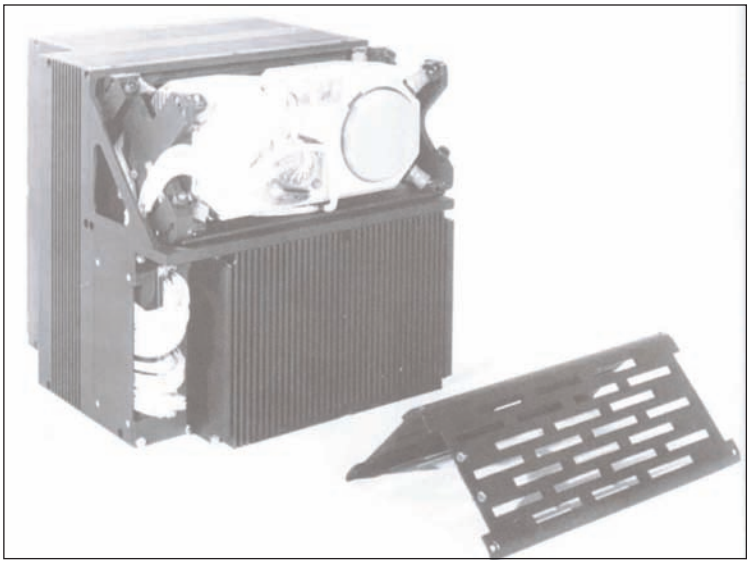


Partie de calculateur de navigation-bombardement ESD du Mirage IV (1959) (Source GIFAS).

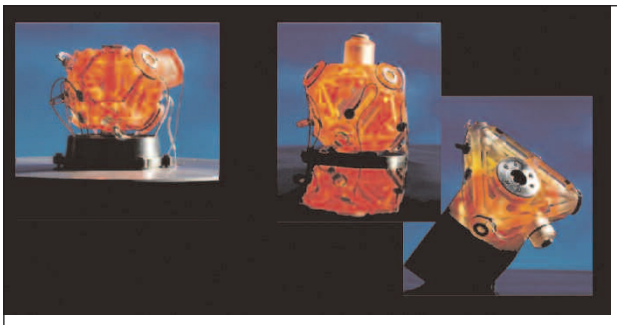
A l'arrière-plan, la première centrale inertielle expérimentale française, réalisée par SAGEM. (à gauche : la plate-forme à trois gyros flottants et à deux accéléromètres pendulaires à droite : son armoire électronique) Au premier plan, l'ingénieur présente les mêmes sous-ensembles en version pour missiles balistiques, réalisée après dix années de travail (1961-1971) (Source GIFAS).



Calculateur, avec mémoire à tambour magnétique SAGEM type AE 51, utilisé pour le prototype de Concorde (1966) (Source GIFAS).

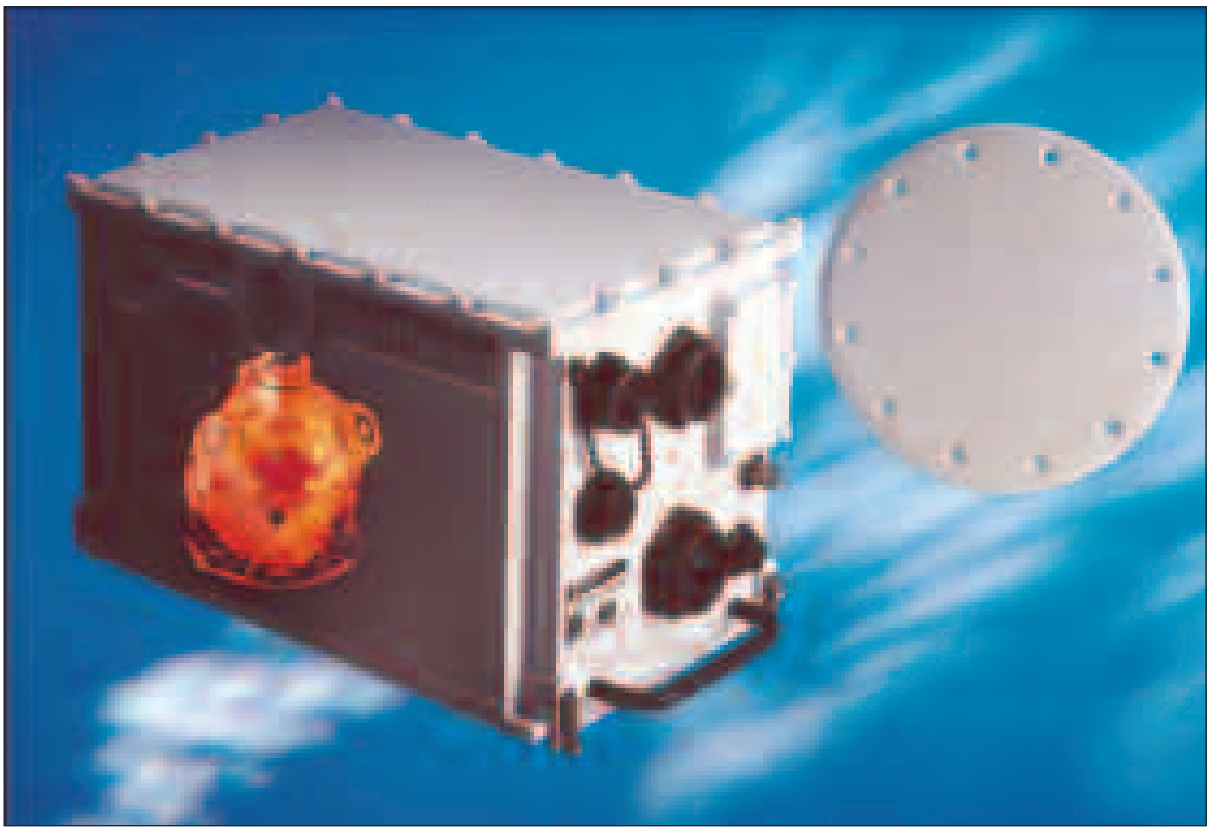


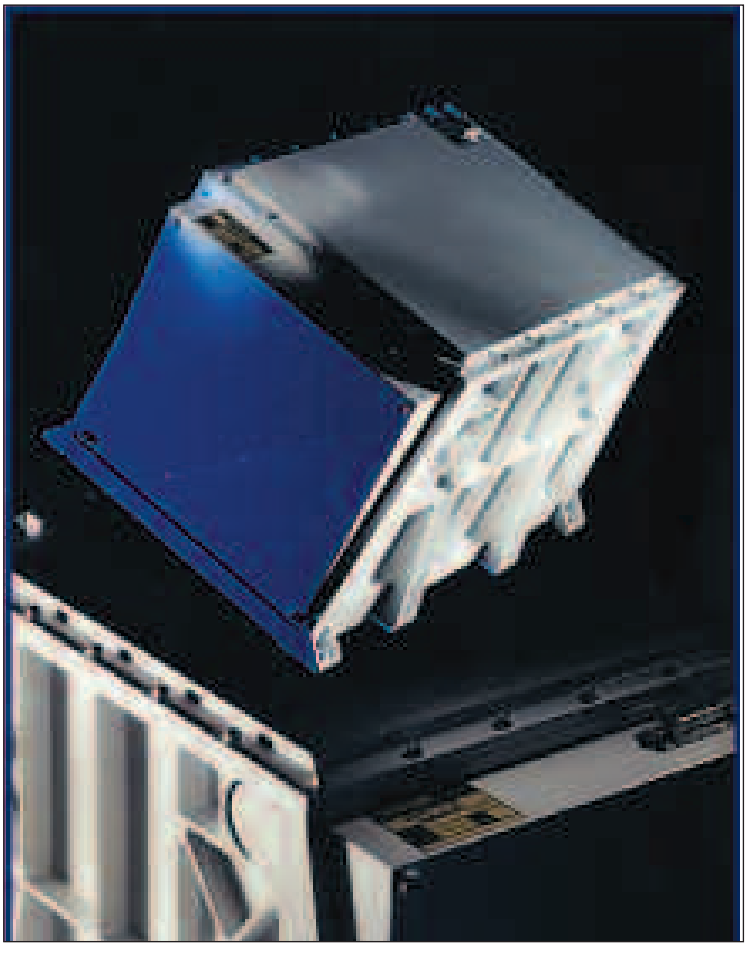
Centrale inertielle à composants liés "Strapdown" (1980) (Source GIFAS).



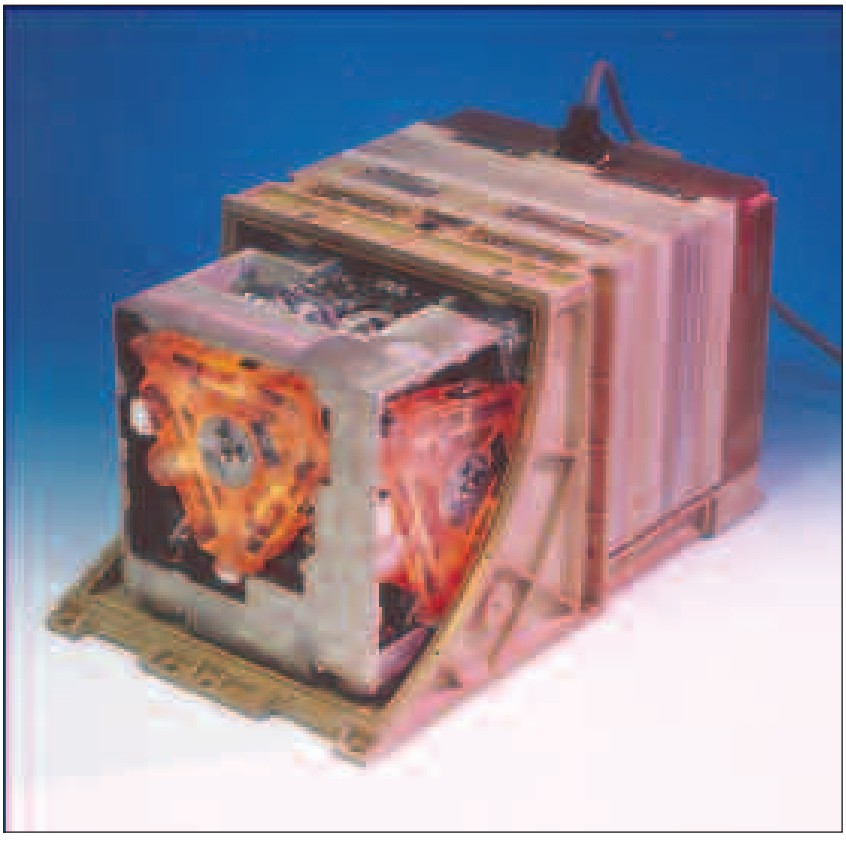
La gamme de gyromètres laser Thales (Source Thales).

Centrale TOTEM 3000 de Thales (Source Thales).

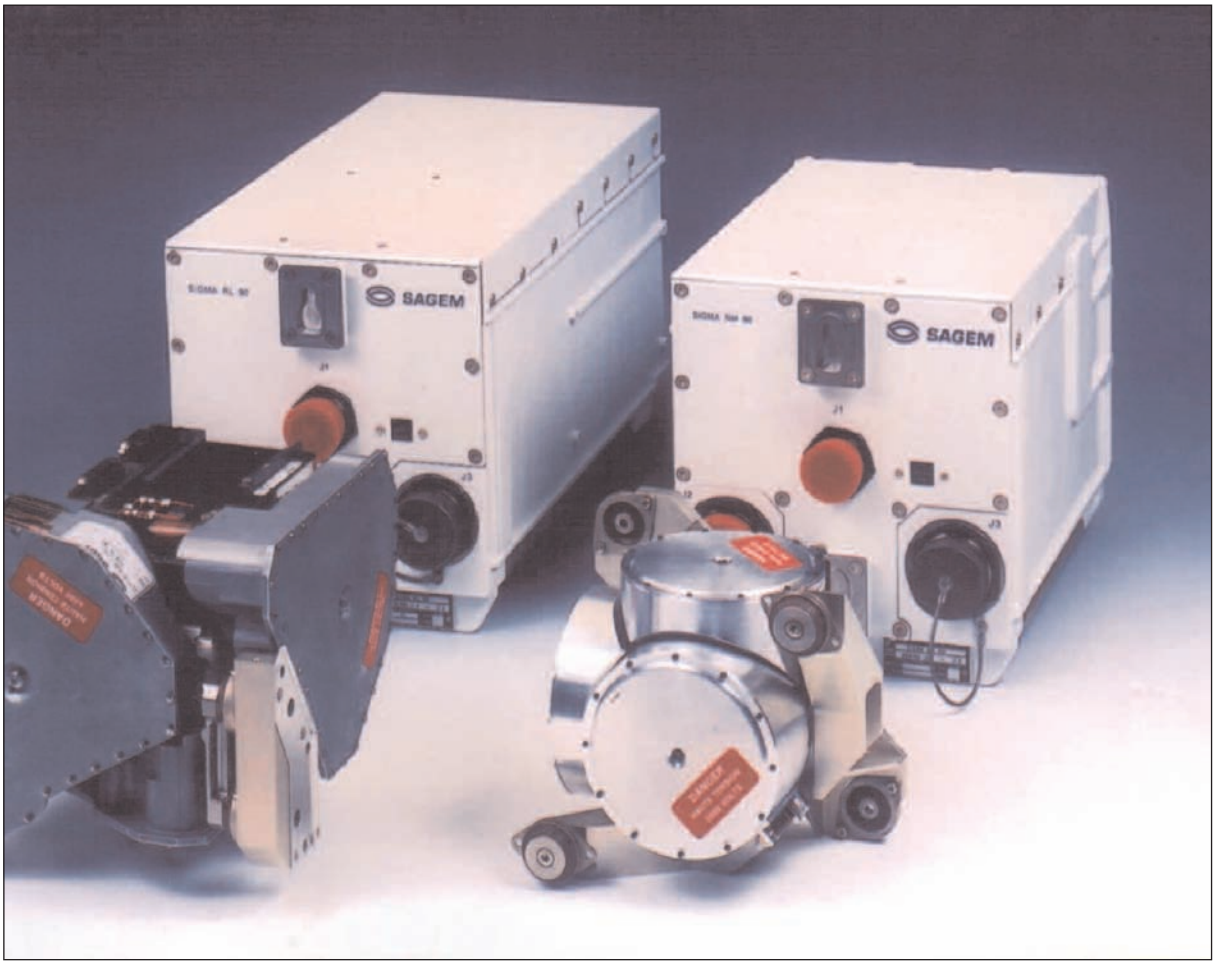




Centrale Quasar Thales (Source Thales).



Centrale Quasar 3000 Thales (Source Thales).



Système de navigation inertielle SIGMA (Famille de systèmes modulaires, celui du Rafale est équipé de gyrolasers de 32 cm - périmètre actif, celui du NH 90 de gyrolasers de 16 cm).
(source SAGEM)

Senseurs inertiels

Les accéléromètres

Type	Précision	Application
Pendulaire non asservi	**10^{-1} g - 10^{-3} g**	**Pilotage**
Pendulaire asservi	**10^{-3} g - 10^{-5} g**	**Guidage, navigation**
Gyro balourdé PIGA	**10^{-4} g - 10^{-5} g**	**Guidage, navigation**
Lames vibrantes	**10^{-3} g - 10^{-4} g**	**Pilotage, guidage**

Senseurs inertiels

Les gyroscopes

Type	Dérive (degré/ heure)	Application
Gyromètre classique	**10 à 100**	**Pilotage, stabilisation**
Gyro flottant	**0,001 à 0,1**	**Guidage, navigation**
Gyro accordé (TRG)	**0,01 à 1**	**Guidage, navigation**
Gyro à suspension électrique	**0,0001 à 0,001**	**Navigation SNLE**
Gyrolaser (RLG)	**0,001 à 0,01**	**Guidage, navigation**
Gyro à fibre optique (FOG)	**0,1 à 10**	**Stabilisation, visée**
Gyro vibrant	**0,01 à 1**	**Guidage**

La transition "douce" d'ULISS vers SIGMA

**Un boîtier unique, aux mêmes dimensions F3,
pour toutes les versions ULISS, et, plus tard, pour la famille SIGMA**

Les senseurs

Famille ULISS	Système expérimental	Famille SIGMA
Gyroscopes TRG	Gyroscopes TRG	Gyroscopes RLG
sur plate-forme	en "strapdown"	en "strapdown"

L'électronique

Pour la transition dpuis la famille ULISS vers la famille SIGMA, l'électronique évolue indépendamment des senseurs inertiels. Cette évolution s'effectue :

– en fonction de la technologie disponible (miniaturisation, consommation, rapidité)

– selon les fonctions à réaliser (intégration de la carte GPS, interface bus, etc...)

Le processeur rapide "plate-forme virtuelle" est lié au bloc strapdown.

Le processeur de mission et la bibliothèque de modules de logiciels de traitement et de mission ne sont pas affectés par l'évolution des senseurs.

Source SAGEM Division Aéronautique et Défense

L'apport des références inertielles aux véhicules

(La précision de Navigation n'est pas toujours le critère déterminant du choix)

	Avions de combat	Avions civils	Hélicoptères	Bâtiments de surface/sous-marins	Véhicules terrestres	Géodésie
Discrétion Autonomie (indépendance du sol)	X		X	X		
Facilité d'installation : pas d'antenne, pas d'antenne pas de position imposeé, pas de réglage d'un type d'avion à l'autre	X Retrofit en particulier	X	X	X	X	
Fournit la verticale vraie (Schüler)	X Bombardement/Tir de missiles	X Décollage	X	X Système d'armes		
Fournit une vitesse instantanée non bruitée	X Bombardement/Tir de missiles		X Doppler reste nécessaire (Inertie-Doppler)	X		
Précision de la position Inertie pure	X 0,8 Nm/H	X 0,8 Nm/H	X % de la distance parcourue	X 1 Nm/H/24H - Inertie-Loch	X Recalage de vitesse nulle (qqs mètres)	X Recalage de vitesse nulle (qqs centimètres)
Recherche le Nord géographique de façon autonome	X	X	X	X Remplace le gyro-compas	X Orientation d'artillerie 1 mrd	
En fonctionnement hybride (filtrage de Kalman) alignement sur base mobile - précision de navigation Harmonisation automatique du missile	X Inertie-GPS Inertie-Tercor Inertie-point radar Inertie-Infra-rouge, etc ...	X Inertie-GPS Inertie-ADS (Air Data)	X Inertie-GPS-Doppler Vitesse nulle quelques mètres	X Inertie-Loch-GPS	X Inertie-GPS	X Inertie-GPS
Système strap-down : fournit les vitesses angulaires	X Commandes de vol	La standardisation ARINC ne l'inclut pas	X Commandes de vol		X Stabilisation/viseur de tir	
Inclut un calculateur numérique rapide pouvant être partagé avec d'autres fonctions de calcul	X Navigation / attaque	La standardisation ARINC limite à Nav et Air Data	X			

Légende : X, le paramètre déterminant dans chaque secteur d'application

Le système du NH 90 est la synthèse de toutes les expériences de 40 ans d'inertie en France (Avion-Hélico-Alignement à la mer-Alignement de vitesse nulle)
Très précis, fiable, modes de fonctionnement unique Navigation/Alignement, couvrant toutes les situations (alignement au sol, sur-bateau-en-vol)

20 ans d'expérience dans le domaine du filtrage de Kalman

Super-Étendard

Alignement à la mer sur porte-avions

Mirage 2000

Corrélation d'altitude, recalage sur point, navigation hybride GPS P(Y)

Navigation terrestre

Odomètre, recalage à vitesse nulle, couplage serré P(Y), alignement en marche

Applications marines

Alignement à la mer sur loch, navigation hybride GPS P(Y)

Rafale

Alignement à la mer, corrélation d'altitude continue, navigation hybride GPS P(Y)

NH 90

Alignement en vol et à la mer, couplage serré GPS C/A ou P(Y), hybridation DVS, recalage à vitesse nulle pendant l'atterrissage

SAGEM SA *Division Aéronautique et Défense*

SAGEM

SAGEM SA - Siège social: 27 rue Leblanc - 75512 PARIS CEDEX 16 - FRANCE - S.A. au capital de 33 300 000 € - 562 082 909 R.C.S. PARIS

ANNEXE A 6

ÉQUIPEMENTS DE GUIDAGE PILOTAGE POUR MISSILES BALISTIQUES ET STRATÉGIQUES

Introduction

La réalisation des missiles balistiques des forces nucléaires stratégiques a exigé le développement d'un ensemble de nouveaux équipements de haute technologie : la centrale inertielle de guidage et son calculateur numérique associé pour le contrôle du mouvement en vitesse et en position du missile sans aucune aide extérieure, le bloc électronique de pilotage et les asservissements hydrauliques de tuyères pour le contrôle du mouvement de l'engin autour de son centre de gravité.

La centrale inertielle est constituée à partir de deux types de capteurs : le gyroscope et l'accéléromètre. Le grand soin apporté à la réalisation des gyroscopes et des accéléromètres permet de disposer d'un trièdre de mesure des forces appliquées au missile d'une grande stabilité (grâce à la très faible dérive des gyroscopes) et d'une mesure également très précise de ces forces (grâce à la grande précision des accéléromètres). L'élément sensible de la centrale ou cœur inertiel comprend généralement trois gyroscopes et trois accéléromètres ; il est monté sur trois axes de cardan sur lesquels sont placés des moteurs d'asservissement qui permettent au trièdre de mesure de garder l'orientation de départ (obtenue par "alignement" sur le nord et la verticale au lancement) par rapport à laquelle on connaîtra l'attitude du missile par lecture de la position des axes de cardan. Les calculs qui, après avoir tenu compte de l'effet des forces de gravitation et des conditions initiales, donneront la vitesse et la position du missile sont effectués par le calculateur de guidage. À partir des données de la centrale inertielle et du calculateur de guidage, des ordres sont envoyés au bloc électronique de pilotage pour positionner le missile autour de son centre de gravité et orienter la poussée des tuyères pour aboutir au point d'arrêt de la propulsion qui permettra à la charge utile d'atteindre le but fixé à l'issue de sa trajectoire balistique.

HISTOIRE DE LA MISE EN SERVICE DE CES ÉQUIPEMENTS

Cette histoire a été relatée par les responsables successifs du bureau guidage-pilotage de la direction des Engins (DEN) qui se sont succédé de 1958 à 1995 :
- Jean-Claude Renaut, de 1958 à 1965 ;
- Michel Lamy, de 1966 à 1971, également directeur du programme Diamant ;
- Daniel Pichoud, de 1971 à 1979 ;
- Jean-Yves Le Gac, de 1979 à 1984 ;
- Jean Moret, de 1984 à 1990 ;
- Arnaud Salomon, de 1991 à 1994 ;
- Jean-Luc Fauquembergue, de 1994 à 1996.

Acteurs :
- EMA, EMAA, Groupe des engins balistiques de la DMA créée en 1961 et qui deviendra la DGA en 1965.

Industriels :
- ystémier : SEREB qui fut ensuite intégrée dans AÉROSPATIALE ;
- équipementiers : LRBA, SACM (devenue partie d'ALCATEL), SAGEM, SFENA, SFIM.

1. DE 1958 À 1965 : PÉRIODE DES CHOIX ET DES DÉVELOPPEMENTS

L'histoire commence par la décision du général de Gaulle, chef de l'État, de créer une Force nucléaire stratégique. L'état-major de l'Air crée un groupe fondateur, sous la présidence du général Challe. Ce groupe reçoit l'officier américain responsable du système d'armes Minuteman. Celui-ci parle des techniques souhaitables non seulement pour les systèmes à très longue portée, mais aussi pour les systèmes à moyenne portée. Il est très clair : il faut éliminer la propulsion à liquides qui ne connaît pas d'effet d'échelle permettant une quelconque extrapolation. Pour le guidage, seule l'inertie, avec centrale à cardans externes et gyroscopes flottants, conduit à des matériels fiables et compacts, compatibles avec des lanceurs opérationnels.

Après quelques séances, ce groupe fondateur, qui était purement Air, disparaît. Son président sera d'ailleurs, peu après, impliqué dans les événements d'Algérie. Le Groupe des engins balistiques, créé au sein du Service technique aéronautique et dirigé par l'ICA Faisandier, sera rattaché directement à la DMA, dés la création de celle-ci, et recevra alors des ingénieurs en provenance des autres corps de l'armement : Terre, Génie Maritime, Poudres.

En ce qui concerne l'inertie, les techniques et l'organisation vont, à vrai dire, être trouvées par tâtonnement, à partir des succès ou des échecs des différentes voies explorées : nous sommes alors en 1958-1959.

SAGEM propose une réalisation sous licence de la firme américaine Kearfott : centrale à cardans externes à base de gyros flottants et d'accéléromètres pendulaires.

De son côté, SACM propose une licence Honeywell, mais ses relations avec cette firme sont moins avancées que celles entre SAGEM et Kearfott. SACM est également prête à s'associer à d'autres équipementiers français, SFENA et SFIM, qui, seuls, ne peuvent pas proposer de solution globale.

Sous l'impulsion de M. Jean Blancard, secrétaire d'État à l'Air, une nouvelle société d'études est créée, la SERNI, à laquelle est affecté M. Jean Carpentier. Cette société, filiale commune de SACM, SAGEM et de SFENA, est dirigée par M. Roger Julia, président de la SACM. Le directeur technique en est M. B. Hamel de SFENA.

Le LRBA a une solution française extrapolée des réalisations allemandes pour le V 2. Il a réuni une équipe autour d'anciens ingénieurs allemands, le projet est une centrale trois axes à cardans internes, à base de gyroscopes classiques à roulements et d'accéléromètres à gyroscopes balourdés (accéléromètres intégrateurs).

Les trois solutions sont conduites en parallèle

Entre-temps, les études de systèmes ont été lancées. Toutes les possibilités de lancement sont envisagées, même celle de lancement par avion. On peut voir les présidents de Dassault, de Nord-Aviation et de Sud-aviation, dans les couloirs de la DMA, venir défendre des propositions de systèmes air-sol stratégiques à partir d'engins balistiques lancés du Mirage IV, de Caravelle ou du Transall. Les centrales de guidage par inertie auraient bénéficié d'un recalage par visée sur étoile !

Assez vite, les solutions de lancement terrestre puis de lancement sous-marin sont retenues. Comme il n'existait pas, chez aucun systèmier, d'équipe déjà formée pour un projet aussi nouveau et aussi vaste, que ce soit chez les avionneurs ou à la DEFA et à la DCAN, une société ad hoc est créée en septembre 1959, la SEREB (Société d'études et de réalisation d'engins balistiques), qui recrute dans les corps d'ingénieurs militaires et dans l'industrie. Les directions générale et technique sont constituées d'ingénieurs de l'air, de l'armement terrestre et des télécommunications. Plus tard, des ingénieurs armement marine (Génie Maritime) la rejoindront pour prendre la responsabilité du MSBS et de son installation sur sous-marin. Au début, la SEREB réalise des projets de systèmes et de plans-programmes qui vont servir de cadre pour les choix dans le guidage inertiel.

Le système LRBA est assez vite écarté, car trop encombrant et trop lourd, ce qui le rend incompatible avec les projets de lanceurs depuis les silos ou les sous-marins. De plus, le système LRBA ne pouvait s'appliquer à la navigation des sous-marins qui nécessitent une précision de l'inertie supérieure d'un ordre de grandeur à celle des engins, même si cette exigence est un peu moins difficile à satisfaire du fait du volume plus grand et de l'ambiance moins sévère.

D'autre part, les rapports avec les États-Unis, bons au début de la période, se détériorent assez rapidement. Cependant, la SAGEM a avancé suffisamment vite dès le début de sa prise de licence pour que les rapports restent possibles avec les industriels et les centres de recherche de l'État. Un ingénieur de l'air pourra ainsi effectuer un stage de longue durée chez Kearfott.

Si les performances et les dossiers d'études sont très strictement protégés, les détails de fabrication le sont moins et la SAGEM saura, grâce à son propre savoir-faire, entretenir en la matière un dialogue fructueux. Or, la technologie est essentielle, comme le montreront les "épidémies" que subiront régulièrement les composants, du liquide de flottaison des gyros à celui d'amortissement des accéléromètres, des amenées de courant (pig tails), ou encore des axes des pendules des accéléromètres. Par contre, les relations entre SACM et Honeywell restent limitées au niveau des projets et dépendent des décisions du client qui ne viennent pas.

La SERNI reçoit un accueil mitigé des industriels. SAGEM a l'appui de la DCAN pour le système de navigation des sous-marins, en dehors du domaine de responsabilité de M.Blancard.

En définitive, le choix de SAGEM est fait : au cours d'une visite de M. Messmer, ministre de la Défense, la centrale inertielle de navigation pour sous-marin (CIN) et la centrale du SSBS sont présentées sous une forme acceptable, bien que pas encore opérationnelle.

La SERNI est dissoute, la SFENA se concentre sur les pilotes automatiques et sur les gyroscopes plus classiques. À partir de 1970, la SFENA sera fournisseur de systèmes inertiels pour le missile EXOCET, dans sa phase pré-guidée, en parallèle avec SAGEM.

Une équipe de la SFIM, qui avait acquis un savoir-faire dans les gyroscopes à paliers à gaz, rejoindra la SAGEM qui intégrera ce type de palier dans les gyroscopes des centrales pour sous-marins.

L'équipe LRBA sera chargée des essais des matériels inertiels, en premier lieu des composants (gyroscopes et accéléromètres). Le LRBA mettra en place les moyens, uniques en France, permettant de simuler les ambiances et l'accélération du lanceur et d'étalonner les composants avec la précision nécessaire pour le tir balistique.

Cette organisation et l'effort des équipes seront pleinement validés par le tir réussi du premier lanceur spatial Diamant en 1965 et par celui d'un engin guidé, le VE 231, lancé d'Hammaguir sur Djanet en 1965. Ce tir VE 231 de la SEREB fut réalisé en étape des programmes des missiles opérationnels SSBS et MSBS, grâce, comme le Diamant, à des lanceurs à propulseurs liquides du LRBA. Ceux-ci, qui avaient été écartés de la solution opérationnelle pour les raisons énoncées précédemment, se révélèrent très précieux dans le déroulement du programme FNS, du fait de leur disponibilité plus rapide, de leur fiabilité et de leur adaptation au lancement de satellites. Ces deux tirs furent des succès complets, celui de Diamant fut très médiatisé, alors que le tir sur Djanet fut beaucoup plus discret. Ces nouvelles technologies étaient si peu communes et les résultats si peu attendus que les militaires basés à Djanet pour la récupération du corps de rentrée, et qui avaient vu des gerbes de traînées dues à la retombée d'éléments du second étage, eurent comme premier réflexe de rechercher ce corps de rentrée partout, sauf près du point géodésique cible où il était tombé comme prévu !

Suite au Diamant, les systèmes inertiels français auraient normalement dû équiper le lanceur ELDO du programme spatial européen, auquel la France participait (le général de Gaulle avait voulu « faire plaisir à mon vieil ami Mac Millan »). Mais nos références étaient militaires, donc secrètes, donc non acceptées et ce furent des équipements anglais de Ferranti qui furent choisis. Ils disparurent avec l'ensemble du programme ELDO suite à son échec, mais donnèrent par la suite des soucis sur Ariane.

Quant à l'équipe SACM, qui avait été écartée des premières réalisations, elle fut orientée vers des études de composants plus performants, apparemment prometteurs : gyroscope deux axes à paliers à gaz, gyroscope cryogénique. Si le gyroscope cryogénique a rencontré des difficultés de base, le gyroscope à paliers à gaz a abouti. Ces composants auraient pu être nécessaires sur des missiles à très longue portée (ICBM) qui étaient envisagés à l'époque, le SSBS étant un peu court et le MSBS pas encore acquis. Ces voies furent abandonnées quand tout recours à des ICBM fut écarté et lorsqu'il fut certain que la filière SAGEM avait abouti.

Organisation

L'histoire, très abrégée, décrite ci-dessus montre que pour la réalisation des systèmes inertiels de la FNS, comme pour la FNS elle même d'ailleurs, la DMA (DGA depuis 1965) a adopté l'organisation de l'aéronautique et l'a mise en place ex nihilo.

- ➲ Une direction technique : le Département engins puis la DTEN créée en 1965, au sein de laquelle le STEN (Service technique engins) disposait d'un bureau guidage-pilotage spécialisé.
- ➲ Un avionneur ou systèmier : la SEREB.
- ➲ Des industriels chargés des études, production, vente, extension du fonds de commerce inertiel : SAGEM, SFENA.
- ➲ Un contrôle technique par l'État dans un centre d'essais indépendant, chargé aussi des moyens et des méthodes d'essais : le LRBA.

La DMA encadrait le processus en amont et en aval. En amont, la formation : Sup'Aéro, puis l'ENSTA mirent en place des options Équipements et des cours (asservissements, gyroscopes, servo-gouvernes, inertie). En ce qui concerne les recherches, outre SFIM et SACM, il faut citer CSF pour les études de gyroscopes à suspension électrostatique et celles d'accéléromètres à cordes vibrantes, conduites à cette époque sous l'impulsion de la DRME, sans oublier les études amont des universités : à l'époque 1958-1965, les études d'aimants pour les moteurs-couples des accéléromètres furent effectuées à Grenoble, sous l'égide du professeur Néel. En aval, les centres d'essais de l'État : au sol (le LRBA pour l'inertie) et en vol (le CIEES de Colomb Béchar).

L'encadrement industriel et économique fut assuré par la commande directe de tous les composants gyroscopes et accéléromètres aussi bien en développement qu'en série, accompagnée des enquêtes de prix correspondantes. Les systèmes de guidage complets (centrales et calculateurs) de série et leur maintenance ont fait également l'objet de commandes directes à l'issue de leur développement mené sous la maîtrise d'ouvrage du systémier.

L'effort financier permis par la FNS a été très important. La production des gyros a eu immédiatement un caractère industriel. Celui-ci a permis de mettre à jour rapidement toutes les sources de défauts et de les maîtriser à temps. Cette maîtrise s'est étendue à la qualification de plusieurs sources d'approvisionnement de matériaux ou composants (on parlait de "francisation").

Cet effort a été payé de retour. La tenue des performances annoncées dans les délais prévus a permis d'éviter des dépenses qui auraient pu être beaucoup plus lourdes.

2. DE 1965 À 1970 : LA MAÎTRISE DES TECHNOLOGIES INDISPENSABLES

À la fin de 1965, on peut considérer que la définition des systèmes SSBS et MSBS de première génération est acquise : à la phase des études de base succède la phase de développement. La Direction technique des engins de la DGA (DTEN) est maître d'ouvrage et s'appuie sur la SEREB, mandataire de l'État, qui dispose d'une équipe importante de maîtrise d'œuvre système et de suivi des développements. Les essais de matériels inertiels pour vérifier leurs performances et leur endurance sont effectués au laboratoire inertiel du LRBA qui se voit doté de moyens d'essais très performants : centrifugeuse et tables gyroscopiques de haute précision, matériels d'essais en ambiance vibratoire et thermique.

En 1967, la SEREB procède au lancement réussi des deux derniers lanceurs Diamant commandés sur marchés de la DTEN et le succès des études de base de guidage, de pilotage et de rentrée est avéré. Les essais en vol de développement de la première génération de systèmes se poursuivent jusqu'en 1971, avec les engins expérimentaux S 112, M 112, S 01, S 02, M 012 et M 013 qui permettent la résolution des derniers problèmes de mise au point et de figer les caractéristiques des équipements.

La SAGEM pour les Équipements inertiels et les calculateurs de guidage de la première génération de SSBS, Électronique Marcel Dassault (EMD) pour les calculateurs des MSBS, SFENA et LCT pour les électroniques de pilotage et Air Équipement pour les vérins d'activation des tuyères fournissent des matériels de qualité.

L'association d'un client exigeant, le STEN (Service technique des engins) de la DTEN, de solides moyens étatiques d'évaluation des réalisations industrielles (Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques-LRBA, Centre d'essais des Landes-CEL, Centre d'achèvement et d'essais des propulseurs et engins-CAEPE) et d'un maître d'œuvre système efficace, la SEREB, permet de surmonter les difficultés importantes rencontrées.

Parmi les difficultés qui ont laissé des traces dans la mémoire des ingénieurs, on peut citer les blocages en vol de tuyères rotatives, la tenue des asservissements en ambiance vibratoire intense et la validation des programmes de vol des calculateurs.

Les développements sont confortés par un solide et ambitieux programme d'études générales qui, tout en améliorant les techniques utilisées en fabrication de série, permet d'explorer la possibilité d'accéder à des programmes d'engins de plus longue portée. Ce programme comprend la francisation de certains composants importés des États-Unis, des études de gyroscopes à palier à gaz, d'accéléromètres à gyroscope balourdé (cet accéléromètre de très grande précision, utilisé sur la plupart des missiles balistiques américains sous le nom de PIGA, a fait l'objet de premières études en France à la SAGEM, en cohérence avec le projet de missile SSLP de très grande portée, dans l'optique d'une défense tous azimuts qui a été rapidement abandonnée et des études de logiciels de vol embarqués nouveaux dont l'avènement de calculateurs performants et miniaturisés allaient permettre l'emploi).

La DRME finance à la CGE la première étude en France d'un gyroscope laser.

Pour le deuxième étage du MSBS, un système de pilotage par injection de fluide dans une tuyère fixe est mis au point avec succès et un calculateur de guidage plus puissant et moins encombrant que celui de première génération utilisé sur le SSBS permet de réussir la délicate opération d'alignement, avant lancement, des centrales inertielles de guidage sur les sous-marins à la mer.

3. DE 1970 À 1980 : LA MISE EN PLACE DES PREMIERS SYSTÈMES BALISTIQUES

En 1970, les sociétés SEREB, Nord-Aviation et Sud-Aviation sont rassemblées pour former la SNIAS (Société nationale industrielle aérospatiale) qui sera bientôt mieux connue sous le nom d'Aérospatiale.

La Direction technique des engins reçoit alors de plus grandes responsabilités en matière de conduite des programmes et le bureau Guidage-pilotage (STEN-GP) du Service technique engins devient responsable de tous les programmes d'études, de réalisation et de maintenance des composants et systèmes inertiels ainsi que des calculateurs embarqués, tout en continuant à s'appuyer sur une assistance technique de l'Aérospatiale à qui sont confiées la maîtrise d'œuvre industrielle système, la rédaction des spécifications des matériels et l'étude des systèmes améliorés, à l'exclusion des études amont de composants. Tous les marchés d'approvisionnement et de maintenance de centrales inertielles, de composants inertiels et de calculateurs de guidage sont passés par le bureau Guidage-pilotage (procédure du matériel en catégorie B).

En parallèle, la DCN confie à la SAGEM le développement des centrales inertielles devant fournir les références d'initialisation pour les engins embarqués.

La première centrale expérimentale CIN M1 (gyroscopes flottants de première génération) est testée à partir de 1968 sur le sous-marin expérimental Gymnote. En 1970-1971, le Redoutable reçoit ses centrales inertielles CIN M2.

Le premier tir d'engin guidé depuis le sous-marin le Redoutable est effectué en mai 1971.

La première unité d'engin S 2 est opérationnelle en août 1971 et l'étude d'un engin S 3 amélioré et durci aux explosions nucléaires rapprochées est lancée.

Les planches en annexe présentent l'évolution technologique et l'amélioration des performances des centrales inertielles des SNLE ainsi que les caractéristiques du système SSBS S 3.

Les études d'amélioration des composants inertiels se poursuivent ainsi qu'un très gros effort pour disposer d'une centrale de guidage améliorée du point de vue précision et fiabilité avec, pour cet équipement, la prise en compte d'un coût total de possession très amélioré par rapport aux centrales de première génération. Cette centrale, réalisée par SAGEM sur spécifications et suivi détaillé du développement par Aérospatiale, équipera les engins M 20, S 3 et M 4, la partie électronique étant adaptée pour chaque engin.

Les travaux financés par les programmes balistiques contribuent grandement à faire progresser en France les techniques de miniaturisation électronique avec l'utilisation des circuits intégrés hybrides, puis des circuits intégrés à grande échelle (LSI). Il en résulte des équipements électroniques plus fiables, moins volumineux et consommant moins, ainsi que des calculateurs plus puissants et plus compacts qui vont faire progresser considérablement la précision et les possibilités des engins balistiques. Par ailleurs, les équipements électroniques sont dorénavant durcis contre les effets des explosions nucléaires.

De 1973 à 1976, grâce à une campagne d'essais approfondis sur éléments réels à l'Aérospatiale et au LRBA, des difficultés de fiabilité rencontrées pour l'alignement des centrales de guidage à la mer sont résolues.

Une nouvelle loi de guidage pour engin à ogives multiples est développée pour l'engin M 4 et est qualifiée sur un vecteur d'études de base EBE en 1978.

En parallèle aux développements MSBS et SSBS, le Bureau guidage-pilotage et les ingénieurs du LRBA interviennent sur le système de guidage de l'engin nucléaire tactique Pluton mis en service en 1974 et sur la définition des systèmes nucléaires du missile aéroporté ASMP et du missile Hadès, successeur du Pluton. Il faut mentionner également leur intervention pour la résolution des problèmes de fiabilité rencontrés sur la centrale inertielle Ferranti du lanceur Ariane.

En 1979, plus de 400 systèmes inertiels de guidage ont été livrés par SAGEM et EMD pour les engins balistiques et les premiers équipements des engins de nouvelle génération S 3 et M 4 sont en production. De nombreuses études de nouveaux composants inertiels plus performants ont été initiées.

On peut citer notamment les études de gyroscopes secs à joint flexible : variante très proche des gyroscopes des centrales de navigation des avions, ce type d'appareils a vu le jour aux États-Unis dans les années soixante-dix. Il a été développé et industrialisé en France par la société SAGEM, sur la base d'une licence de la société américaine Kearfott.

Il faut aussi citer le gyroscope laser, développé à la SFENA sur la base d'une étude DGA/DRME chez QUANTEL, qui met en œuvre un capteur dans une cavité excitée par un rayon laser, le capteur délivre directement une information numérique de vitesse angulaire absolue. La centrale à gyrolasers SFENA ne comporte aucune pièce en mouvement. Elle sera utilisée ultérieurement sur le lanceur Ariane, en remplacement de la centrale Ferranti.

Des études d'accéléromètres de divers types furent également conduites.

4. LES ANNÉES QUATRE-VINGT : MISE EN SERVICE DE LA DEUXIÈME GÉNÉRATION BALISTIQUE ET STRATÉGIQUE

En 1980, le S 3 entre en service. Le développement du M 4 est achevé.

Le M4 bénéficie, dès sa mise en service, de l'introduction d'une correction en vol des erreurs des systèmes de guidage (technique appelée également compensation des erreurs, traduction littérale du mot utilisé par les Américains, qui permet d'augmenter la fiabilité des équipements de guidage, en prenant en compte la dimension "précision", élément fort important dans l'efficacité d'un système d'armes de missiles nucléaires).

La technique consiste à mesurer périodiquement les erreurs intrinsèques de base accessibles à la mesure en utilisant la gravité locale et la rotation de la Terre comme instruments de mesure, puis à introduire les éléments appropriés dans le calculateur de guidage, qui, au cours du vol, effectue les corrections associées.

Le calculateur de guidage réalisé par ESD (Électronique Serge Dassault, ex-EMD) représente un saut technologique important en matière de miniaturisation de l'électronique et de fiabilité.

La réalisation des dispositifs de puissance pour le pilotage du missile M 4 (accumulateur hydraulique sous pression, pompe, vérins hydrauliques) est confiée à Air Équipement pour les premier et deuxième étages et à la société Avions Marcel Dassault pour le troisième étage et pour le système propulsif d'espacement des ogives multiples.

L'électronique de pilotage (bloc de commande) a été réalisée par la SFENA. Le M 4 entre en service en 1985.

Le missile aéroporté ASMP entre en service en 1986. Il comporte une centrale de guidage SAGEM, deux gyroscopes secs (à joint flexible) type GSP, trois accéléromètres secs (amortissement par air) du type A 300, analogues à ceux des avions avec compensation des erreurs de navigation en vol, une électronique durcie. Le calculateur est fabriqué par ESD. Les servo-moteurs de gouvernes électriques sont fabriqués par Air Équipement.

Hadès ne dépassera pas le stade du développement, par ailleurs réussi, en raison des premières mesures de désarmement prises par la France après la chute du mur de Berlin en 1989.

La centrale développée pour Hadès comporte pour la première fois l'utilisation de gyroscopes secs de haute précision et de trois accéléromètres pendulaires de la même filière que ceux utilisés sur le MSBS M 4 ; cette centrale nouvelle par rapport à la génération E 42, E 62 des missiles S 3 et M 4 a été développée à la SAGEM et a subi avec succès tous les tirs du développement.

En parallèle aux développements, un programme d'études d'amélioration des matériels est poursuivi.

Dans le début des années quatre-vingt, l'étude d'un système sol-sol mobile, baptisé S X, nécessite de définir une méthode d'alignement initial du trièdre de référence pour les calculs de guidage. C'est ainsi que sera relancée, auprès de la SFIM (Société de fabrication d'instruments de mesure), l'étude d'un chercheur de nord, étude initialisée lors des travaux sur l'alignement du système Pluton. Cette étude n'aura pas de suite, les travaux sur le S X sont arrêtés en 1988.

L'augmentation de portée envisagée pour les systèmes MSBS post-M 4 conduit, pour maintenir la précision requise, à rechercher une diminution des différents postes d'erreur du bilan de précision.

C'est ainsi qu'au-delà des techniques de compensation des erreurs des composants inertiels sont lancées les études d'un accéléromètre de principe nouveau sans pièce en mouvement, l'accéléromètre à poutre vibrante (accéléromètre dans lequel la fréquence propre de vibration est sensible à l'accélération, qui délivre également et directement une information digitale qui permet une intégration temporelle sans erreur ; ce type d'accéléromètre a fait l'objet d'une étude confiée à la SAGEM) et sont relancées les études d'accéléromètre à gyroscope balourdé.

Est également lancée l'étude d'un viseur stellaire ; cet équipement dont l'étude avait été initiée dans les années soixante-dix puis abandonnée après quelques années a pour but, par visée sur des étoiles connues, de recaler avec précision pendant la phase propulsée le trièdre de référence dans lequel sont effectués tous les calculs de navigation. Reprise au début des années quatre-vingt, l'étude, confiée à la SODERN (Société d'études et de réalisations nucléaires), a nécessité de nombreux travaux technologiques (capteur), algorithmiques (la recherche des étoiles) et système (pré-positionnement du missile en vol, transmission des informations à la centrale inertielle...). L'utilisation de techniques de visées particulières, permettant une réduction sensible du volume du viseur, conduisit à étudier l'intégration de ce dernier sur le cœur inertiel de la plate-forme. Le viseur stellaire et l'accéléromètre PIGA ont fait l'objet d'évaluations poussées au LRBA et constitué la base d'une étude de faisabilité d'une centrale inertielle de grande précision à la société SAGEM.

La recherche d'une réduction de la masse des équipements et de l'augmentation de la fiabilité a conduit le Bureau guidage-pilotage à maintenir une activité d'étude soutenue ; gyroscopes secs à joint flexible et gyroscopes laser, centrale à composants liés (strap-down) dans laquelle les composants inertiels sont solidaires de la structure de l'équipement, génération de puissance de pilotage par générateur de gaz et turbo-pompe, vérins électriques de pilotage (au lieu des vérins hydrauliques équipant les générations antérieures de missiles).

5. DE 1990 À 1995 : LA PRESSION SUR LES COÛTS

Les changements intervenus à l'Est font passer d'une logique privilégiant l'accroissement des performances à celle d'une diminution du coût à iso-performances. Le budget d'investissement consacré à la force de dissuasion est réduit. Les programmes sol-sol S 45, Hadès puis S 3 sont arrêtés. Le programme successeur du M 4 est ralenti et transformé en programme M 51 en 1995. Le projet d'un missile air-sol longue portée (ASLP) est abandonné au profit d'un ASMP amélioré (ASMPA).

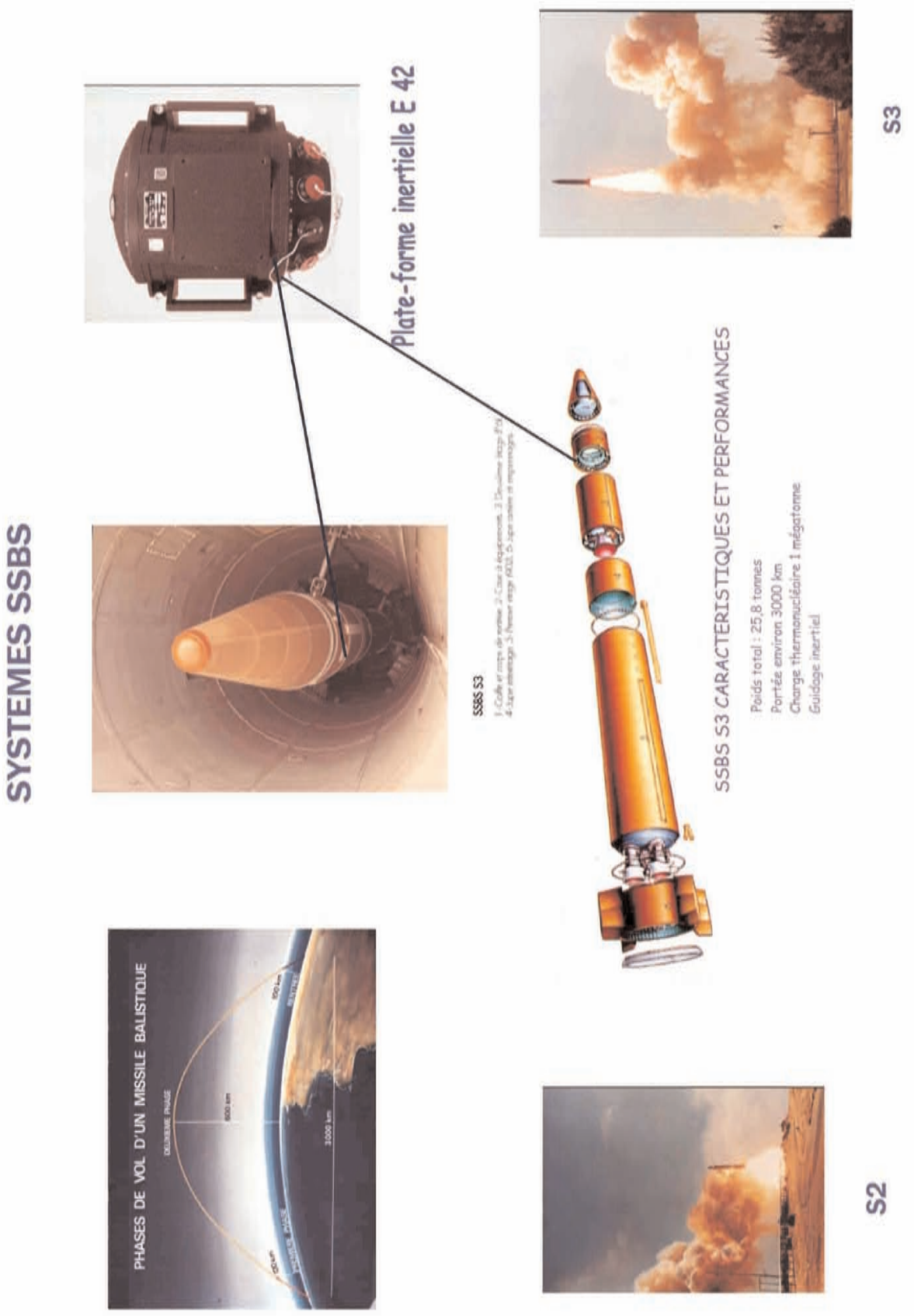
Des progrès considérables sont obtenus en matière de coût des composants inertiels grâce à la maîtrise des nouvelles technologies : accéléromètre à poutre vibrante par SAGEM et utilisation de gyromètres lasers, pour centrales à composants liés, par Sextant Avionique (devenu maintenant Thales Avionique) et également par SAGEM.

Ces nouvelles technologies s'imposent pour tous les nouveaux projets : M 51, ASMPA, ASTER, APACHE, SCALP.

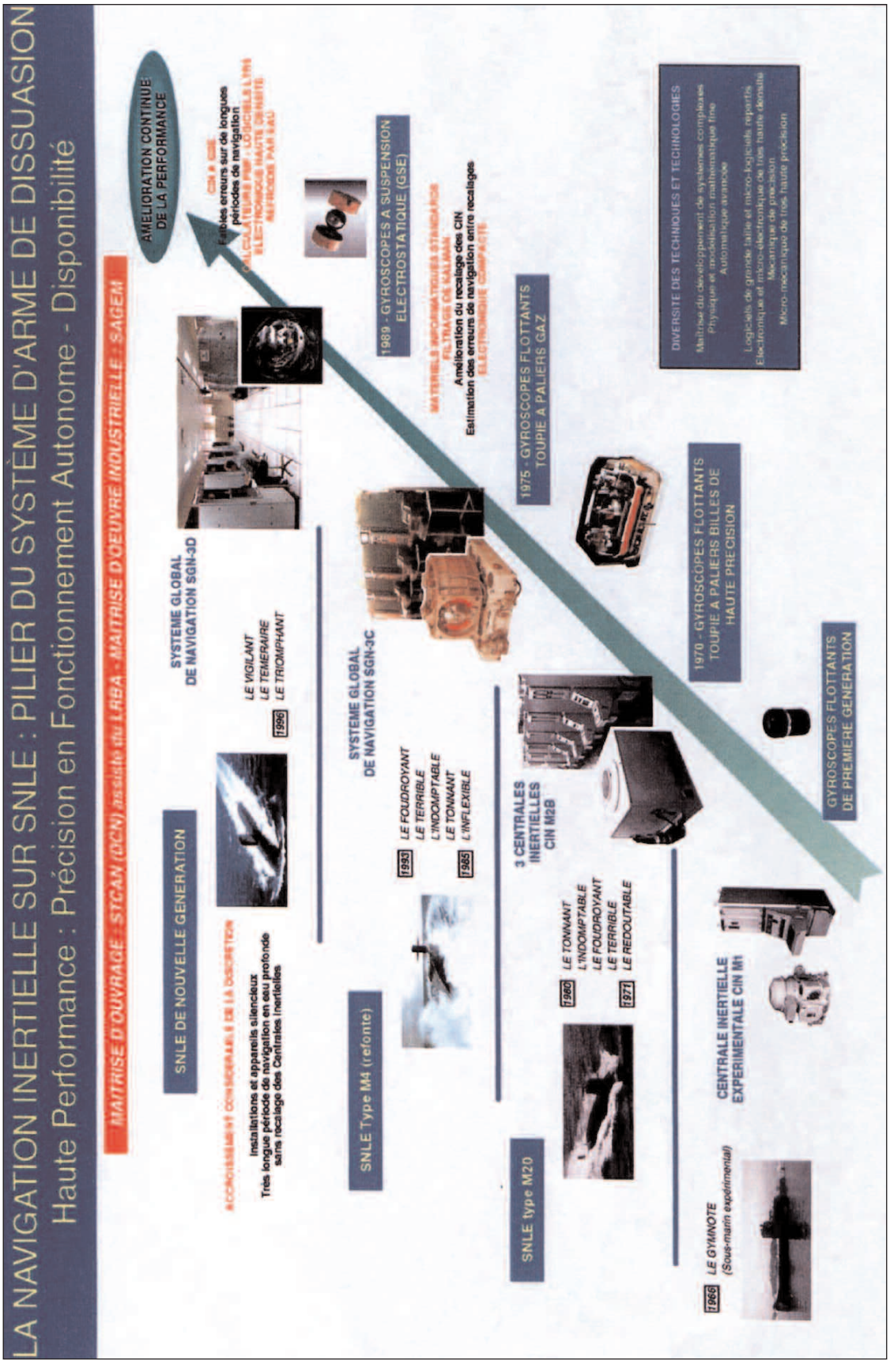
Les études d'amélioration continuent à être conduites, mais sur le principe "plus simple, donc moins cher".

Ainsi, pendant plus de quatre décennies, le guidage-pilotage des missiles balistiques et stratégiques et des lanceurs a su rester un domaine d'excellence de l'industrie de défense française. Le savoir-faire de notre industrie ne pourra cependant être maintenu que si la demande de programmes reste suffisante.

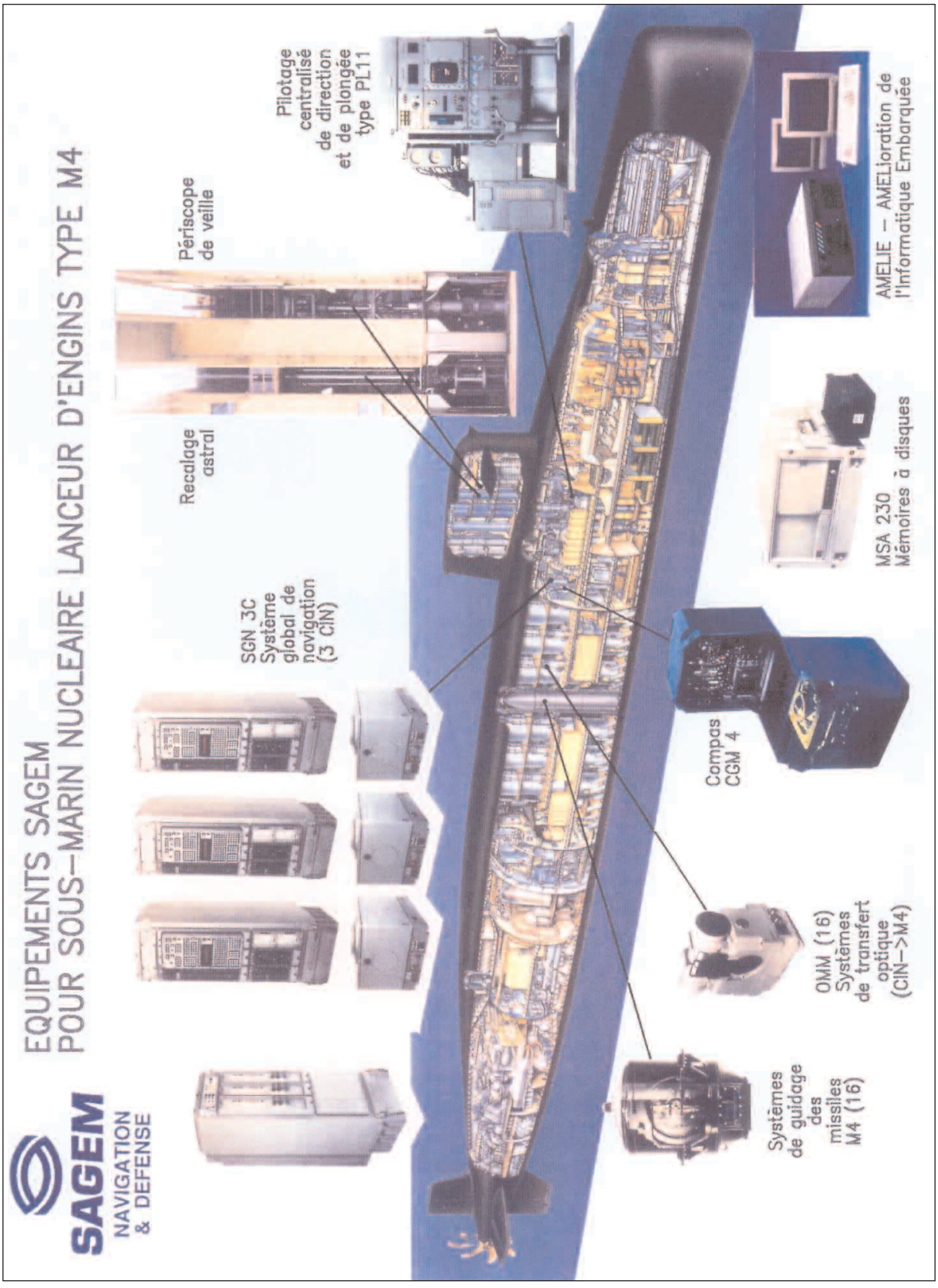
Jean-Claude RENAUT
avec la collaboration de Michel LAMY, Daniel PICHOUD, Jean-Yves Le GAC,
Jean MORET, Arnaud SALOMON, Jean-Luc FAUQUEMBERGUE.



Système de guidage-pilotage pour SSBS S3.



Historique des systèmes de guidage-pilotage pour MSBS sur SNLE (Source SAGEM).



Equipements SAGEM pour Sous-Marin Nucléaire Lanceur d'Engins type M4 (Source SAGEM).

Le 24 février 1975, à l'AMX Satory, l'Ingénieur Général Antonin Collet-Billon, Directeur Technique des Engins, présente à MM. Jacques Chirac, Premier ministre, Yvon Bourges, Ministre de la Défense, Laurent Delpech, Délégué Ministériel pour l'Armement, André Giraud, Administrateur Général du CEA, les centrales de guidage inertiel pour avions et missiles porteurs d'armes nucléaires. A l'extrême gauche, l'Ingénieur Principal Daniel Pichoud, chef du Bureau Guidage-Pilotage de la DTEn, de 1971 à 1979.

ANNEXE A 7

GUIDAGE-PILOTAGE DES MISSILES TACTIQUES

1. GUIDAGE PAR INERTIE
LES SYSTÈMES D'ARMES TACTIQUES GUIDÉS PAR INERTIE
LEUR POSITIONNEMENT DANS LE TEMPS
LES ÉQUIPEMENTS INERTIELS CONCERNÉS

Année 1958 et début des années soixante

– SSBT sol-sol balistique tactique, de Sud-Aviation ;
– MD 620 sol-sol, de Dassault Aviation ;
– Portées : quelques centaines de kilomètres. Systèmes de guidage purement inertiels, à centrale trois axes et à calculateur numérique.

Années 1962-1967

Programme AS 33 de Nord-Aviation
Développement expérimental d'un engin air-sol, sous direction commune du STAé et du BWB.

Années 1964-1966 à 1974 : le PLUTON

Les premiers contrats d'étude d'un système terrestre nucléaire tactique mobile sont passés en 1964 par la DMA à Nord-Aviation et Sud-Aviation, alors concurrents. En 1966, la fiche programme est figée et le programme lancé chez Nord-Aviation. La première mise en service est effective en 1974.

Le système de guidage inertiel est celui de l'AS 33 : deux gyroscopes classiques dont l'un porte les accéléromètres, mais la précision est plus grande (10^{-3} au niveau de l'ensemble), un calculateur analogique est associé.

Années 1968 à ce jour : l'Exocet

Le développement AS 33 conduira directement à la mise en service des engins Kormoran pour l'Allemagne et de toute la famille Exocet d'Aérospatiale, en France.

Le système utilisé est simplifié, constitué de deux gyroscopes classiques dont l'un, celui de verticale, porte les trois accéléromètres et l'autre, axial, permet le changement de coordonnées pour obtenir l'accélération dans un trièdre terrestre fixe. Le calcul du point et d'élaboration des ordres de guidage est d'abord analogique, puis il deviendra numérique à partir de la version MM 40 de l'Exocet.

Années quatre-vingt à ce jour : l'ASMP

Missile nucléaire réalisé par Aérospatiale pour l'armée de l'Air et la Marine. Il équipera le Mirage 2000 N, le Mirage 4, le Super Étendard et, plus tard, le Rafale. Centrale à inertie SAGEM, calculateur numérique Électronique Serge Dassault pour le calcul du point et des ordres de guidage, calculateur numérique Aérospatiale pour l'exécution des séquences du vol et le contrôle du bon déroulement du vol.

Années 1985 à ce jour

Systèmes MICA de MATRA, ASTER d'Aérospatiale, APACHE de MATRA. Arrivée à maturité des systèmes strap down particulièrement bien adaptés au guidage des engins tactiques, car peu encombrants, moins chers et tout à fait précis dans des ambiances sévères et pour des mouvements angulaires très rapides.

2. L'UTILISATION DES MATÉRIELS DE GUIDAGE INERTIEL DANS CES PROGRAMMES LES ACTEURS, HISTOIRE DES CHOIX ET DES ÉVÉNEMENTS

SSBT et MD 620

Ces deux programmes sont placés sous la direction du département Engins de la DMA qui venaient tous les deux d'être créés. Ils utilisaient des matériels faisant partie de la famille de ceux de la FNS.

Pour le SSBT, se référer au paragraphe traitant des débuts de la navigation par inertie en France dans l'annexe A 5.

Le MD 20 (ou Marcel Dassault 620) a été la seule expérience de Dassault dans le secteur des engins tactiques. Ce système destiné à l'exportation était un système de défense des sites ayant quelques centaines de kilomètres de portée, semi-mobile, c'est à dire fixe pendant la période de préparation des tirs, mais capable de se déplacer de façon autonome d'un site à l'autre. Le système de guidage était constitué d'une centrale de guidage trois axes SAGEM utilisant les composants inertiels (gyroscopes flottants et accéléromètres pendulaires) de la FNS et d'un calculateur numérique Électronique Marcel Dassault, de la génération que EMD était en train de proposer pour le MSBS.

Le programme MD 620 s'est déroulé normalement, avec des tirs d'engins complets. Des difficultés, normales et solubles, étaient cependant apparues du fait de la composante tactique du système, rappelant les difficultés qu'on rencontre toujours en passant d'un système à un autre : l'engin était tiré d'une rampe relevée au moment du tir, le système de guidage étant mis en route dans la position horizontale. Mais le relevage de rampe était un parfait générateur de parasites pour le système.

Ce ne sont pas des difficultés techniques qui ont interrompu le programme, mais des difficultés politiques. Comme le programme SSBT avait, de son côté, été suspendu, les programmes de défense des sites se sont arrêtés là en France.

Le balistique nucléaire tactique n'a redémarré qu'avec le Pluton, mais destiné à l'armée de Terre ; il devait donc être plus mobile, puisque devant suivre le corps d'armée.

AS33

L'AS33 est le programme expérimental qui a réellement lancé l'utilisation du guidage inertiel des engins tactiques en France, avec un succès qui doit être souligné : lancée au début des années soixante, sa formule s'est prolongée jusqu'en 2000 à travers l'Exocet.

Au-delà des aspects techniques concernant l'inertie, il faut souligner l'extrême souci d'économie des moyens qui animait les acteurs de ce programme, industriels comme ingénieurs des services techniques de l'État.

L'investissement a été partagé par deux pays, la France et l'Allemagne, sans structure spéciale ; la France en a bénéficié dans l'Exocet, l'Allemagne dans le Kormoran.

Pour la mise au point des conditions de lancement d'avion et de transfert de données avant lancement, les deux systèmes de navigation avion, français et allemand, ont été montés sur un seul avion du CEV, d'où étaient tirés les engins.

L'engin utilisé était un AS 30 de série, modifié, ce qui a conduit à un gain de temps et d'argent considérable.

Le contrat aux industriels a été passé à forfait, avec obligation de résultats.

Mais l'économie principale résultait surtout de la qualité de l'équipe de Nord-Aviation qu'avait formée l'I.C Air Emile Stauff. Pour le programme AS 33, on peut citer l'I.C. Pinel, chef du programme, le directeur des études M. Guillot, le chef des études électroniques et de guidage M. de Rougemont. M. Stauff était ingénieur à l'Arsenal de l'aéronautique quand la transformation de l'Arsenal en société lui a permis de se donner les moyens correspondant à son génie inventif. Il a toujours cherché les solutions opérationnelles et simples ; la mise au point d'un système inertiel simplifié en est un exemple.

Les acteurs principaux des services officiels ont été l'ICA Jean Germain, responsable du programme AS 33 à la Section engins spéciaux du STAé et l'ICA Gérard Bonnevalle, expert du guidage inertiel à la Section équipements.

Genèse de la conception du système AS 33, par Nord-Aviation

En encadré un extrait du livre de B. Estival et de J. Guillot, L'extraordinaire aventure de l'EXOCET, extrait relatif à l'AS 33, le précurseur. Le lecteur intéressé pourra consulter l'ouvrage, publié en 1988 aux Éditions de la Cité Brest-Paris.

Le déroulement du programme AS 33

L'étude du système d'armes AS 33 et de son adaptation à des avions d'armes a été entreprise dans le cadre d'un accord passé en 1962 entre les gouvernements de la république fédérale d'Allemagne et de la République française.

Cet accord avait pour but l'étude et la mise au point d'un système d'armes air-sol comportant un missile à guidage autonome et son adaptation aux Mirage III E et F 104 G. L'accord excluait l'étude d'un système de guidage terminal et d'une charge militaire et leur adaptation au missile.

Ce programme en coopération fut piloté, au profit des deux pays, par la Section engins spéciaux du STAé. Le Bureau navigation de la Section des équipements contribua à assurer la responsabilité technique du service pour ce qui concernait l'étude et la mise au point du système de guidage inertiel du missile et son adaptation au système de navigation doppler du Mirage III E et au système de navigation par inertie Litton LTN 3 du F 104 G.

Les essais des matériels furent effectués par les centres officiels français sous la responsabilité du CEV. L'Erprobung Stelle prit une part active aux essais en coopération avec le CEV.

L'avion tireur, outre son équipement opérationnel normal (radar, navigation,viseur) et un lance-missile, devait être équipé d'une installation comprenant des éléments spécifiquement AS 33 : poste de tir et calculateur, élément important et complexe de liaison entre les équipements avion et le missile, pour les infomations destinées au guidage du missile (localisation du but, calcul des vitesse sinitiales), et celles nécessaires pour les asservissements des gyroscopes (par élaboration originale d'une chaîne doppler-inertie dans le cas du Mirage III E etd'une chaîne inertie inertie sur F 104 G).

Un guidage inertiel pour les missiles tactiques

Vu les grandes distances envisagées, on ne pouvait pas, dans de nombreux cas, utiliser, à bord des missiles, des senseurs (optiques, électromagnétiques, etc.) capables de détecter la cible et de se verrouiller sur elle avant le tir. Il y avait aussi le cas des missiles tactiques s'adressant à des objectifs importants et puissamment défendus, connus par leur position géographique, qu'il fallait pouvoir attaquer de loin en se découvrant le moins possible.

Il apparaissait donc nécessaire de mettre au point des systèmes de guidage internes aux missiles, pour au moins assurer une phase de pré-guidage, les senseurs de bord pouvant, dans certains cas, réaliser un accrochage en vol. Ou bien, il fallait faire tout le vol de manière entièrement autonome, à condition d'avoir, même à portée maxi, une précision homogène avec la nature et les dimensions des objectifs et la puissance de l'effet de la charge (par exemple, dans le cas de la bombe atomique), ce guidage interne devait pouvoir être initié soit à partir du sol, soit à partir d'une plate-forme de tir mobile (bateaux, avions, hélicoptères) ayant elle-même son moyen de navigation dans son système de coordonnées de référence.

Il existait bien des centrales inertielles à cœur suspendu, notamment pour les bâtiments navals (par exemple, centrales SAGEM des sous-marins) et pour les avions (par exemple, centrale de la société américaine Litton sur les F 104 américains) ; d'autres étaient en étude pour les missiles stratégiques français (également à la SAGEM). Mais leurs dimensions (en particulier en calibre), étaient totalement incompatibles avec le concept des missiles tactiques en projet à Nord-Aviation. En contrepartie, les durées de vol des missiles tactiques envisagés et les précisions nécessaires étaient bien plus réduites.

Plusieurs études furent entreprises à Nord-Aviation pour rechercher une formule de navigation interne simple, aux prétentions modestes, compatibles avec des vols d'assez faible durée, et pouvant se loger dans un calibre de l'ordre de 200 mm.

L'étude AS 31 consistait à asservir l'axe longitudinal du missile (en auto-rotation) à l'axe de la toupie d'un gyroscope électrique de bonne qualité. Ce gyroscope à moteurs-couples pouvait être orienté, avant le départ du missile, dans une direction précise calculée à partir des informations recueillies au poste de tir.

Début 1960, plusieurs tirs de SS 11 ainsi équipés eurent lieu à partir du sol sur le champ de tir de Bourges (ETBS) avec de bons résultats. Cependant, les calculs de précision effectués, à partir de ces mesures expérimentales, et tenant compte des diverses causes de dispersion, notamment le vent et ses variations, montrèrent que ce système était trop limité pour certains avant-projets envisagés. Il fallait s'approcher davantage du guidage inertiel complet.

Finalement, Nord-Aviation proposa, en 1962, le système AS 33 qui combine le gyroscope axial précédent avec un gyroscope vertical séparé, ce dernier portant trois accéléromètres disposés suivant des axes trirectangles. La centrale AS 33 donnait, moyennant quelques approximations (changement de coordonnées pas absolument rigoureux), des éléments de calcul inertiel suffisamment précis. On avait besoin d'une classe de matériel, gyroscopes et accéléromètres, de bonne qualité.

Les différents éléments (gyroscopes, électronique de calcul associée) se logeaient aisément dans un calibre de 350 mm. Les masses et les prix restaient raisonnables. Pour la technologie spécifique de ces gyroscopes, Nord-Aviation s'appuya sur la compétence d'industriels spécialisés dans ce domaine (SAGEM et SFENA). Ces deux sociétés conçurent et mirent au point, indépendamment, mais sur des spécifications identiques de Nord-Aviation, chacune leurs modèles de gyroscope axial, de gyroscope de verticale, d'accéléromètre et d'électronique associée, de telle sorte que ces ensembles soient rigoureusement interchangeables dans la centrale AS 33. Ces deux modèles de matériels purent ainsi être approvisionnés, le moment venu, en double source pour les séries Exocet.

Nord-Aviation développa, elle-même, le calculateur analogique associé à cette centrale AS 33 pour la localisation du missile sur sa trajectoire.

Les premiers essais, en dynamique, de cet ensemble inertiel furent effectués en 1962-1963, sous forme de maquettes montées de façon rudimentaire sur des véhicules automobiles, lancés au maximum de leurs possibilités sur les pistes du Centre d'essais en vol de Brétigny.

Les caractéristiques et perfomances de ces gyroscopes, des accéléromètres et de la centrale AS 33 tout entière furent évaluées officiellement au LRBA de Vernon, qui s'était donné, dès le début des années soixante, les capacités pour tester les systèmes de guidage inertiel, notamment en vue des grands programmes de missiles balistiques.

Le cœur inertiel "éclaté" fut étudié et réalisé en double source, en sous-traitance de Nord-Aviation, par SFENA d'une part (en coopération avec Bodenseewerke) et par SAGEM d'autre part. Le calculateur du missile fut étudié et réalisé par la Direction engins tactiques de Nord-Aviation à Châtillon. Le développement et la réalisation de prototypes du calculateur avion pour Mirage III E furent confiés à la CSF-Guynemer. M. Clavelloux en eut la responsabilité directe. La responsabilité du développement du calculateur avion pour F 104 G fut attribuée à Bodenseewerke.

Le programme d'essais comportait des essais en vols portés, des tirs à partir du sol sur le champ de tir du CIEES, des tirs au CEV de Cazaux, à partir d'un avion de servitude Canberra, puis à partir d'avions d'armes Mirage III E et F 104 G. Ce programme ne fut pas réalisé en totalité pour la version Mirage III E.

Après que l'armée de l'Air eut renoncé à l'adaptation du système d'armes AS 33 sur Mirage III E au profit d'une priorité attribuée au développement du missile anti-radar, et eut refusé, en conséquence, de fournir un avion de ce type pour l'exécution des essais et des tirs, il fut décidé de limiter la poursuite de l'étude en version Mirage III E aux essais en vols portés sur l'avion de servitude Canberra et aux tirs à partir de cet avion, pour se borner à confirmer la validité du principe du système d'armes dans cette version.

Les essais en vol pour la mise au point et la validation de la version F 104 G se déroulèrent selon le programme complet initial, notamment avec des tirs à partir d'un F 104 G mis à disposition par la Luftwaffe, modifié et instrumenté en conséquence pour ces essais.

Le programme AS 33 ne connut pas directement l'aboutissement satisfaisant d'une mise en production. Toutefois, les bonnes performances constatées de son système de guidage conduisirent, suivant le concept initial de l'équipe Stauff, à adopter cet ensemble – centrale inertielle simplifiée et calculateur analogique – comme dispositif de pré-guidage pour plusieurs générations de missiles tactiques à guidage terminal par autodirecteur actif :

- le Kormoran AS 34, projet conçu par Nord-Aviation d'engin air-mer développé par MBB pour l'Allemagne ;
- les MM 38, MM 40, AM 39, SM 39, mer-mer, air-mer, sous-marin-mer, de la famille Exocet, vendus par Nord-Aviation, puis Aérospatiale, à plus de 25 marines dans le monde ;
- le Pluton fut également équipé d'un ensemble de guidage sur la même conception, mais d'une précision supérieure.

KORMORAN

Suite au succès de l'AS 33, Nord-Aviation établit le projet de l'air-mer AS 34. La France ne le retient pas, mais l'Allemagne l'adopte sur le F 104. Le système sera produit sous licence en Allemagne. Le système inertiel sera réalisé par BGT, sous licence SFENA.

EXOCET

Le système inertiel de l'Exocet est immédiatement dérivé de celui de l'AS 33.

SAGEM et SFENA sont restées "double source" (en gros 50-50) pour toute la durée du programme, en ce qui concerne les gyroscopes. Aérospatiale s'est efforcée de garder l'interchangeabilité des gyroscopes entre les membres de la famille MM 38, AM 39, MM 40, SM 39.

Le calculateur, réalisé par l'Aérospatiale et qui fait plus de travail en séquence engin et en pilotage qu'en guidage, est devenu numérique sur le MM 40.

Bien entendu, le pourcentage à l'exportation de 80 % environ a conduit à des compensations auxquelles SAGEM et SFENA ont participé.

La logistique mise en place chez les clients leur a permis l'échange standard des gyroscopes, les réparations internes aux équipements ayant lieu en France : il s'agissait, en fait, du deuxième échelon, dont les clients se sont contentés en raison de la fiabilité du matériel et de son interchangeabilité parfaite, ce qui avait tellement stupéfié les Anglais qu'ils avaient demandé un programme spécial de permutation des équipements.

Au total, 4 000 systèmes inertiels ont été réalisés pour la famille Exocet, c'est-à-dire 8 000 gyroscopes environ, ce qui représente un chiffre d'affaire voisin de deux milliards de francs 2000.

Une version de système de guidage type strap-down existe pour l'Exocet. Son lancement dépend des besoins clients.

PLUTON

Avec le Pluton, nous revenons en arrière dans le temps, mais il était intéressant de traiter ensemble l'AS 33, le Kormoran, l'Exocet.

Nord-Aviation fut choisie comme réalisateur du système Pluton. Une coopération lui fut imposée avec son concurrent évincé, Sud-Aviation, mais elle disparût quand les deux sociétés fusionnèrent en 1970.

Le choix du système de guidage du Pluton fit l'objet d'une passe d'armes assez vive entre la DTEn et Nord-Aviation : Nord-Aviation venait d'essayer en vol son système AS 33 d'inertie simplifiée et avait bâti son projet autour de ce système à deux gyroscopes classiques et à calculateur analogique, en s'appuyant sur l'expérience des tirs AS 33. Nord-Aviation proposait l'engin air-mer AS 34 Kormoran et voyait l'avantage industriel de l'utilisation du même type de matériel de guidage sur plusieurs programmes tactiques débouchant sur des séries importantes.

De son côté, la DTEn prônait le système des engins balistiques stratégiques, avec centrale trois axes à gyros flottants et avec un calculateur numérique, soit globalement le système du MD 620.

Nord-Aviation objectait du manque d'expérience en utilisation tactique mobile sur char, qui était génératrice d'ambiances mécaniques et électriques particulièrement sévères, et ne voulait pas changer son projet.

Le Délégué, M. Jean Blancard, trancha finalement en faveur de la solution Nord-Aviation, pour des raisons de délais et pour garder une responsabilité ferme de Nord-Aviation. Fort de l'engagement du général Crépin, M. Blancard le répercuta au CEMAT et paria une caisse de champagne sur la date du 1er mai 1974 pour la première unité opérationnelle, pari qu'il gagna.

Le Pluton, de portée 10 à 120 kilomètres, a une précision globale de trois millièmes.

Bien que balistique, il est piloté aérodynamiquement sur toute sa trajectoire. La précision du tir est donc celle du guidage inertiel au moment du déclenchement de la charge. Le système comprenait deux gyroscopes, un axial et un vertical portant les trois accéléromètres constituant le trièdre de mesure.

Les gyroscopes étaient fournis par SFENA, leur précision était de quelques 10^{-4}, mieux que pour l'Exocet. Le calculateur analogique associé était réalisé par Nord-Aviation elle-même.

Un deuxième gyroscope de verticale, portant deux accéléromètres convenablement orientés et associé à un calculateur indépendant, constituait un système de surveillance qui autorisait l'armement de la charge.

Les gyroscopes étaient portés par un bloc de guidage dont l'orientation en azimut au départ était relevée optiquement par un goniomètre porté par le char à partir d'un gyro-théodolite de terrain.

Le goniomètre SOPELEM était un matériel nouveau et très complexe. Il devait, au départ, être entièrement automatique. Les difficultés rencontrées conduisirent finalement à une entrée manuelle des données.

ANS-ASTER-MICA-APACHE
Guidage inertiel à base d'une centrale à éléments liés

Comme nous l'avons indiqué dans le premier paragraphe "positionnement dans le temps", cette solution s'est imposée à partir des années quatre-vingt. Cette technologie a percé, sur les missiles, grâce à la miniaturisation des calculateurs. Par rapport à la précédente, elle est nettement moins coûteuse et suffisamment précise dans les ambiances sévères ; elle a permis son adoption sur les missiles anti-aériens dont les évolutions en vitesse angulaire et en accélération sont très supérieures à celles des missiles anti-surface : possibilité de 500°/s à 1000°/s et de 50 g. Les gyromètres retenus, dans cette solution, sont modernes : gyromètres à suspension accordée ou gyrolasers.

Les missiles anti-aériens Aster d'Aérospatiale et Mica de MATRA et le missile anti-surface Apache de MATRA ont adopté des centrales de ce type pour la phase de guidage mi-course. Il faut noter que pour l'anti-aérien où la cible peut manœuvrer, un recalage de la position de la cible doit être fourni périodiquement au missile (période d'une à deux secondes) et une liaison entre le radar de localisation de la cible et le missile est nécessaire ; pour un anti-surface, des recalages en position sont nécessaires, pour des portées supérieures à 25 km environ (corrélation en altitude, corrélation entre une image mise en mémoire et celle détectée par un senseur radar ou infrarouge-GPS).

Pour le Mica, MATRA a innové en utilisant les informations de la centrale inertielle à éléments liés prévue pour le guidage mi-course, pour la stabilisation de l'antenne et pour le pilotage du missile. MATRA a développé la technologie des gyroscopes à suspension accordée ; aussi la centrale Mica est-elle équipée de ce type de gyroscope qui est approvisionné en double source (MATRA et SAGEM).

En France, seules deux sociétés, SAGEM et Sextant (ex-SFENA et devenue partie de Thales Avionique) développent les gyrolasers.

3. ÉQUIPEMENTS DE PILOTAGE ET AUTRES ÉQUIPEMENTS

Trois types d'équipements peuvent être utilisés sur un missile :

- ➲ Équipements de pilotage : servomoteurs, intercepteurs de jet, gyroscopes libres de roulis, gyroscopes libres de répartition des ordres sur missiles en auto-rotation, gyromètres de tangage ou de lacet ou de roulis, accéléromètres. Tous les missiles comportent de tels équipements.
- ➲ Équipements de stabilisation des autodirecteurs qui sont des détecteurs de guidage : gyroscope à précession commandée pour asservissement de l'axe de la toupie dans la direction de la cible ou gyromètres de stabilisation d'antennes ; la conception d'autodirecteur, avec son aérien asservi, a débuté en 1959, en France.

➲ Détecteurs pour le guidage mi-course : gyroscopes pour le guidage sur cap dont l'utilisation a précédé le guidage inertiel évoqué dans les parties 1 et 2 : ce guidage à l'estime a été utilisé en début de période, car plus abordable, dans les années cinquante-soixante.

Les industriels concernés

Missiliers

Dans cette période, il y a eu trois missiliers français, maîtres d'œuvre de programmes de missiles tactiques, au titre de contrats de la DTIA, jusqu'en 1970, puis de la DTEN après 1970, celle-ci ayant été désignée par la DMA comme responsable de la majorité des nouveaux programmes : l'Arsenal, qui changea plusieurs fois de dénomination et que nous appellerons Nord-Aviation dans ce document ; MATRA ; la SNCASE, dont l'activité missiles tactiques fut arrêtée en 1959.

Pour mémoire, d'autres missiliers ont été responsables de programmes terrestres et navals, mais leur activité s'arrêta en 1958 pour le LRBA, en 1971 pour l'APX, en 1980 pour l'ECAN de Ruelle (Masurca) et dans les années soixante-dix pour Latécoère. Enfin, si Thomson a été maître d'œuvre du système Crotale (anti-aérien), il a sous-traité l'engin lui-même à MATRA qui était donc en charge des équipements qui nous concernent ici.

Les deux missiliers, Nord-Aviation et MATRA, ont eu la même politique :

➲ Rechercher des équipements simples pour améliorer la fiabilité et réduire les coûts ; cet objectif a été mis en œuvre dès le début des développements des antichars par Nord-Aviation, s'agissant de matériels destinés à l'armée de Terre et de grande série, elle a été étendue à tous les systèmes dès les années soixante, notamment du fait de la concurrence avec les missiles américains.

➲ Développer et produire, si possible, leurs propres équipements ; pour les équipements plus sophistiqués comme les centrales inertielles et les autodirecteurs, ils ont coopéré avec les équipementiers car les missiliers ne possédaient ni la technologie ni le financement, les services officiels ne les aidant pas ; pour les autres équipements, ils furent amenés à en réaliser pour les raisons suivantes :
  – les missiliers français, n'étant pas électroniciens et radaristes comme les missiliers américains Raytheon et Hughes, ont cherché à contrôler d'autres fonctions des missiles, et le plan de charge a imposé d'autres responsabilités que les études de synthèse et la structure ; la responsabilité des équipements électromécaniques était intéressante ;
  – les missiles tactiques sont historiquement les premiers automates militaires. Le pilotage est le cœur du système. Son intégration par le missilier était nécessaire à l'aboutissement des projets ;
  – la plupart des équipements des missiles ont des spécifications particulières par rapport à ceux des avions (conséquence du point précédent), et ne peuvent pas être dérivés étroitement des matériels en catalogue des sociétés d'équipements : intercepteurs de jet, piles à combustible, gyroscope à poudre (le temps de vol très réduit permet l'absence d'alimentation des toupies après le lancement), conditions d'environnement plus sévères.

MATRA s'est toujours considérée comme un équipementier. En effet, en 1947, cette société d'aviation s'était intéressée aux pilotes automatiques d'avion et avait créé un Département d'équipements électromécaniques. Après sa conversion aux missiles en 1948, l'activité de ce département a évolué vers les équipements pour missiles ; ce département existe toujours.

De son côté, Nord-Aviation, qui avait commencé à développer des automatismes pour le poste de tir du SS 11 en 1945, a créé un département Calculateurs au moment du démarrage AS 33.

Analogiques puis numériques, ces calculateurs effectuaient l'élaboration des ordres de pilotage, commandaient la séquence de tir et, dans les cas les plus simples, remplissaient aussi les fonctions de guidage (par exemple : cas de l'AS 33). Dans le cas d'engins plus complexes (ASMP), un deuxième calculateur (ESD) était associé à la centrale de guidage SAGEM pour le calcul des ordres de guidage.

Par contre, le département Engins de la SNCASE exerça les mêmes responsabilités qu'un avionneur ; il ne réalisa aucun équipement électromagnétique, mais durant son existence de missilier, il a maintenu une concurrence entre les deux équipementiers, SFENA et ECA.

Équipementiers

En plus des deux missiliers cités ci-dessus, les deux principaux équipementiers ont été SAGEM et SFENA. ECA a été un équipementier important pour la SNCASE et pour les engins de la DCAN (Malafon), mais son activité s'est arrêtée dans les années soixante. AOIP a produit des têtes gyroscopiques, de 1964 à 1975.

Nord-Aviation a sous-traité à Jaeger les vérins de pilotage de l'Exocet (coupleurs à poudre magnétique) et à Air Équipement ceux de l'ASMP (vérins hydrauliques).

3.1. Équipements de pilotage

Missiles Nord-Aviation

À part la famille Exocet, l'Aster, le Pluton et l'ASMP, la majorité des missiles développés à cette époque étaient téléguidés. Après avoir utilisé des spoilers aérodynamiques d'ailes sur le SS 10 et sur les cibles CT 10 et CT 20, Nord-Aviation mit au point des intercepteurs de jet et en équipa les missiles SS 11, SS 12, Milan, Hot, Roland et le SM 39 (au niveau du composite sous-marin à changement de milieu).

Pour ces missiles téléguidés, l'autre élément de pilotage est le gyroscope de roulis ; il permet la distribution de l'ordre de guidage entre les deux plans. Pour les SS 10, SS 11, AS 30, Nord-Aviation a mis au point un gyroscope à poudre et a été l'un des principaux fabricants européens de gyroscopes : 300 000 exemplaires. Dans le cadre de la coopération franco-allemande, c'est MBB qui a eu la responsabilité du gyroscope de deuxième génération et fabriqua les gyroscopes du Milan, du Hot et du Roland, soit 400 000 exemplaires.

Par contre, d'autres équipements, en quantité réduite, ont été utilisés sur le Roland (gyromètre) et sur les cibles (pilote automatique). Nord-Aviation les a achetés à la SFENA ou à la SFIM.

Missiles MATRA

Le premier choix de MATRA a été l'adoption de servomoteurs électriques, contrairement à de nombreux missiliers où l'hydraulique avait la cote ; ce choix facilitait la réalisation de

missiles simples et ce fut un excellent choix pour la gamme des missiles MATRA. Tous les servomoteurs des missiles MATRA, R 511, R 530, Martel, Otomat, Magic, Super 530, Crotale, Mistral, Mica… ont été réalisés par cette société. Environ 70 000 exemplaires ont été produits. Les missiles MATRA étant en général autoguidés, ils nécessitent une boucle de pilotage comportant des gyromètres et des accéléromètres de tangage et de lacet ; de plus, la chaîne de roulis nécessite un gyromètre ainsi qu'un gyroscope, en cas de stabilisation. Dès 1952, la quasi totalité des équipements a été produite par MATRA ; les exceptions sont les accéléromètres du R 530 achetés à ECA et une partie des gyromètres du Magic achetés à la SAGEM ou à la SFIM, la production MATRA étant limitée.

3.2. Équipements de stabilisation de l'antenne de l'autodirecteur

Trois solutions ont été utilisées pour stabiliser l'antenne et l'asservir dans la direction de la cible.

Tête gyroscopique

L'antenne électromagnétique ou le télescope de l'autodirecteur infrarouge est montée sur l'axe de la toupie du gyroscope ; ce dernier est à précession commandée.

Cette solution, utilisée par les Américains dès le début des années cinquante, fut adoptée et mise au point pour l'air-air à navigation proportionnelle MATRA R 530, en 1959. À l'époque, ce fut un exploit technologique. Si le maître d'œuvre établissait la spécification détaillée, c'est le coopérant qui avait la responsabilité industrielle complète de l'autodirecteur, compte tenu des interfaces délicates entre la partie senseur (radar ou infrarouge) et le gyroscope. Pour la version infrarouge, c'est SAGEM qui a réalisé la tête gyroscopique, en sous-traitance de la SAT, et, pour la version électromagnétique, c'est AOIP qui l'a réalisée, en sous-traitance d'ESD.

Pour le sol-air Mistral de MATRA (conception 1980), comme pour tous les petits missiles autoguidés, la solution de la tête gyroscopique fut retenue et c'est de nouveau SAGEM qui en a eu la responsabilité en sous-traitance de la SAT, chargée de l'autodirecteur infrarouge. Ce fut un nouvel exploit technique, le diamètre du missile n'étant que de 90 mm ; la production, non achevée en 2000, est de l'ordre de 15 000 exemplaires.

Gyroscope à précession commandée, séparé de l'antenne mobile

Il y a couplage entre l'antenne et le gyroscope, l'axe du gyroscope étant asservi dans la direction de la cible et l'axe de l'antenne recopiant la direction de l'axe de la toupie. C'est une solution imaginée en 1968 par MATRA ; elle a les avantages, par rapport à la tête gyroscopique, d'être plus simple du point de vue technologique et de posséder des performances supérieures en précession, nécessaires pour un missile de combat comme le Magic. Cette solution, originale et très intéressante, ne fut adoptée que récemment par les Russes, pour l'air-air AA 11. C'est la solution adoptée pour les autodirecteurs des Magic 1 et 2 et des Super 530 F et D. Le gyroscope étant séparé des antennes, du point de vue responsabilité, a été produit par MATRA, 14 000 exemplaires ont été réalisés.

Gyromètres montés sur les antennes

C'est souvent la solution choisie pour les antennes de grand diamètre et par les constructeurs étrangers. Les gyromètres doivent être performants en bande passante et d'un faible volume. Cette solution a été adoptée en 1964 pour l'autodirecteur du Martel antiradar.

ESD, responsable de l'autodirecteur, a choisi pour la fourniture de ces gyromètres SAGEM, qui fabriquait sous licence ceux du Hawk.

SAGEM a fourni les gyromètres pour les autodirecteurs de l'Exocet (ESD) et de l'Otomat (Thomson-CSF). C'est aussi la solution de l'autodirecteur de l'Aster.

3.3. Équipements du guidage mi-course

Avec une charge conventionnelle, le guidage mi-course est nécessaire pour accroître la portée du missile ; l'autoguidage final, avec une portée réduite, permet d'obtenir une précision métrique. Avant l'apparition sur les missiles tactiques du guidage inertiel, on utilisa le guidage sur cap avec une centrale à deux gyroscopes. Le défaut de ce type de guidage est dû à la dérive liée au vent. Cependant, les performances peuvent être acceptables pour un missile tiré du sol ou d'un navire et dans un plage de portée. Cette solution était la plus abordable, du point de vue du coût, au début des années soixante. Elle fut retenue par les Britanniques pour le projet Martel (TV) développé en coopération entre MATRA et HSD, à partir de 1964.

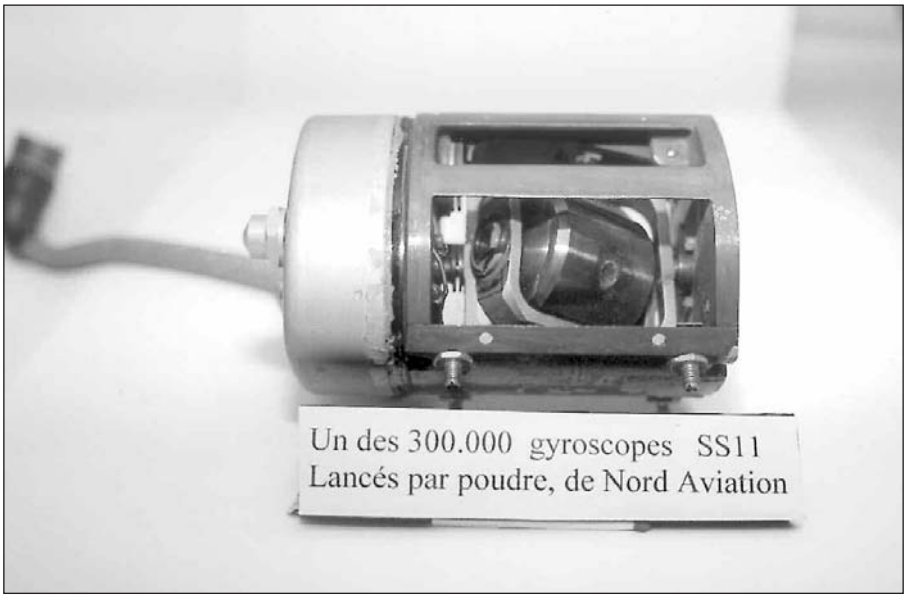
Pour l'Otomat, développé à partir de 1970, MATRA utilisa une centrale gyroscopique dérivée de celle développée par la SFIM pour le Mirage III ; le calculateur a été réalisé par MATRA.

Dans le cadre de la coopération franco-allemande pour l'air-sol, Nord-Aviation et Bölkow ont envisagé une telle solution (projet AS 31), mais elle n'a pas été retenue, car ses performances pour un missile air-sol étaient inférieures à celles du guidage inertiel finalement retenu, l'AS 33.

Pour la phase de guidage mi-course des missiles Kormoran, Exocet, Mica, Aster et Apache, le guidage inertiel fut adopté ; il a fait l'objet du paragraphe 2.

Jean-Claude RENAUT
avec la collaboration de Gérard BONNEVALLE, René CARPENTIER, Jean GUILLOT

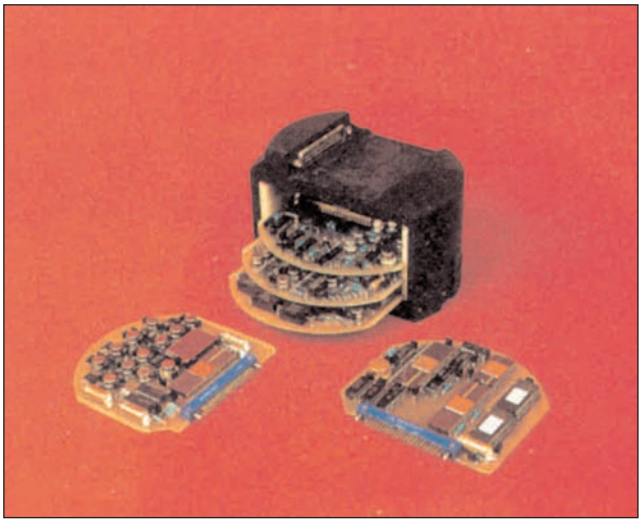
NOTA : Pour une information générale sur l'histoire des missiles tactiques français, voir le volume COMAÉRO correspondant, rédigé par René Carpentier.

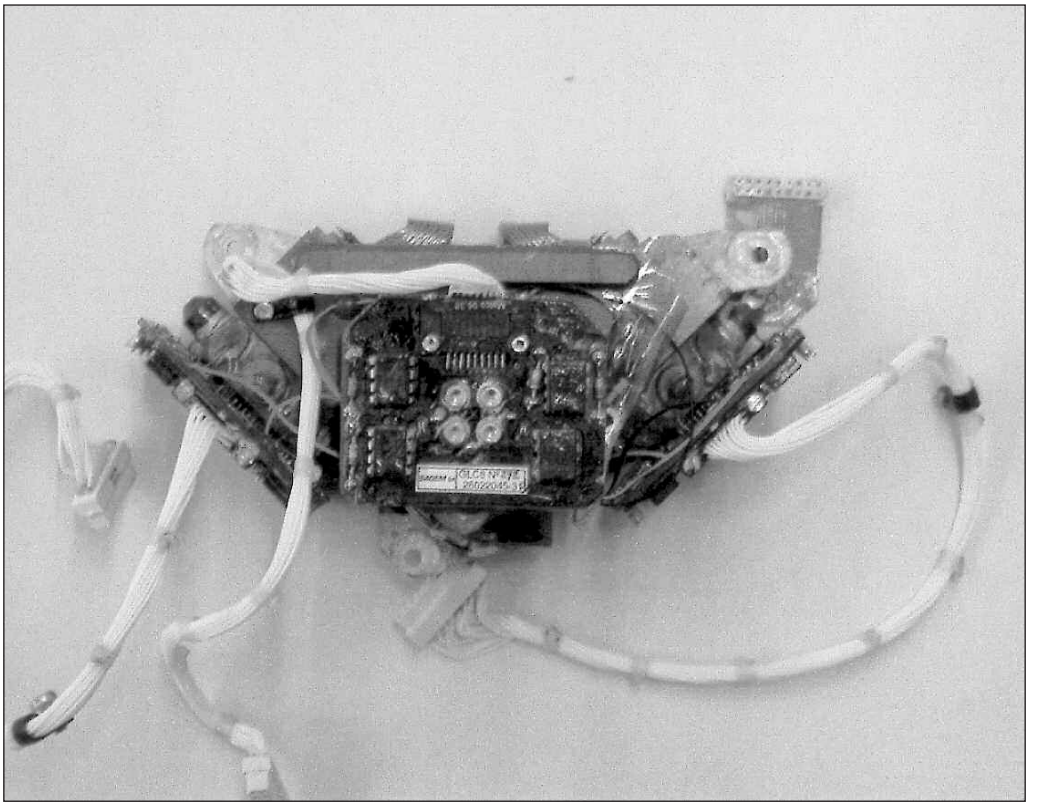


Un des 300 000 gyroscopes SS1 11 lancés par poudre, de Nord Aviation (1950-1960). Cet appareil est aussi le gyroscope de sécurité de l'Exocet.

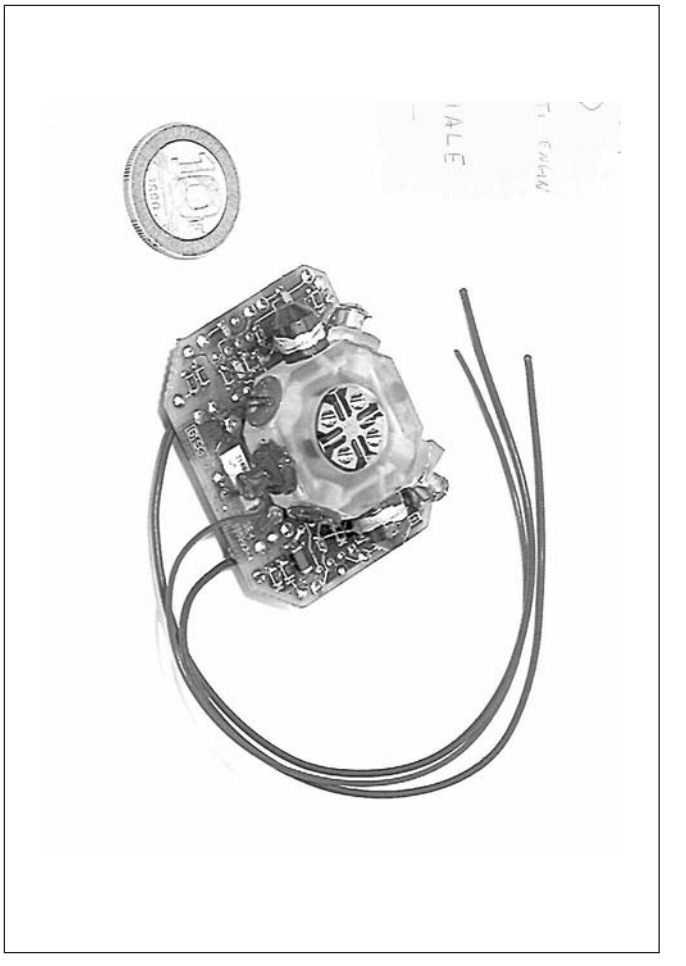
Bloc de guidage gyroscopique du missile Exocet (1970-2000). Le plateau a le diamètre du missile , soit 350 mm.

Centrale gyroscopique SFENA du missile Pluton (1970).





Bloc senseurs du missile ASTER d' Aérospatiale (années 1990 à ce jour).



Gyroscope laser du missile anti-missile ASTER (années 1990 à ce jour).

ANNEXE A 8

OBSERVATION AÉRIENNE ET OBSERVATION SPATIALE

1. OBSERVATION AÉRIENNE

1.1 Hélicoptères

Optique

Aucun développement de matériel d'observation n'a été mené pour des besoins Défense. La division hélicoptères de l'Aérospatiale a cependant créé, à la demande de clients français et étrangers et sous sa responsabilité, des matériels spécifiques d'observation. Ces matériels étaient des packs d'observation télévisuelle avec exploitation à bord ou retransmission au sol avec du matériel Honeywell ou Litton, assemblé sur des plates-formes stabilisées produites par la SFIM ou la SFENA.

Radar

Dès 1948, l'armée de l'Air exprimait le besoin d'un radar héliporté ; c'est cependant l'armée de Terre qui lança en 1970, à la SEFT, les premières études de radar, en prolongation normale de son besoin d'observation pour l'artillerie et des radars RASIT et RATAC.

En 1976, le développement exploratoire d'un radar héliporté était lancé et, en 1981, un vol expérimental de ce radar était effectué sur Super Frelon.

En 1986, le programme ORCHIDÉE (observatoire radar cohérent héliporté d'investigation des éléments ennemis) est lancé après l'expérimentation d'un radar de portée 75 km et d'un système d'exploitation embarqués sur un hélicoptère PUMA. ORCHIDÉE est un système d'observation de portée 150 km sur hélicoptère Super Puma relié par liaisons de données à des stations au sol d'exploitation du renseignement. La responsabilité du programme passe alors à la DCAé/STPA ; le radar développé par la société LCT reste sous la responsabilité de la SEFT.

De 1986 à 1989, le système pré-ORCHIDÉE participe à des expérimentations OTAN d'interopérabilité avec les systèmes d'observation alliés JSTARS (États-Unis) et ASTOR (Grande-Bretagne). Les premiers vols d'ORCHIDÉE ont lieu en juillet 1990. Le système est sous la responsabilité de la division hélicoptères d'Aérospatiale, puis d'Eurocopter, la liaison de données et les stations sols sont développées par ESD, et le radar reste à LCT, devenu ensuite LCT/AR puis repris par Thomson, maintenant Thales.

Le 1er août 1990, le programme ORCHIDÉE est arrêté par le ministre de la Défense, un jour avant le déclenchement de la guerre du Golfe. Mais en février et mars 1991, le démonstrateur pré-ORCHIDÉE participe aux opérations des forces françaises en Arabie saoudite et en Irak ; avec 28 missions d'observation dont 10 de nuit, il fut un facteur important de la rapidité de la percée des forces française en Irak. Après cette réussite, il fut décidé de poursuivre le concept ORCHIDÉE sous la forme d'un système plus simple et surtout plus autonome : ce sera le programme HORIZON (hélicoptère d'observation radar et d'investigation sur zone). Quatre hélicoptères Cougar HORIZON ont été livrés à l'armée de Terre.

1.2. Avions

Introduction

Dès la Première Guerre mondiale, la photographie aérienne avait été utilisée pour obtenir des renseignements sur les positions et les mouvements de l'ennemi. L'interprétation comparative de nouveaux clichés avec de plus anciens s'est développée, ainsi que l'examen stéréoscopique de couples de clichés. Ceci a permis aux interprétateurs des différentes armes de repérer les installations nouvelles et, de même, de déceler les installations camouflées et les faux objectifs.

Pendant et après la Deuxième Guerre mondiale, les équipements se perfectionnent, passant de simples appareils à obturateur central ou à rideau à des appareils à compensation de filé de l'image, permettant des prises de vues même avec des éclairements faibles.

De 1945 à 1960 : la reconstruction d'une industrie

En 1945, l'industrie était totalement à reconstruire ; le ministère de la Défense choisit de conduire une politique de choix nationaux et de recherche de débouchés internationaux.

Vers les années cinquante était expérimenté un appareil français, Gallus type 51, à défilement continu, mais sans réglage automatique de la vitesse de défilement en fonction de la vitesse de l'avion.

Mais ce n'est qu'avec l'appareil OMERA 31 (format 114 x 114 mm), conçu par le constructeur Gaullier, que l'on a pu bénéficier d'une caméra disposant d'un entraînement de film à vitesse variable et du réglage automatique suivant les conditions de vol : hauteur de survol et vitesse de l'avion par rapport au sol, afin d'éliminer le filé de l'image enregistrée.

L'OMERA 31 a équipé les avions de reconnaissance Étendard IV P et Mirage 3R ainsi que les Mirage IV P de reconnaissance. Cet appareil a obtenu de nombreux succès à l'exportation, notamment en Suède, en Suisse ainsi que dans divers pays ayant acheté des avions Mirage 3.

Plusieurs variantes de l'OMERA 31 ont été réalisées pour équiper les avions Mirage F1-CR, Mirage IV P, le Breguet-AMD Atlantic II, etc.

D'une conception différente, l'appareil panoramique OMERA 40 permet la photographie d'horizon à horizon, sur un film en translation rapide derrière une fente fixe et un prisme tournant devant l'objectif de 75 mm de focale, mobile pour compenser le filé dû au mouvement de l'avion. Il est utilisé sur les avions Jaguar et Mirage F1-CR.

Un modèle de petit format OMERA 60 a été réalisé pouvant prendre dix vues par seconde.

De 1960 à 1970 : le déploiement de systèmes à exploitation rapide

Vers les années soixante, l'accent est mis sur la rapidité d'exploitation des films aériens à l'occasion du concours Royal flush entre les forces de l'OTAN. Le traitement à température élevée dans des machines continues permit l'examen des films développés quelques minutes après leur arrivée à la section photographique. Les sections photographiques disposent de tout l'équipement nécessaire pour le traitement rapide et pour la préparation des missions et l'exploitation des films.

La société Augereau a réalisé, à cet effet, l'équipement d'une section photographique en deux conteneurs aérotransportables.

La société SACAP a fourni une développeuse sécheuse continue à grand débit pour films jusqu'à 240 mm de largeur, ainsi que des tireuses agrandisseuses.

MATRA-SFOM a construit la majorité des matériels pour l'interprétation des films.

Les appareils de photographie aérienne français ont été réalisés par un seul constructeur, la société OMERA-SEGID, en liaison avec AMD. Les objectifs ont été fournis par trois sociétés : KINOPTIK, MATRA-SFOM et SOPELEM.

Le système CYCLOPE de prise de vues en infrarouge (bande 3 à 5 micromètres) de la SAT, équipé d'un enregistreur magnétique TOLANA-ENERTEC, a été développé pour le Mirage 3, version RD. En 1970, l'armée de l'Air est la première en Europe à être dotée d'un matériel de reconnaissance infrarouge opérationnel.

Par mesure d'économie, la reconnaissance photographique aérienne s'est faite, en France, en réalisant des versions reconnaissance d'avions d'attaque ou de pénétration. L'avion est alors équipé de conteneurs semi-encastrés sous le fuselage ou de bidons emportant des appareils photographiques et autres détecteurs de reconnaissance, ainsi que des moyens de contre-mesures passives et actives, nécessaires à l'exécution des missions.

On peut citer le Mirage 3 (1958-1960), le Mirage IV (1959-1964), le Transall C 160 (1963-1967), le Jaguar (1968-1971), l'Étendard 4P de la Marine (flottilles 11F et 12F de Landivisiau).

De 1970 à 1995 : la diversification des moyens et l'augmentation des performances

Le Mirage F1 CR (1979-1982), les Mirages IV P, les Jaguars et les Étendards de Landivisiau sont équipés de caméras photographiques(OMERA et WILD) de jour, en interne ou en emport externe, par bidon ventral ou par pod. Grâce à une large gamme de focale et des réglages adaptés aux caractéristiques des missions à réaliser, les caméras recueillent l'information sous la forme de films argentiques négatifs, noir et couleur, en format très large : 70 mm x 256 mm, 126 mm x 126 mm et 240 mm x 240 mm.

Le système thermographique Super Cyclope, étudié dès 1968, fournit des images infrarouges, de jour comme de nuit (bande 8 à 12 micromètres), qui peuvent être transmises au sol, en direct ou en différé après enregistrement sur des enregistreurs fournis par la société ENERTEC. C'est en 1980 que le Super Cyclope est intégré au programme Mirage F 1 CR.

Thomson-RCM développe également pour le Mirage F1 CR un système d'observation radar en pod, le RAPHAEL, équipé d'un enregistreur magnétique numérique à haute densité ENERTEC, alors que MATRA fournit les stations d'exploitation des images. L'enregistreur développé à cette occasion par ENERTEC, le ME 4115, a permis d'acquérir la technologie de base qui a permis ultérieurement de réaliser l'enregistreur spatialisé du programme de satellite militaire d'observation Hélios.

Enfin, également pour le Mirage F1 CR, un pod d'observation stand off baptisé Presto est développé par Thomson-CSF-Optronique, pour compléter les capacités opérationnelles de jour de l'avion dans la catégorie du film argentique classique.

L'Atlantic II (1981-1984) disposant d'une optronique TRT-SAT-OMERA-SFIM et le Transall Gabriel sont également utilisés pour la reconnaissance.

2. OBSERVATION SPATIALE

Le lancement de Spoutnik 1 en octobre 1957 fut un choc pour beaucoup. Les Américains, inquiets de l'avance prise par l'Union soviétique, accélérèrent leur programme de missiles balistiques et comprirent immédiatement que l'espace était le nouveau "point haut", celui

où les militaires devaient forcément se placer très vite. Dès le 10 août 1961, une capsule photographique Discoverer 13 récupérable permettait de vérifier que, depuis l'espace, beaucoup de renseignements étaient maintenant accessibles.

En France, la volonté politique du général de Gaulle était au rendez-vous. En effet, outre le lancement d'un programme d'études de base pour doter le pays de la capacité de réaliser une force de dissuasion, les concepteurs de la première loi de programmation 1961-1964 prévoyaient 500 MF (7 milliards d'aujourd'hui) pour l'utilisation militaire de l'espace.

Cette somme permettait d'engager les travaux d'étude sur la propulsion à liquide nécessaire aux lanceurs spatiaux : N2O4-UDMH et le programme Diogène de propulseur de 3,5 tonnes à hydrogène et oxygène liquides. Des études étaient également lancées au Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques (LRBA) de Vernon sur un véhicule spatial d'observation photographique (VSOP). Les travaux furent pilotés par le Département engins de la DMA, puis par le Service technique espace de la Direction technique des engins (DTEN), créée en août 1965. Ce service était dirigé par l'Ingénieur en Chef Jean Corbeau. Les travaux sur la propulsion se poursuivirent à la DTEN jusqu'en 1966, ils furent alors repris par le CNES et par l'organisation européenne ELDO, puis par l'Agence spatiale européenne qui les utilisa pour Ariane.

Le programme d'études de base, commun au programme de missiles balistiques et au programme spatial, conduisit au lancement du premier satellite français, la capsule technologique A1, par le lanceur Diamant le 20 novembre 1965. Cet exploit était réalisé six ans seulement après la création de la Société d'études et de réalisations d'engins balistiques, la SEREB, maître d'œuvre, et 43 mois après que le CNES ait confié la maîtrise d'ouvrage à la DMA. Les trois lancements suivants furent également exécutés avec succès par la SEREB, sur contrat de la DMA.

1967-1977 : la traversée du désert

Deux obstacles principaux se dressaient alors pour empêcher le développement, en France, de l'espace militaire, tandis qu'aux États-Unis et en URSS la course à l'espace battait son plein :

- ni la France, ni l'Europe ne disposaient d'un lanceur opérationnel capable de mettre des charges utiles de 500 kg en orbite basse (la capsule A1 pesait 39 kg), masse estimée nécessaire pour espérer disposer d'un satellite de reconnaissance de performance significative ;
- par ailleurs, il y avait un total désintérêt des états-majors pour l'espace et ceux-ci privilégiaient les moyens classiques dans un cadre budgétaire où la force nucléaire stratégique disposait d'une priorité gouvernementale absolue.

Le Service technique espace fut dissout en 1967. La DGA poursuivit cependant quelques études générales, notamment celle du pilotage du véhicule spatial d'observation optique (VSOP) au LRBA de Vernon.

La DGA fournit également une assistance technique et financière pour le programme Ariane qui était notre seule voie pour accéder à l'espace.

L'intérêt pour la reconnaissance spatiale grandit peu à peu grâce à quelques événements qui finirent par ébranler les convictions des états-majors. Citons le principal : en 1978, l'opération Zaïre-Kolwezi, intervention pour secourir et évacuer 2 700 européens en situa-

tion critique. Le président Giscard d'Estaing prend conscience de la faiblesse de nos moyens de renseignement et de l'évidence que la préparation de l'opération de sauvetage aurait pu grandement bénéficier de l'existence d'un satellite de reconnaissance.

1977-1982 : retour de l'espace militaire dans la programmation

L'état-major des Armées marque son intérêt pour les systèmes spatiaux en introduisant, dans la loi de programmation 1977-1982, les crédits pour l'étude d'un satellite militaire de reconnaissance optique (SAMRO) et la réalisation prioritaire d'un système de télécommunications par satellites.

L'Ingénieur Général Corbeau crée le groupe Espace-Satellites, au Service technique des engins balistiques de la DTEN.

Le lancement réussi de la première Ariane le 24 décembre 1979 crée le mouvement et la décision est prise de réaliser le premier programme de télécommunications spatiales militaire français Syracuse sur le satellite Télécom I des PTT. Le projet SAMRO est engagé et débutent les développements des éléments jugés les plus critiques d'un satellite de reconnaissance : l'ensemble de prise de vues et l'enregistreur magnétique d'images.

1982-1995 : la genèse du plan pluriannuel spatial militaire et sa mise en œuvre

En 1982, dans le cadre des travaux de la nouvelle programmation, les priorités budgétaires qui sont fixées conduisent à suspendre le projet SAMRO et à confirmer le programme Syracuse. À la demande du délégué général pour l'armement, le ministre de la Défense autorise la poursuite des développements préparatoires de l'ensemble de prise de vues à l'établissement de Cannes de la société Aérospatiale et de l'enregistreur magnétique à la société ENERTEC, ce qui permet dès 1983 de confirmer la faisabilité de ces deux équipements très critiques et de conforter les estimations de coût et de délai faites pour le programme.

En 1982 a été mis en place à l'Établissement technique central de l'armement (ETCA) un centre expérimental de photo-interprétation pour exploiter les images des satellites civils américains LANDSAT et des images simulées de SPOT et de SAMRO. L'expérience acquise dans ce cadre par les photo-interprètes des trois armées a permis de mieux estimer les besoins en personnels d'exploitation du futur satellite de reconnaissance.

En mars 1983, l'initiative de défense stratégique (IDS) du président Reagan fait prendre conscience à tous des enjeux politiques et stratégiques de l'espace. Un premier plan pluriannuel spatial militaire est élaboré par le groupe de coordination spatiale militaire (GCSM) présidé par le chef du groupe Espace-Satellites du STEN et qui réunit ingénieurs et officiers des états-majors. Ceci permet au ministre de la Défense d'approuver, en mai 1984, un plan qui décrit tous les programmes envisageables dans les quinze ans à venir, y compris les coopérations européennes que nous voyons se concrétiser aujourd'hui. Ce plan avait été étroitement concerté avec le plan spatial civil, au sein d'un groupe de concertation CNES-DGA.

En mars 1985 est créé le Groupe d'études spatiales (GES) du ministère de la Défense présidé par le major général de l'état-major des Armées et dont le vice-président était le directeur des Engins de la DGA. Ce groupe, appuyé par le GCSM, était alors chargé du PPSM, ce qui plaçait les affaires spatiales à un niveau de responsabilité comparable à celui des affaires nucléaires militaires.

La décision est alors prise de lancer un programme d'observation spatiale militaire qui sera baptisé Hélios, du nom ancien du dieu grec Soleil, "le dieu qui voit tout, qui sait tout, à qui rien n'échappe et qui rend toutes choses visibles et présentes". Le programme compre-

nait deux améliorations majeures par rapport au projet SAMRO, permettant une meilleure résolution de prise de vues et une forte diminution du temps d'accès à l'information.

Le lancement effectif du programme n'interviendra qu'en mars 1986, après reprise de la définition du projet pour en diminuer le coût et fixer le rôle du CNES dans la conduite du programme, ceci à la demande du ministre de la Défense.

Le 21 septembre 1987, l'Italie rejoint le programme Hélios avec une participation de 14 % ; en 1988, c'est le tour de l'Espagne avec une participation de 7 %.

Juillet 1995 : "Nous avons Hélios"

Le 7 juillet 1995, Hélios atteignait une orbite parfaite après avoir été lancé dans l'espace par Ariane. La France, l'Italie et l'Espagne étaient entrées dans un club très restreint où ne figuraient que les deux plus grandes puissances du monde, les États-Unis et la Russie : le club des États possesseurs de satellites de reconnaissance à haute résolution.

Pour un peu plus du prix de revient d'un seul lancement de satellite de reconnaissance américain Keyhole de série, les industries spatiales française, italienne et espagnole avaient mis en place un système complet d'observation avec trois stations de réception et d'exploitation. Selon une longue tradition des lancements réussis au centre spatial de Kourou, c'est dans la piscine d'un des hôtels de la ville qu'on a fêté l'événement et réuni, dans la même joie, les responsables militaires des trois pays : le directeur du programme et l'officier de programme, deux généraux italiens, deux ingénieurs généraux français anciens directeurs du programme, deux officiers espagnols. Ce fut une première à Kourou !

Le lendemain matin, la première image "tombait" sur l'antenne de réception française de Colmar.

3 décembre 1999 : lancement du deuxième et dernier satellite Hélios I

Alors que le premier satellite est toujours opérationnel et a dépassé la durée de vie en orbite prévue, le second et dernier satellite construit en version Hélios I est mis en orbite avec succès. La présence concomitante de deux satellites en orbite (Hélios I A et Hélios I B) permet de doubler le nombre de prises de vues effectuées par le système Hélios et de réduire fortement le délai de réalisation des demandes les plus urgentes. Au cours de la crise du Kosovo, le système Hélios a été exploité à grande échelle dans un cadre opérationnel et en relation extrêmement étroite avec les partenaires italien et espagnol.

Les ministères de la défense français, italien et espagnol ont confié la maîtrise d'ouvrage d'ensemble du système Hélios à la Délégation générale pour l'armement. Elle a travaillé en équipe intégrée avec l'état-major des Armées, garant des besoins opérationnels des trois pays, et le Centre national d'études spatiales, maître d'ouvrage de la composante spatiale Hélios et du système civil SPOT. Une synergie efficace a ainsi pu être développée entre les programmes SPOT et Hélios. Les efforts réalisés par chacun de ces acteurs ont permis de maintenir le coût du programme dans l'enveloppe prévue, environ 10 milliards de francs (1,52 Md€), lancement compris.

Les satellites Hélios I ont été conçus par MATRA Marconi Space France, l'instrument optique étant fourni par Alcatel Space Industries (dans l'usine de l'ex-Aérospatiale à Cannes) et l'enregistreur magnétique spatialisé par ENERTEC. Au total, plus de trente industriels français, italiens et espagnols ont contribué à la réalisation du programme Hélios I.

Daniel PICHOUD

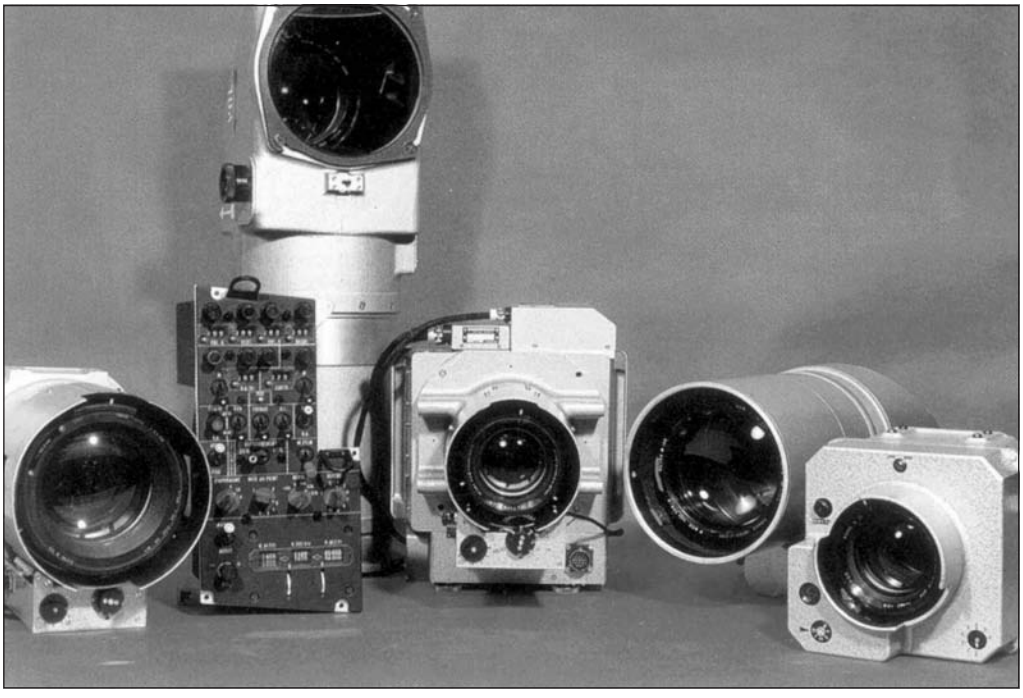
Ont également contribué à la rédaction de cette annexe :

Pour l'observation aérienne-hélicoptères :
- observation optique : Michel THOMAS, directeur de la Division hélicoptères de la société Aérospatiale de 1984 à 1987 ;
- observation radar : ICA Norbert COLLO, directeur du programme ORCHIDÉE de janvier 1986 à décembre 1991.

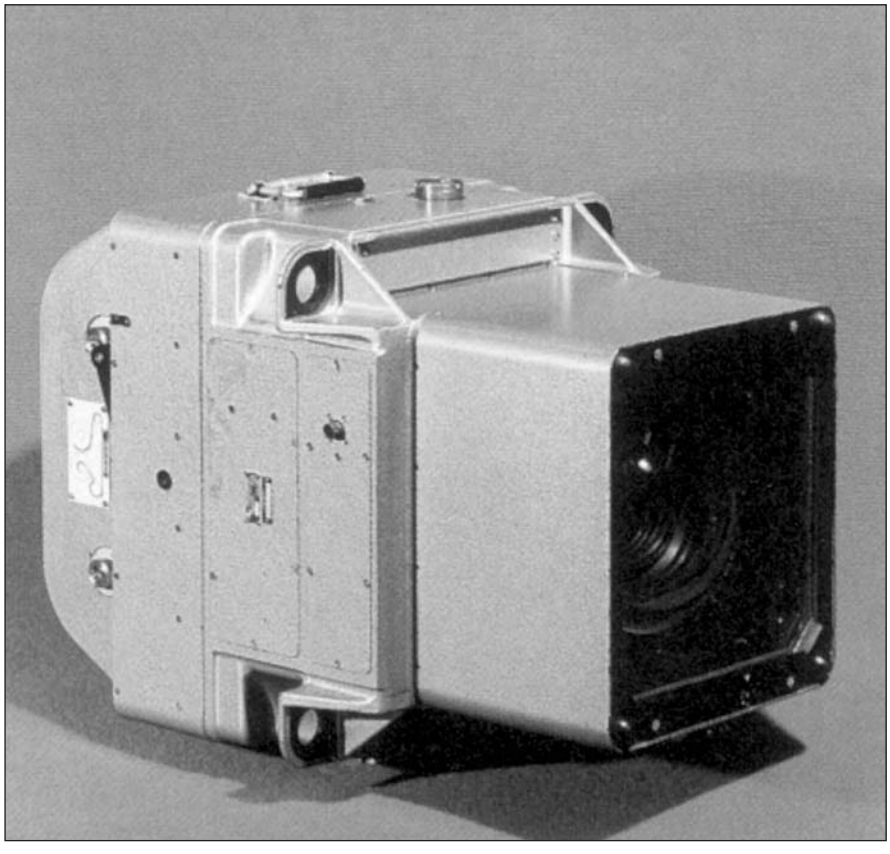
Pour l'observation aérienne-avions :
- ICETA Paul LAFOUASSE, responsable des systèmes d'observation aérienne à la section Équipements du Service technique aéronautique, de 1960 à 1974, après une douzaine d'années passées au Centre d'essais en vol, pour leur expérimentation.

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, dans l'annexe B 4.

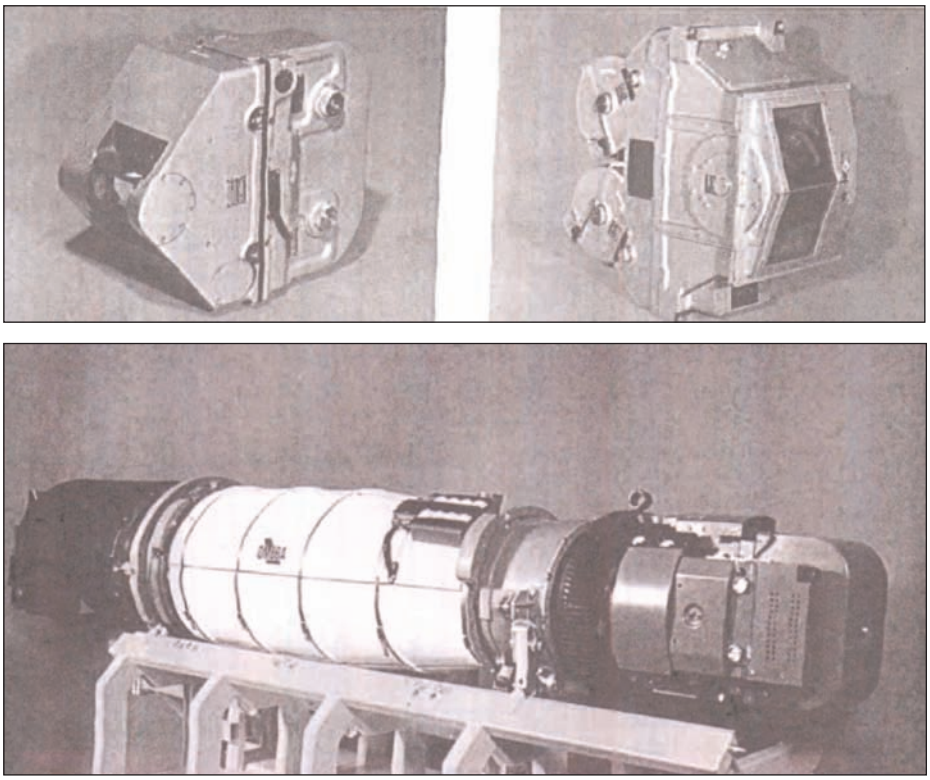
Pour le rôle d'ENERTEC dans les programmes d'observation aériens et spatiaux :
- Jean-François SULZER, directeur à la société ENERTEC, responsable des programmes enregistreurs pour les systèmes d'observation.



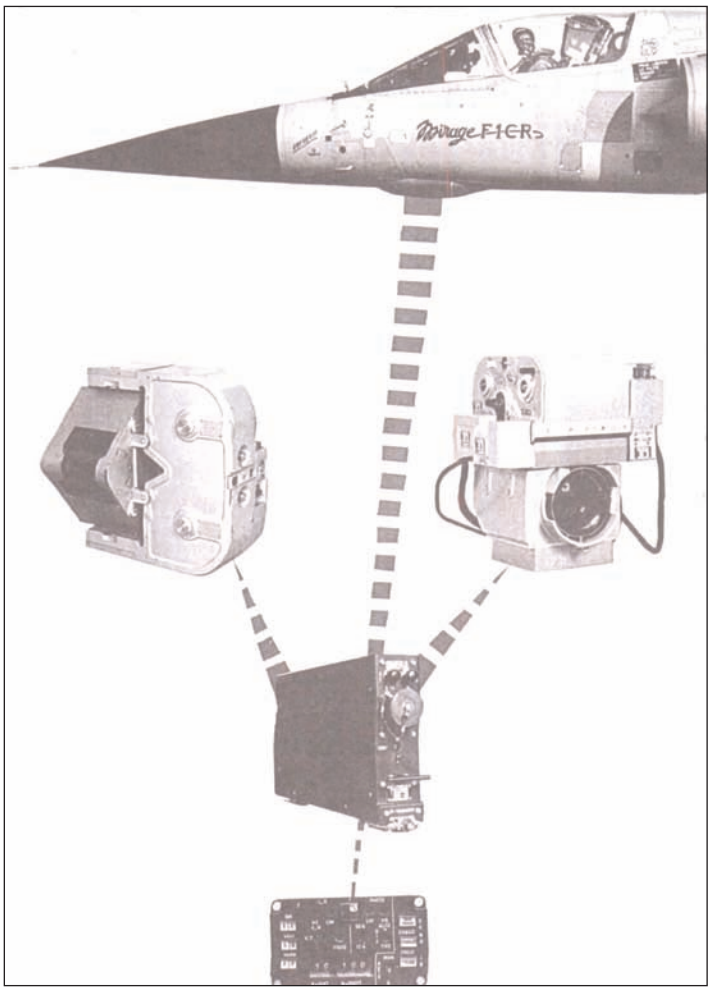
Appareil photographique OMERA type AA3 35 , avec cônes objectifs de focales 150, 200, 600 mm. (Source GIFAS).



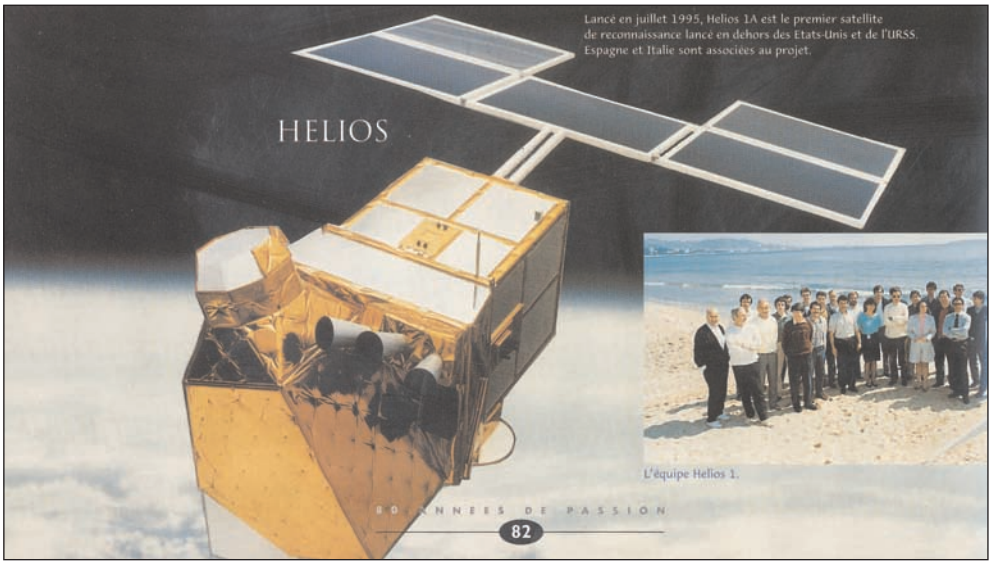
Appareil cartographique OMERA type AA 1 - 800 (Source GIFAS).



Appareils photographiques panoramiques.



Installation photographique interne d'un Mirage F1 CR.



Hélios 1A, premier satellite d'observation militaire lancé hors Etats-Unis et URSS.

Lancement du satellite d'observation militaire Hélios, le 7 juillet 1995.

ANNEXE A 9

SÉCURITÉ-SAUVETAGE-OXYGÈNE

1. PARACHUTES

La technique des parachutes, qui avait déjà largement sa place depuis le début de l'aviation, se perfectionna grâce à l'usage du nylon (qui était nouveau). Cela demandait de bien maîtriser la porosité des tissus, qu'il fallait strictement encadrer. Les soyeux de Lyon ont déployé un zèle réel en ce domaine.

L'expérience de la guerre 1939-1945 avait conduit à un nouveau style de combat de l'armée de Terre. À la fin des années quarante, une intense activité s'est développée dans ce domaine en France, tant en ce qui concerne les études que la production. Cette activité était entretenue par la guerre d'Indochine. Les troupes aéroportées commandèrent des parachutes par milliers.

Les industriels français s'y lancèrent avec succès, concurrençant sérieusement les grandes marques étrangères (Irvin au Royaume-Uni, Pioneer aux Etats-Unis). En France, les anciens tels que Louis Dreyfus furent rapidement dépassés par EFA (M. Tauti) et par Aérazur (Pierre Leroy), bientôt suivis par Lemercier et par Luceber.

M. Lemoigne a, le premier, réalisé un parachute à fentes pour améliorer la portance et la maniabilité.

Simultanément, cet emploi du nylon s'appliqua aux parachutes de secours. Cette technique s'est ensuite étendue à des utilisations annexes : parachutes pour charges utiles telles que les engins légers d'infanterie, parachutes-freins et barrières d'arrêt pour avions rapides utilisant des pistes courtes.

Ces réalisations ont ouvert la voie, bien plus tard, aux parachutes sportifs qui connaissent aujourd'hui une vogue extraordinaire (voltige, parapentes, parasurfs, etc.). Leur application particulière, s'éloignant de l'aviation, conduisit à ce qu'au début des années soixante ils sortirent du domaine des matériels aéronautiques, dans lequel ne restent donc plus maintenant que les parachutes de secours. Leurs dérivés ainsi que les parachutes à fentes, les ailes volantes, etc., puis les parachutes propulsés et les ULM, n'ont plus été pris en compte par les services de l'aéronautique. On ne les voit d'ailleurs pas au Salon de l'aéronautique et de l'espace.

2. SIÈGES ÉJECTABLES

La mise en service d'avions rapides (vitesses supérieures à 500 km/h) fit apparaître la nécessité d'un siège éjectable, en cas d'évacuation forcée. Les Britanniques (Martin-Baker) avaient une nette avance dans ce domaine. Ils nous firent bénéficier de leur expérience.

Dans un souci d'indépendance nationale, une étude avec une technique voisine fut lancée à la SNCASO (M. Servanty).

L'état-major de l'armée de l'Air exprima des exigences très sévères : il fallait démontrer la sécurité de fonctionnement par un essai réel en vol. Ces essais furent menés avec succès sur avion Meteor biplace (M. Cartier, M. Allemand).

De nombreuses utilisations en détresse ont été réalisées avec succès dans l'armée de l'Air. Cependant, du fait de la lourdeur des essais préliminaires et aussi des progrès substantiels réalisés en Grande-Bretagne (éjection à très basse altitude), la décision fut prise de s'équiper uniquement en sièges Martin-Baker.

3. COMBINAISONS ANTI-G ET CENTRIFUGEUSES

En raison des troubles survenant sous fortes accélérations (2 à 3 g en virage serré), des vêtements anti-accélérations furent réalisés par Aérazur : poches gonflables de contention de l'abdomen et des membres inférieurs, alimentées par une valve délivrant une pression proportionnelle à l'accélération.

Afin d'explorer les effets physiologiques des accélérations, une centrifugeuse fut installée au CEV de Brétigny par Latécoère, dans les années cinquante. Équipée d'un bras de 6 mètres, elle permettait d'atteindre 20 g. Afin de se rapprocher des conditions réelles en virage, elle était lancée par une catapulte de la Marine. Grâce à cette catapulte, l'accélération voulue était obtenue en un temps extrêmement court. Cet appareil unique fut utilisé et perfectionné par le médecin-colonel Cabanon. Il a permis de nombreux essais sur l'homme, les animaux et les équipements pendant cinquante ans. Il a été remplacé, en 2000, par une centrifugeuse moderne plus performante .

4. INHALATEURS

À partir de 4 000 mètres d'altitude, un apport d'oxygène est nécessaire pour compenser l'anoxémie résultant de la diminution de la pression atmosphérique (qui n'est plus alors que 60 % de ce qu'elle est au niveau de la mer). À la fin de la guerre, les inhalateurs français (Elox, Munerelle, Gourdou) étaient de simples détendeurs qui envoyaient, dans un masque sommaire, une proportion d'oxygène croissant avec l'altitude.

Ensuite apparurent les inhalateurs "à économiseurs". Des masques étanches Ulmer recevaient un apport d'oxygène accumulé dans un soufflet. Ceci permettait des altitudes cabine jusqu'à 12 000 mètres, où l'inspiration demande de l'oxygène pur.

Dans les années cinquante arrivèrent les inhalateurs "à la demande" (Eyquem, intégré au début des années soixante dans Intertechnique, ou Bronzavia), plus économes en oxygène, qui ne délivrent que pendant l'aspiration le mélange air/oxygène approprié, à des masques étanches adaptés tels que l'A 13 A d'Ulmer. Ils ont l'avantage d'économiser au mieux l'oxygène et donc d'augmenter les temps d'utilisation à bord.

Les plafonds des avions augmentant sans cesse, ces inhalateurs ont été équipés pour fournir, par une commande de la soupape du masque, une surpression progressive pour les altitudes cabine supérieures à 12 000 mètres, jusqu'à 15 000 mètres, pour un secours d'un temps limité.

Les besoins en opération devenant très importants et pour éviter les sujétions de transport des bouteilles, on réalisa des usines mobiles de production d'oxygène sur camions (L'Air Liquide).

Récemment, Intertechnique a conçu, en coopération avec l'Air Liquide, le système OBOGS (On Board Oxygen Generation System) qui fournit de façon autonome à partir du circuit d'air comprimé de l'avion du gaz enrichi en oxygène pour satisfaire les besoins respiratoires des pilotes d'avions d'armes.

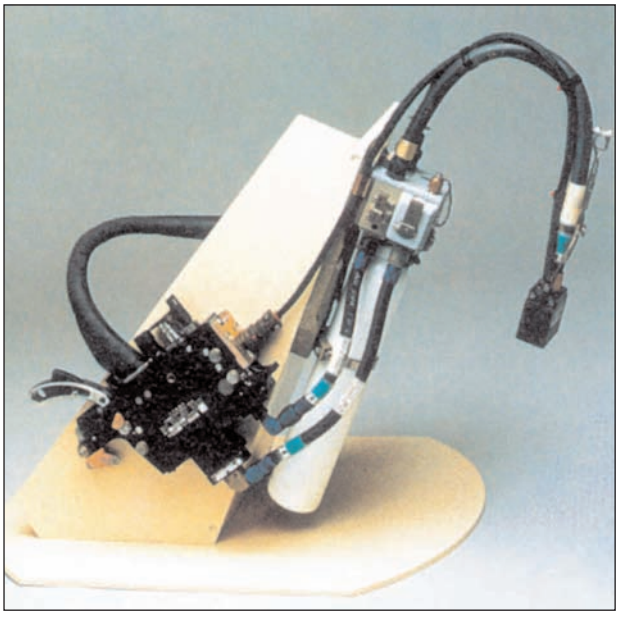
Des matériels analogues sont en réalisation pour le circuit de conditionnement d'avions de transport tels que l'Airbus A 340 et l'Airbus A 380.

5. CONDITIONNEMENT

Pour les avions civils modernes, il est nécessaire de recourir à des cabines étanches, conditionnées en pression et en température à partir de 3 000 mètres. On utilise à cet effet des "turbo-réfrigérateurs" (SEMCA). Ces appareils prélèvent sur les réacteurs de l'air à haute pression. En se détendant, cet air, d'une part, constitue une source de froid et, d'autre part, actionne un ventilateur qui prélève de l'air frais extérieur et l'envoie dans la cabine, refroidi ou réchauffé selon les besoins. Une soupape de conditionnement installée dans la cabine maintient une surpression donnant une "altitude cabine" constante confortable de 2 000 à 3 000 mètres.

Robert MUNNICH
Maurice BOMMIER

Masque régulateur d'oxygène à mise en place rapide EROS. Equipement de secours pour l'équipage (Source GIFAS).



Système de régulation oxygène et anti-g type 427, pour pilote de Mirage F1 et de Jaguar (Source GIFAS).

Réservoir d'oxygène liquide du Mirage F1 (Source GIFAS).

ANNEXE A 10

GÉNÉRATION ET DISTRIBUTION D'ÉLECTRICITÉ

1. LES ÉNERGIES DE SERVITUDE

Aux débuts de l'aéronautique, il n'y a pas de besoin en énergie de servitude : l'énergie nécessaire aux commandes de vol et aux freins est fournie par le pilote, les équipements sont inexistants, ainsi que cela a été exposé précédemment. L'électricité apparaît cependant sur les avions de la guerre de 1914-18, produite par une génératrice entraînée par une hélice pour réchauffer l'huile du moteur et le pilote, et envoyer des signaux optiques.

Jusqu'en 1939-45, la puissance installée reste faible (par exemple : 1500 W environ sur Dewoitine 520).

Après 1945, l'apparition d'éléments mobiles sur des aéronefs de masse croissante, les besoins de l'éclairage, du dégivrage et du conditionnement, le développement des instruments de communications, pilotage et navigation, auxquels s'ajouteront rapidement les servitudes commerciales sur avions de transport et les systèmes d'armes sur avions militaires, vont créer un besoin d'énergie croissant.

C'est le moteur qui constitue la source primaire d'énergie, mais pour certaines fonctions, le choix de la forme finale est possible : par exemple, pour la motricité (manœuvre du train et des volets), l'hydraulique ou l'électricité ; pour le dégivrage, l'électricité, l'air chaud ou l'air comprimé ; pour certains instruments de pilotage tels que les gyroscopes, par l' électricité ou par air déprimé.

Cependant, pour l'avionique et la plupart des équipements, le seul choix est l'alimentation électrique. L'électricité devient donc nécessaire pour le fonctionnement de tous ces équipements en nombre et consommation croissants. La puissance installée fera ainsi un grand bond, passant en une vingtaine d'années de 2,5 kW sur l'Ouragan (1952) à 240 kVA sur le Concorde (1975).

Nous décrirons successivement l'évolution des matériels de génération et celle de l'architecture des circuits.

Nota : les dates indiquées correspondent à la mise en service pour les aéronefs militaires et à la certification pour les aéronefs civils.

2. ÉVOLUTION DES MATÉRIELS DE GÉNÉRATION ÉLECTRIQUE

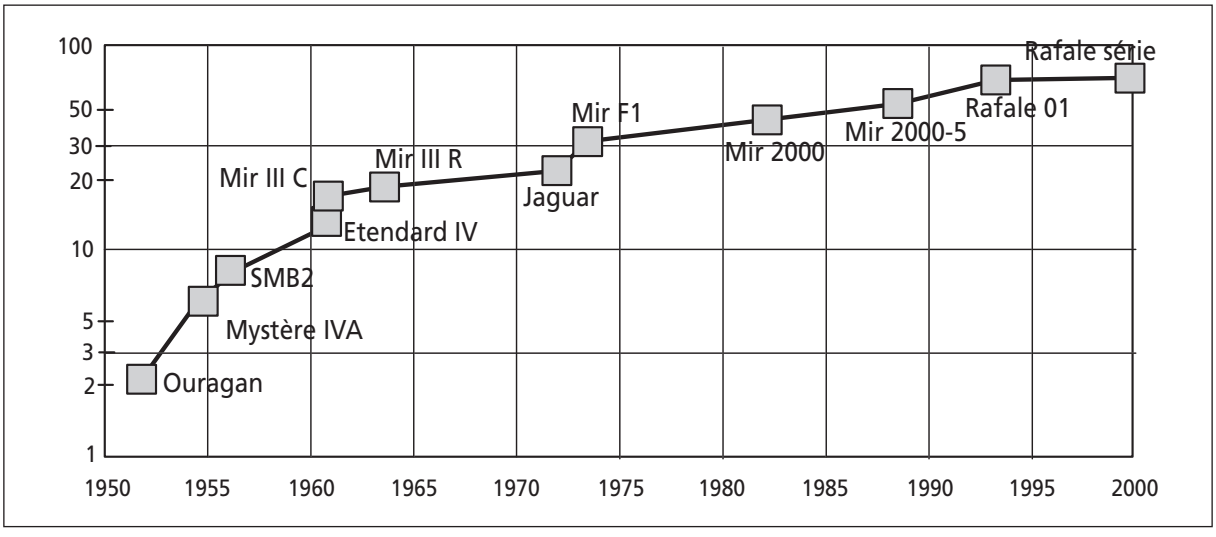
C'est l'augmentation de la puissance demandée qui a entraîné l'évolution des générations et l'apparition des alternateurs, car la puissance des génératrices à courant continu ne peut guère dépasser 13 kW.

Au début, avec des aéronefs aux bilans peu chargés, les circuits sont alimentés par une ou plusieurs génératrices (par exemple : MD 312-315R). Le courant alternatif, dont l'utilité était apparue avant 1945 pour l'alimentation des postes de radio, est alors produit, si nécessaire, par des convertisseurs tournants (comme sur Mystère IV A).

L'accroissement de la demande conduit également à utiliser des alternateurs à fréquence variable pour les charges résistives, comme sur la Caravelle pour les cuisines en 1955 (2x18 kVA). Notons ici l'importance des charges commerciales sur avions de transport civil, dès le début, puisque le Latécoère 631 a déjà une puissance installée de près de 22 kW !

Puis le besoin continue à augmenter, et à partir des Mirage III C (1961) et du Mirage IV apparaissent les alternateurs à fréquence constante, principalement pour l'alimentation des radars, associés à des transfo-redresseurs pour produire le courant continu : c'est la production du courant alternatif à 400 Hz qui a d'ailleurs représenté la principale difficulté technique dans le domaine de la génération électrique.

Si l'on examine l'évolution de la puissance électrique installée sur un ensemble homogène, comme les avions d'armes, la croissance apparaît exponentielle avec une rupture de pente en 1960, à l'apparition du Mirage III :



(source : Doct. GIFAS, « L'industrie aéronautique et spatiale française 1907-1982 », auquel on se reportera pour plus de détails). échelle en kVA.

D'autre part, malgré l'évolution extraordinaire des équipements entre 1945 et 1985, il faut souligner que les spécifications du courant à fournir ont peu évolué : les contraintes nouvelles ne viennent donc pas des performances de régulation mais de l'élargissement du domaine de vol (accroissement des températures de fonctionnement), du durcissement (IEM), et surtout de la réduction de masse et d'encombrement des équipements de génération électrique.

2.1. Les machines tournantes : génératrices, alternateurs

Le premier objectif est donc la réduction de masse et les progrès de la technologie décrits ci-après vont être utilisés essentiellement à cet effet. Or, pour augmenter la puissance massique des machines tournantes, il faut agir sur les trois paramètres qui la conditionnent au premier ordre : vitesse de rotation, densité de courant, induction ; c'est donc là que les efforts vont porter en premier. Des progrès ont été réalisés dans les domaines suivants :

– matériaux magnétiques : en 1945, on utilise sur les machines tournantes principalement des tôles au silicium à faibles pertes (1,6 w/kg) avec induction maximum de 1,85 T ;

vers 1955, l'introduction des tôles fer/cobalt (hyperco 50, AFK1, AFK502) permet de passer à 2,4 T. Mais les gains sont surtout spectaculaires sur les aimants (BHmax=28 kJ/m^3 environ sur les ferrites, et 225 kJ/m^3 sur aimants aux terres rares et cobalt Ru28, valeurs typiques) ;

– caractéristiques mécaniques des métaux : elles permettent l'accroissement des vitesses de rotation des machines (6 000 t/mn à 12 000 t/mn et même 24 000 t/mn, pour les alternateurs) ;
– isolants (vernis poly-imides sur le cuivre et dépôts d'oxydes sur les tôles), permettant l'augmentation des températures de fonctionnement jusqu'à 220°C ;
– techniques de refroidissement : l'amélioration du refroidissement permet d'augmenter la densité de courant d; le refroidissement à air, utilisé au début, permet une densité de 15 A/mm^2 (contre 5 A/mm^2 pour une machine non refroidie) ; le refroidissement par brouillard d'huile, introduit vers 1970 sur les alternateurs permet une densité de 25 A/mm^2 ; le gain en puissance est de l'ordre de la moitié du gain sur d, et c'est vraiment cette technique qui va permettre les gains de masse les plus importants ;
–composants électroniques, utilisés dans les régulateurs, protections et circuits de puissance. Les régulateurs des génératrices utilisent des piles de carbone et ceux des alternateurs des amplificateurs magnétiques jusque vers 1960. La génération des composants au germanium ne supportait pas la plage de température demandée (-40 à + 70° C), mais l'apparition du silicium va permettre le développement de régulateurs et protections électroniques ; les techniques de circuits imprimés devront également s'adapter pour tenir les contraintes vibratoires : le Transall (1963) est le premier avion équipé d'alternateurs avec des régulateurs électroniques, et l'Alphajet (1973) le premier, pour le continu.

Pour l'électronique de puissance, les triacs et thyristors apparaissent en premier (1960 aux États-Unis, 1970 en France), mais sont limités par leurs émissions radioélectriques parasites. Les transistors apparaissent en France sur Alphajet (convertisseur statique ATEI) ; un convertisseur statique américain équipait cependant le Falcon 20 dix ans plus tôt (voir, plus loin, alternateurs et convertisseurs).

Génératrices

En 1945, les fonctions génération et démarrage sont séparées (comme sur automobile).

À partir de 1950, la génératrice peut assurer également la fonction démarreur grâce à un enroulement série spécial (machines dites trois bornes) ; elle comporte en outre un enroulement de compensation pour améliorer la commutation. Progressivement, l'apparition des régulateurs électroniques (sur Alphajet) va permettre de supprimer les enroulements de démarrage grâce à un meilleur pilotage de l'excitation (machines dites deux bornes). Parallèlement, l'accroissement des vitesses de rotation et l'amélioration des vernis et isolants permettent de réduire la masse des machines ; une génératrice de 13,5 kW pèse 30 kg en 1950 (soit 0,4 kW/kg), et une génératrice de 12 kW pèse 17 kg en 1990 (0,7 kW/kg).

Plus récemment, les avions d'affaires et avions légers utilisent des alternateurs redresseurs qui permettent en particulier des puissances supérieures à 13 kW (Falcon 2000).

Alternateurs

L'alternateur a bénéficié des mêmes progrès que les génératrices. On a introduit en plus vers 1965 une structure à 3 étages comprenant : un générateur à aimant permanent (PMG) qui fournit l'alimentation, une excitatrice avec induit tournant et redresseurs (dispositif dit

à diodes tournantes), alimentant directement l'inducteur de l'étage de puissance ; cette conception, appliquée en primeur en France, permet de supprimer les bagues et balais qui servaient à alimenter l'inducteur (tournant).

Des gains de masse importants ont ainsi été obtenus : par exemple, un alternateur de 60 kVA pèse 49 kg en 1956 et 20 kg en 1972, et sur A 320 l'alternateur de 90 kVA pèse 20 kg ; la puissance massique passe ainsi de 1,2 à 4,5 kVA/kg.

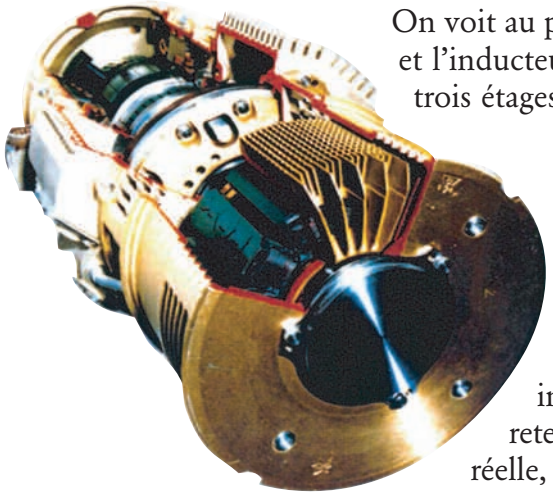
Alternateurs à fréquence fixe

La principale difficulté, comme cela a été dit, est de fournir de l'énergie à fréquence fixe à partir d'un entraînement à vitesse variable ; la conversion statique n'étant pas faisable avec la technologie disponible avant 1960, la seule solution était d'entraîner un alternateur à vitesse constante par un accouplement approprié relié au moteur.

Divers systèmes ont été envisagés ou essayés : pneumatique (l'alternateur était entraîné à vitesse constante par une turbine alimentée par un prélèvement d'air sur le compresseur : Bronzavia sur le Mirage IV A 01, ou Plessey sur Concorde prototype), mécanique (Auxilec), hydraulique (Sundstrand) ou électromagnétique (Auxilec), mais seuls les deux derniers ont donné lieu à une fabrication en série. Aux États-Unis, Sundstrand a développé un système basé sur un convertisseur hydraulique (groupe pompe/moteur) pour entraîner l'alternateur, dispositif dans lequel il a acquis un monopole de fait qui s'est maintenu sur toute la période chez les avionneurs américains, pour tous appareils civils et militaires.

En France, une solution originale appelée vario-alternateur a été développée, d'abord chez Labinal (Labamatic), puis chez Auxilec (Auxivar), par Gérard O'Mahony. Le système Labamatic (FC20) comprenait deux cloches activées selon la gamme de vitesse (fournissant ainsi 10 ou 20 kVA). Le principe de l'Auxivar est le suivant : l'alternateur est entraîné à travers un différentiel relié à un frein à courants de Foucault ; une boite de vitesse à deux plages (comprenant un 2e différentiel) permet de limiter le glissement sur le frein. Il faut signaler que les avions d'armes français souffrent dans ce domaine du fait que la plage de régime des moteurs ATAR est beaucoup plus large que celle des moteurs américains (rapport Nmax/Nmin de 3 à 5 contre 1,8 environ), ce qui accroît fortement la difficulté de la production d'énergie à fréquence constante.

L'Auxivar, qui était techniquement compétitif (en masse jusqu'à 20 kVA, mais avec un rendement plus faible) par rapport aux systèmes hydrauliques, constitue véritablement l'innovation majeure dans le domaine de la génération électrique sur toute cette période. Ce type de machine a ainsi équipé tous les avions militaires français à partir de 1970.



Vue d'un Auxivar.

On voit au premier plan le frein à courants de Foucault avec la cloche et l'inducteur, au milieu la boite de vitesse, et au fond l'alternateur à trois étages (document Thales).

À partir de 1960, des développements ont été faits aux États-Unis, lorsque les composants électroniques de puissance l'ont permis, pour effectuer des conversions de fréquence statiques par découpage approprié, soit directement sur une onde hexaphasée (VSCF, variable speed constant frequency, chez General Electric), soit avec un intermédiaire continu (DC-link chez Bendix) ; le VSCF a été retenu sur quelques programmes, mais n'a pas fait de percée réelle, si bien que Sundstrand a conservé son monopole.

En France, Auxilec a étudié vers 1970 d'abord une formule baptisée Super-Auxivar, sur le même principe que l'Auxivar, mais avec un champ tournant créé par un inducteur fixe convenablement commuté, puis une formule de conversion statique. Mais ces développements sont restés au stade prototype, car l'utilisation de réseaux à fréquence variable a été retenue sur le Rafale, ainsi que sur le projet Airbus A 380.

2.2. La conversion continu/alternatif et alternatif/continu

La plupart des aéronefs comportent des équipements alimentés en courant alternatif et d'autres en courant continu. Une conversion (dans un sens ou dans l'autre) est donc nécessaire à partir du générateur primaire entraîné par le moteur.

- Continu/alternatif : la conversion est effectuée au début par un ensemble appelé convertisseur tournant, constitué d'un moteur régulé en vitesse, entraînant un alternateur régulé en tension. À partir de 1970 on voit apparaître des convertisseurs dits statiques ; le premier (ATEI) est monté sur l'Alphajet.
- Alternatif/continu : on utilise un transfo-redresseur (TR), constitué d'un transformateur avec redressement hexaphasé à 12 diodes ; le TR n'est pas régulé en tension, mais dispose éventuellement au secondaire du transformateur d'une prise à 3 positions permettant un réglage fixe en fonction de la charge moyenne des circuits de l'avion ; en France, les TR sont généralement auto-ventilés, ce qui permet un gain de masse appréciable, mais ils sont très bruyants !

2.3. Les batteries

En 1945, on utilisait des batteries au plomb (jusqu'au Mystère IV A), dont les performances à froid étaient médiocres et qui dégageaient des vapeurs acides corrosives. On a essayé ensuite des batteries au zinc-argent (Andyar), qui est un très bon couple électrochimique, mais leur fiabilité était insuffisante, et le gain théorique n'a jamais été constaté.

À partir de 1955, les batteries nickel-cadmium (Ni-Cd), produites par SAFT, ont remplacé le plomb ; la capacité massique (environ 30 wh/kg pour les matières actives) n'est pas très supérieure, mais elle offre une meilleure puissance, surtout à froid, grâce à une résistance interne plus faible, ce qui est utile pour le démarrage des moteurs. La technologie utilisée, dite à plaques frittées minces, de fabrication plus délicate et plus coûteuse que le plomb, demande à être bien maîtrisée pour obtenir les performances et la fiabilité requises. Une batterie de capacité 40 Ah, souvent employée, pèse 40 kg environ ; elle est composée de 20 éléments de tension nominale 1,2 V placés chacun dans un bac isolant muni d'une soupape.

Le meilleur couple électrochimique théorique pour la capacité massique est l'argent hydrogène (gain de près de 50 % sur les matières actives par rapport au Ni-Cd), mais les recherches sur cette technologie n'ont pas dépassé le stade du laboratoire ; elle n'a donc pas été utilisée sur avion.

2.4. Les câblages, connexions et protections

Les câblages sont en cuivre argenté, en brins torsadés, recouverts d'une gaine assurant la protection mécanique et l'isolement électrique. On a utilisé d'abord une gaine extrudée en PVC avec du PTFE pour les hautes températures. Puis, à partir du Concorde, du film kapton

rubané très mince qui permet une réduction importante de sections des torons. L'utilisation de câbles en aluminium, qui permet un gain de masse appréciable, particulièrement sur avions de transport civils, est actuellement limitée aux feeders (liaison entre le générateur et le cœur électrique).

Des connecteurs (voir planche 1) sont nécessaires pour assurer la démontabilité des équipements et pour permettre les traversées de cloisons étanches sur avions pressurisés. Ils représentent un élément critique pour la fiabilité des circuits et répondent à des normes sévères. Ces connecteurs ont bénéficié d'une évolution importante entre 1950 et 1980, par l'augmentation de la densité de contacts qui permet des gains de masse et d'encombrement, l'évolution des élastomères (passant du néoprène au silicone fluoré) et du raccordement (passant de la soudure au sertissage). Les conditions d'utilisation (température, tenue au feu, résistance aux fluides de bord) en sont largement étendues.

La protection des câblages est assurée par des disjoncteurs thermiques placés dans le poste de pilotage, ce qui impose d'y faire passer tous les câbles d'alimentation des équipements. Sur l'initiative de l'Aérospatiale, une étude de disjoncteurs statiques commandés à distance a été menée avec succès en 1970, chez Crouzet et SAT ; ces disjoncteurs évitent le détour par le poste de pilotage, réalisant ainsi un gain de poids important sur les câblages sur un avion de grande dimension comme l'Airbus. Ces dispositifs, sans équivalent aux États-Unis, n'ont cependant pas encore été utilisés, mais ils sont envisagés sur A 380 sur une partie des circuits.

2.5. Mutation industrielle

L'électricité, comme l'ensemble des équipements aéronautiques, voit fleurir en France après la guerre une multitude de sociétés souvent familiales, très dynamiques. Mais elles auront parfois du mal à gérer leur croissance, et le paysage va évoluer progressivement. Les principaux équipementiers ayant opéré, dont certains ont déjà été cités, sont les suivants :

- génératrices : Labinal, Air Équipement, SEB, Carbone-Lorraine (balais) ;
- génération alternative : Labinal, Auxilec, Bronzavia, Ragonot, ATEI, EAS ;
- câblages, connecteurs, contacteurs et protection : Filotex, Filéca, Souriau, Deutsch, Socapex, Crouzet, CEM, ECE, AirLB ;
- batteries : SAFT.

Les concentrations ont contribué à faire disparaître beaucoup de ces sociétés : Auxilec, par exemple, qui a lui-même rejoint Thomson-CSF en 1973, rachète SEB et Ragonot en 1976, puis Bronzavia et Air Équipement en 1988. Labinal, après avoir été le pionnier tant pour les génératrices que pour les vario-alternateurs (Labamatic), abandonnera ce domaine vers 1970 pour se consacrer à la réalisation des câblages aéronautiques où il prendra une position dominante en France et à l'export.

On remarque que les équipementiers cités sont tous français, et de fait, les listes d'équipements de génération électrique ne font quasiment pas appel à des matériels étrangers.

La lutte commerciale a cependant été rude au début entre Auxilec et Sundstrand pour les générations à fréquence constante du Mirage III ! La situation variera peu après les débuts de la coopération (Transall, Jaguar, Alphajet).

2.6. Rôle des services officiels

Le rôle des services officiels a probablement été moins déterminant dans le domaine de l'électricité que dans celui d'autres équipements plus complexes, tels que ceux de pilotage ou navigation. Mais leur activité a été très importante, surtout au début, dans la normalisation, l'homologation, les aides au développement et les essais.

Normes et règlements

Il n'y avait en 1945 aucun document de référence utilisable, militaire ou civil, et un travail très important a été accompli par les services techniques de la DGA pour les établir.

Dans le domaine militaire, ce travail a été effectué avec les industriels dans le cadre du BNAE (organisme paritaire État/industrie), pour créer un ensemble couvrant tous les domaines : caractéristiques des réseaux, standardisation, conditions d'essais et d'homologation, etc.

Dès 1948, on trouve ainsi les normes AIR suivantes (applicables au N2501) :
– 107 : repérage des installations électriques à bord ;
– 245 : réception des installations électriques à bord ;
– 2021 : conditions générales d'installation des équipements électriques ;
– 4524 : conditions de réception des câbles électriques ;
– 7820 : présentation standard du bilan électrique ;
– 7821 : conditions d'installation des circuits de génération électrique.
(source : clauses techniques série N2501)

Les normes fixant les interfaces mécaniques et électriques sont indispensables pour assurer la compatibilité entre les équipements et leur alimentation électrique (elles sont d'ailleurs utilisées dans le domaine civil) ; elles ont été élaborées en s'inspirant de leurs homologues américains : la norme AIR 2021 en particulier est issue de la MIL STD 704. Les autres normes permettent l'interchangeabilité des matériels de constructeurs différents. Avec le développement de la coopération civile et militaire, l'AECMA a pris le relais du BNAE, et ses normes font maintenant autorité.

Dans le domaine civil, il fallait établir les documents de certification.

En 1945, le STAé avait écrit un règlement français à cet effet, mais devant les difficultés rencontrées pour la certification de la Caravelle aux États-Unis, il fut décidé de s'aligner sur le règlement de l'agence américaine, la FAA ; ultérieurement, un règlement spécifique sera établi pour la certification du Concorde (TSS), puis viendront les règlements européens (JAR). Le rôle d'expert pour la certification reste très important.

Développement

Le soutien financier des services officiels à l'industrie a porté essentiellement sur le développement des alternateurs à fréquence constante Auxivar, dont le coût s'amortissait difficilement sur les faibles séries des Mirage, en face des matériels américains fabriqués à plusieurs milliers d'exemplaires. Le démarrage a été particulièrement difficile et la machine a mis de nombreuses années à s'imposer. Le classement de la génération électrique en équipement de catégorie B a contribué à cette percée.

En amont, la DRME/DRET a joué un rôle très actif pour l'adaptation des technologies émergentes au secteur, tant pour les alternateurs, que les batteries ou les concepts d'utilisation.

Essais et homologation

En 1945, à une époque où les techniques sont mal maîtrisées, les essais sont nombreux : essais de mise au point chez le constructeur, puis essais de performance et d'endurance en général par les services officiels et enfin essais en vol sur avion de servitude, puis sur avion d'armes.

L'industrie très dispersée, naissante ou ayant subi l'arrêt de la guerre, a peu de moyens d'essais. La DGA (DTCA) met en place des moyens importants : le STAé dispose de bancs d'essais au sous-sol de la Cité de l'Air, le CEV d'un avion de servitude consacré aux essais électriques (Canberra 784). Les services officiels possèdent, en plus, l'expérience que donne la vue sur l'ensemble des matériels français, et leur rôle est déterminant. L'homologation des services officiels, basée sur des critères stricts, devient rapidement un label reconnu à l'étranger et exigé pour l'export.

Avec le temps, les choses évoluent : compétence et expérience se répandent, les hommes migrent. Les méthodes de calcul et la simulation progressent et, l'expérience aidant, les essais en vol sur avion de servitude sont donc de moins en moins utiles pour les équipements de génération électrique, et seront abandonnés vers 1970. De même, avec le développement des bancs de génération chez les avionneurs, les essais électriques spécifiques ne sont plus nécessaires sur avions prototypes (mais les enregistrements des paramètres électriques restent assurés).

Pour les essais au sol, les équipementiers s'équipent et se groupent (LCIE, SOPEMEA), en complément du développement des importants moyens du CEAT.

3. ÉVOLUTION DES CIRCUITS DE DISTRIBUTION D'ÉLECTRICITÉ

L'importance prise par l'énergie électrique à bord entraîne un accroissement des exigences de sécurité en parallèle avec l'augmentation de la puissance installée : ces deux paramètres ont conditionné l'évolution de l'architecture des circuits décrite ci-après. Les normes et règlements jouent par ailleurs dans ce domaine un rôle important, comme nous allons le voir.

3.1. Réseaux et réglementation

L'importance des réseaux électriques pour le bon fonctionnement des équipements et pour la sécurité des aéronefs fait qu'il sont très réglementés.

Ils sont soumis, dans le domaine civil, aux nécessités de la certification des aéronefs, définie par les règlements de navigabilité. Ces documents et leur interprétation conditionnent, en particulier, la conception et la réalisation de la génération électrique. Ce sont les FAR 25 et 23 pour les avions et les FAR 27 et 29 pour hélicoptères.

Sur les avions militaires, où les normes françaises donnent les règles de l'art mais pas les exigences de sécurité (définies par les fiches programme), les mêmes principes sont appliqués. La norme principale fixe les caractéristiques des réseaux (AIR 2021), qui constituent l'interface entre les équipements consommateurs et leur alimentation électrique. Les réseaux aéronautiques autorisés par cette norme sont les suivants :

– continu 28 V ;
– alternatif triphasé 115/200 V, 400 Hz ;
– alternatif triphasé à fréquence variable 400-1 000 Hz.

Les réseaux civils sont heureusement identiques aux réseaux militaires !

Pour les réseaux alternatifs, le choix de la fréquence a été un compromis entre la faisabilité technique des alternateurs en 1950 (vitesse de rotation et nombre de pôles du rotor), et la nécessité d'une valeur assez élevée pour réduire le poids des transformateurs. On a hésité entre 400, 500 et 800 Hz, pour finalement retenir 400 Hz par alignement sur les États-Unis.

Ce sont ces principes et ces normes, civiles ou militaires, qui déterminent la conception des circuits dont nous allons examiner l'évolution.

3.2. Sécurité et architecture des circuits

L'introduction progressive du courant alternatif et les impératifs de sécurité ont fait évoluer la conception et l'architecture des circuits de génération électrique. En 1945 et dans les années qui suivent, les aéronefs peuvent terminer un vol sans électricité Avec l'apparition des vols IFR et surtout des commandes de vol électriques (CDVE) sur Mirage IV, l'électricité devient nécessaire pour le fonctionnement nominal de l'aéronef, qu'il soit civil ou militaire ; elle devient même vitale sur les avions militaires à partir du Mirage 2000 sur lequel il n'y a plus de secours mécanique sur les commandes de vol. Sur avions civils, les CDVE apparaissent sur Concorde (où elles sont alimentées par un réseau électrique spécifique à 1 800 Hz), puis sur les Airbus à partir de l'A 320 (avec alimentation par le réseau général), mais en conservant le secours mécanique.

L'objectif de sécurité passe ainsi au premier plan, et l'architecture des circuits va évoluer en conséquence.

Exigences de sécurité

Les premiers circuits ne sont pas structurés et les protections sont réduites au mimum (fusibles ou disjoncteurs) ; il y a une barre bus unique, point central quialmentel'ensemble des équipements (Mystère IV). Progressivement, les principes se fomalisent, on crée une barre batterie séparée, puis une barre par génératrice ; on intrduit des protections de surtension puis, sur les réseaux alternatifs, des protections enfréquence.

On aboutit ainsi à des circuits organisés pour supporter à la fois les défauts internes (pannes de générateur, court-circuit…) et les agressions externes (rupture d'un élément de structure ou projectile, par ex.).

Plus précisément, pour satisfaire les règlements (FAR) qui exigent qu'un défaut unique, quel qu'il soit, ne puisse pas avoir de conséquence catastrophique, on applique les principes de :

- redondance : les générateurs et les barres bus sont au minimum doublés ; sur aéronefs avec circuit mono-générateur, la redondance est assurée par la barre batterie qui alimente les équipements vitaux en dernier secours ;
- ségrégation : les barres bus sont séparées ou séparables, elles sont situées, ainsi que les câblages associés, dans des zones différentes de l'avion.

Alimentation au sol

Pour fournir l'énergie avant le démarrage des moteurs, on utilise :

- soit une source interne : la batterie, ou une turbine auxiliaire (dite Auxiliary Power Unit ou APU) utilisable également en vol, au moins dans une partie du domaine ;
- soit une source externe, dite groupe de parc.

Le démarrage électrique direct du moteur est possible dans le cas des appareils de faible tonnage (petits turbopropulseurs ou réacteurs jusqu'à 2,5 tonnes de poussée environ ;

par exemple : Paris, Alphajet, Nord 262 ou hélicoptères) ; sur Caravelle, le démarrage est encore possible avec une mise en série des batteries (en 110 V), mais les gros réacteurs présentent un couple trop important et démarrent en deux temps : soit à l'aide d'une petite turbine auxiliaire (avions d'armes), soit à l'aide de l'APU (avions de transport civil).

Alimentation de secours

En cas de panne de la totalité des générateurs primaires (panne propre, ou due à l'arrêt du moteur correspondant), l'alimentation d'une partie (à définir) des équipements est assurée par une source auxiliaire, souvent la batterie, n'assurant qu'une autonomie limitée ; cette source peut être aussi un alternateur de secours entraîné à vitesse constante par un moteur hydraulique (A 320, A 340) lui-même alimenté par un moulinet, appelé Ram Air Turbine ou RAT, système dont l'autonomie n'est donc pas limitée. D'autres systèmes de stockage ont été imaginés ou essayés : turbine à hydrazine (sur Concorde prototype), ou volant d'inertie, mais ils n'ont pas été retenus.

Ainsi, en cas de panne d'un générateur primaire, les conséquences, variables selon les cas, sont les suivantes :

– sur avion militaire, jusqu'aux Mirage F 1 et 2000 inclus, la mission est interrompue en cas de panne alternateur, alors que sur Rafale, la poursuite est possible ;
– sur avion civil (famille Airbus, toujours bimoteur au moins), il n'y a pas de délestage de charges techniques sur panne simple ; sur panne double, la batterie doit assurer 30 minutes d'autonomie pour retrouver des conditions VFR ou effectuer l'atterrissage (A 300). Avec CDVE, le secours ne doit pas être limité dans le temps, d'où utilisation d'un moulinet (A 310 Garuda, puis A 320-330-340).

3.3. Schémas de circuits de génération électrique

Dans l'évolution des générations, on peut classer les schémas en trois types :

- Type I : les circuits sont exclusivement continus, alimentés par une ou plusieurs génératrices (ex. : MD 312-315R, Latécoère 361). Le courant alternatif à fréquence fixe, qui s'introduit vers 1950, est produit initialement par des convertisseurs tournants. Il n'y a pas encore de réseau alternatif, mais on utilise éventuellement plusieurs convertisseurs, un par équipement consommateur (ex. : Mystère IV A). On trouve en complément un réseau spécifique à fréquence variable pour les charges résistives : sur le Breguet Alizé, la Caravelle (2x18 kVA pour les cuisines en 1955), le Breguet Atlantic, le Breguet 941S (2x40 kVA).
- Type II : une période de transition commence vers 1960, avec l'apparition des alternateurs à fréquence constante sur les aéronefs civils et militaires, en conservant les génératrices. Tels sont, par exemple, le Mirage III C, le Breguet 941 et le Breguet Atlantic, qui cumule même 2 génératrices et 4 alternateurs, dont 2 à fréquence constante et 2 à fréquence variable.
- Type III : Il apparaît avec le Mirage IV (1965) et l'utilisation exclusive en génération primaire d'alternateurs à fréquence fixe, complétés par des TR pour fournir le courant continu : sur cet avion doté d'un système de navigation et bombardement (SNB), gros consommateur d'énergie, et qui pratique aussi pour la première fois le vol prolongé en haute altitude, les génératrices ne peuvent en effet pas tenir l'altitude (les balais s'usent en… un vol !).

La fréquence fixe à 400 Hz s'est ainsi maintenue sur les circuits principaux pendant quarante ans. Pourtant, les équipements s'accommoderaient pour la plupart d'une alimentation alternative à fréquence variable, puisque le courant y est en général redressé pour faire du continu. Finalement, un réseau principal à fréquence variable apparaîtra ultérieurement (2001) sur le Rafale, dans le domaine militaire, et sur l'Airbus A 380, dans le domaine civil.

Dans le type III, (configuration toujours en vigueur), on trouve deux variantes selon que la batterie peut assurer ou non le démarrage des moteurs :
- soit un réseau primaire continu avec génératrice démarreur pour les aéronefs de faible tonnage tels que l'Alphajet et les Falcon, avec en général un convertisseur pour alternatif (ou, comme sur Falcon 900, un alternateur redresseur qui permet une plus grande puissance) ;
- soit un réseau primaire alternatif sur les avions de transport de la famille Airbus, ou de combat tels le Mirage F1, Mirage 2000, Rafale, avec des transfo-redresseurs (TR) pour fournir le courant continu.

Ces circuits de type III sont dotés d'une protection contre les défauts des générateurs, des équipements et des câblages. Les boîtiers de contrôle et de protection (surcharge, tension et fréquence) assurent les deux premières par action automatique sur les contacteurs appropriés. La protection des câblages est assurée par des disjoncteurs, en général accessibles par l'équipage en vol (pour réarmement en cas de déclenchement intempestif) ; le câble reliant le générateur à sa barre bus, appelé feeder, dispose en général d'une protection spécifique. L'équipage dispose également des informations de base sur l'état des générateurs et des commandes appropriées pour action éventuelle.

Sur les réseaux continus, les génératrices alimentent chacune une barre bus ; celles-ci sont généralement couplées en fonctionnement normal, les régulateurs assurant un équilibrage convenable du débit des deux machines ; sur Falcon 900 (1986) et ATR 42 (1985), cependant, les barres ne sont pas couplées, de façon à limiter la propagation d'un défaut éventuel.

Sur hélicoptère, la situation est similaire à celle des avions : sur les appareils de faible tonnage (ex. : Alouette, SA 341 Gazelle), les circuits sont à base continue ; sur appareils de masse plus élevée (Super Frelon, Puma), la base est alternative ; la différence, dans ce cas, est que la BTP fournit un entraînement direct de l'alternateur à vitesse quasi constante qui peut ainsi alimenter directement le réseau à 400 Hz.

La conception d'ensemble des aéronefs français est très proche de ce qui se fait aux États-Unis, avec cependant quelques particularités :
- le concept de cœur électrique, boîtier isolé où sont regroupés les contacteurs de puissance ; on limite ainsi les risques de court-circuit avec la masse, puisque le retour à la masse se fait par la structure (mais pas entre phases sur les réseaux alternatifs) ;
- le choix sur les avions français est, en général, de ne pas coupler en parallèle les barres bus alternatives, pour éviter de devoir synchroniser les alternateurs (opération assez délicate) et améliorer la ségrégation, alors que la mise en parallèle est en général réalisée sur les avions américains ; les réseaux alternatifs sont cependant isolés sur Boeing B 757 et B 767.

On trouvera, ci-après, quelques exemples sur avions militaires, avions civils et hélicoptères, illustrant les trois types de circuits sur aéronefs, suivis de la composition des généra-

tions sur une large gamme d'appareils. On a fait figurer quelques exemples postérieurs à 1985 (tels que Rafale et A 340) pour indiquer les tendances récentes. Les schémas sont ceux des aéronefs suivants :

Avions militaires :

- type I : Breguet 941
- type II : Mirage III C
- type III : Jaguar E, Mirage F1, Mirage 2000, et Rafale

Avions civils :

(type III) : A 320

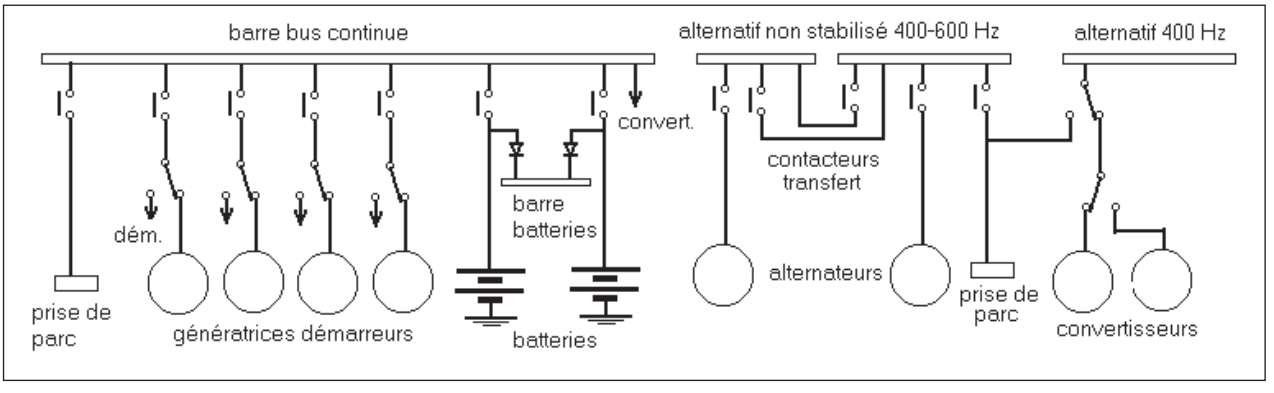
Hélicoptères :

(type I) : Dauphin

Breguet 941S (quadrimoteur, 1967)

La génération comporte un réseau primaire continu, l'alternatif stabilisé étant fourni par deux convertisseurs. Le réseau alternatif à fréquence variable est indépendant.

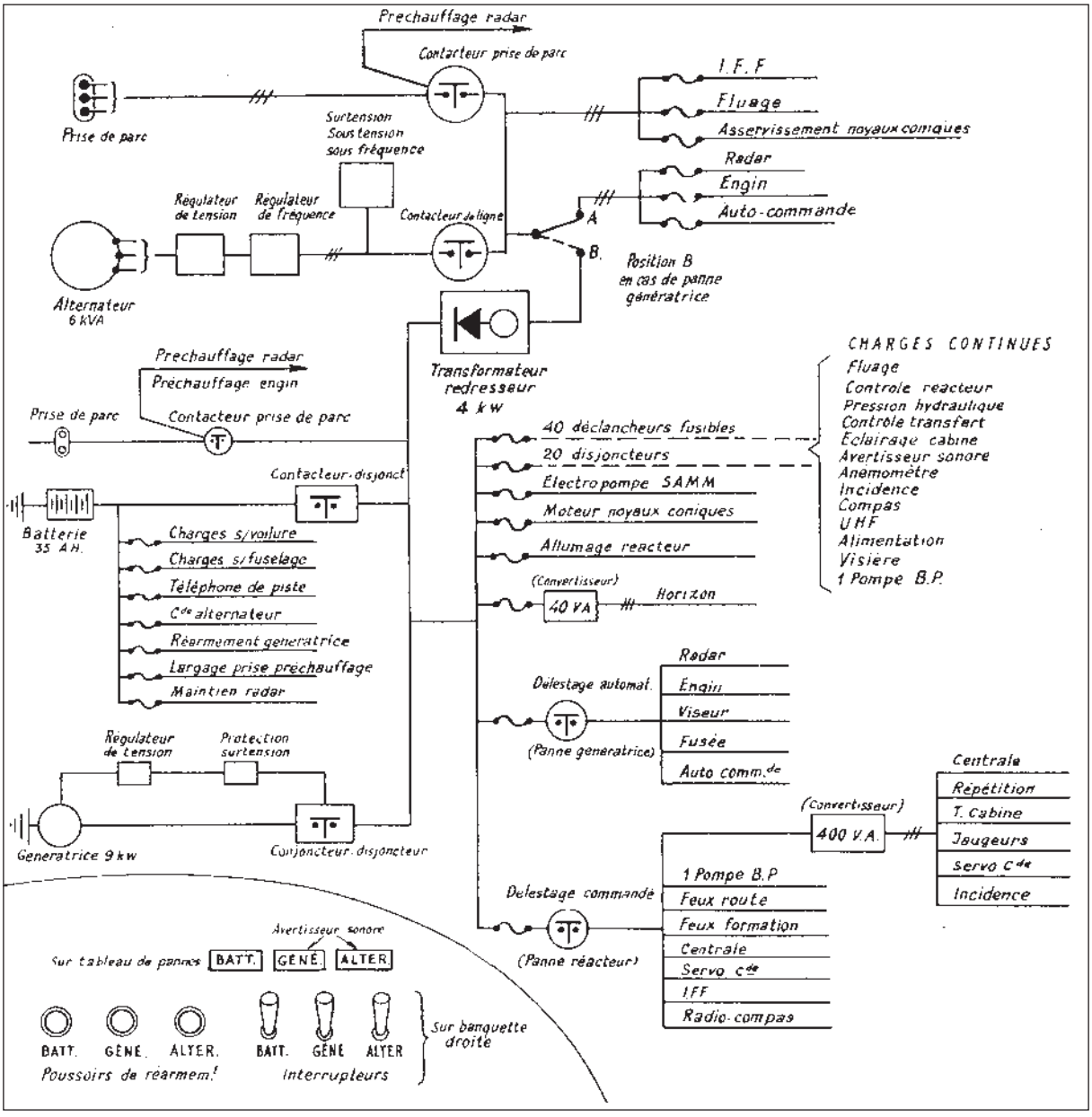
(source : schémas de principe, Avions L. Breguet 1965)



Mirage III C (monomoteur, 1961)

Le circuit complet est figuré avec les équipements ; il appartient au type II : la génération primaire est mixte, avec génératrice et vario-alternateur à fréquence fixe, un TR assurant l'alimentation d'une partie des équipements en cas de panne de la génératrice, avec délestage radar et engin dans ce cas.

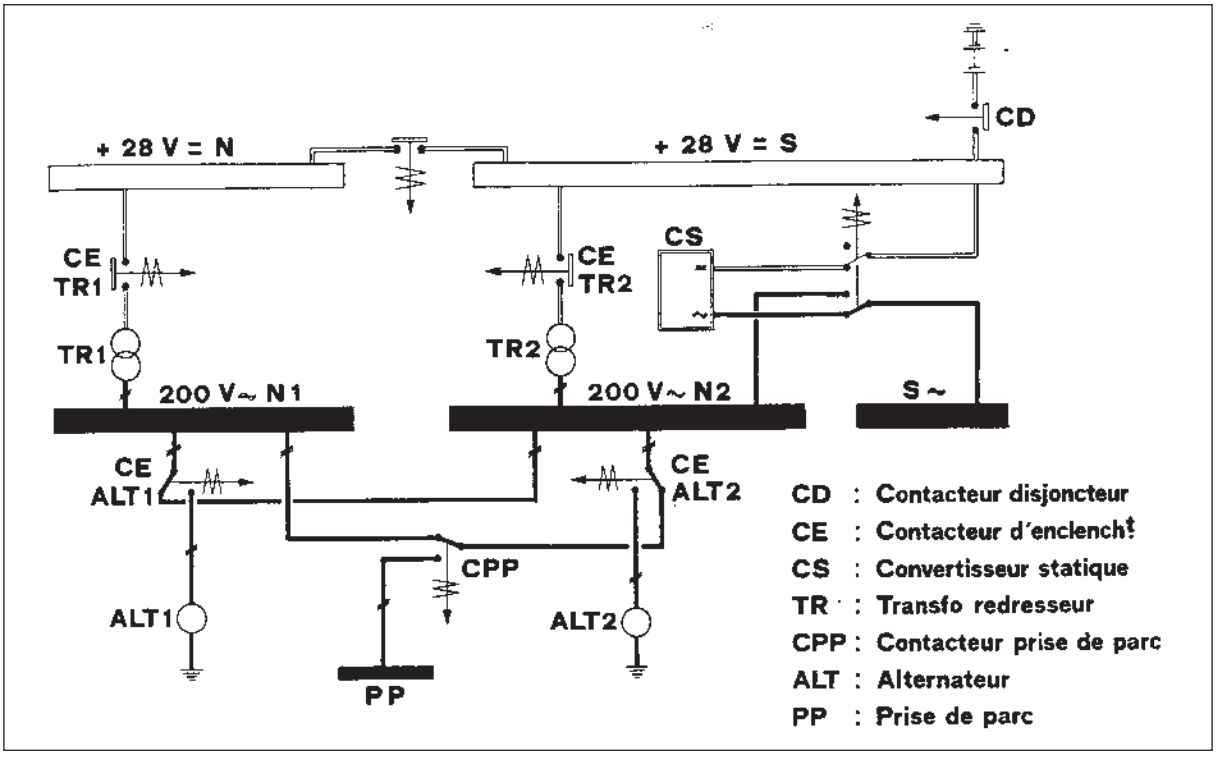
(source : notice GAMD 1958)



Jaguar E (bimoteur, 1973)

On arrive maintenant au schéma type III, qui comporte un circuit primaire alternatif double symétrique, avec dernier secours par batterie et convertisseur statique :

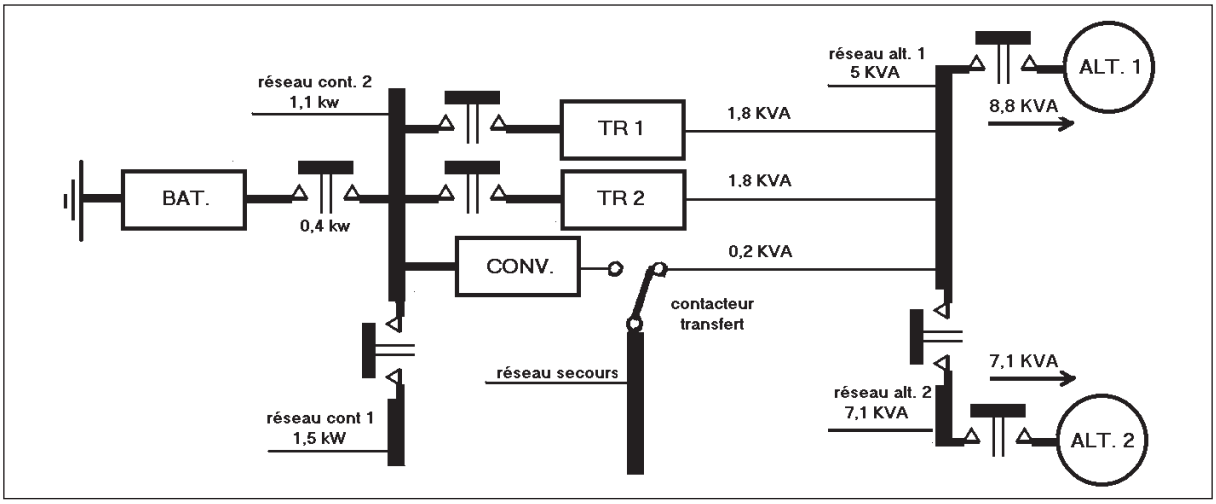
(source : notice de présentation technique SEPECAT 1968)



Mirage F1 (monomoteur, 1973)

Même architecture de base que sur Jaguar, mais le circuit est dissymétrique, les deux TR étant alimentés par la même barres bus.

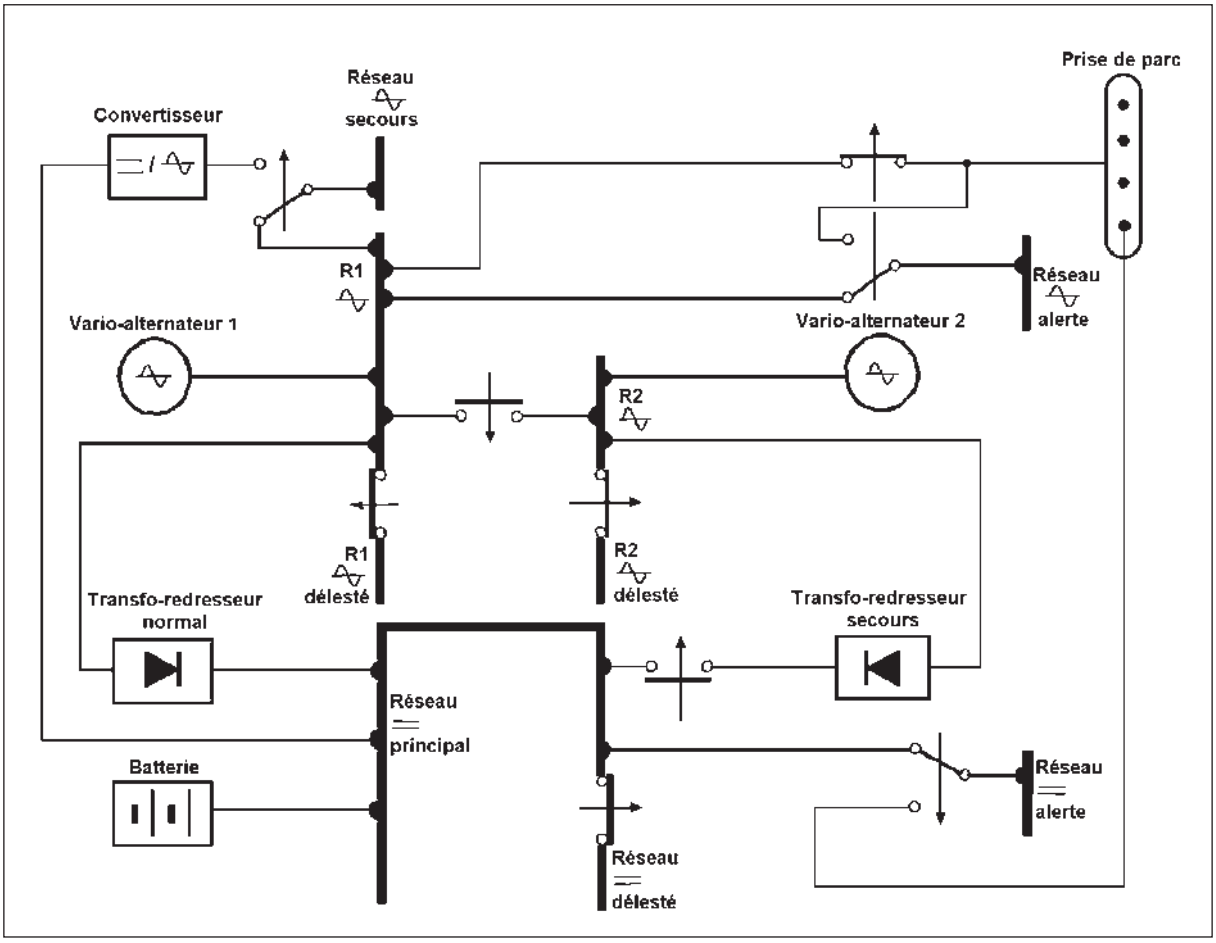
(source : AMD, oct. 1970)



Mirage 2000 (monomoteur, 1983)

On retrouve la symétrie sur l'alimentation des TR, mais un seul est en marche en fonctionnement normal. On a toujours délestage en cas de panne alternateur.

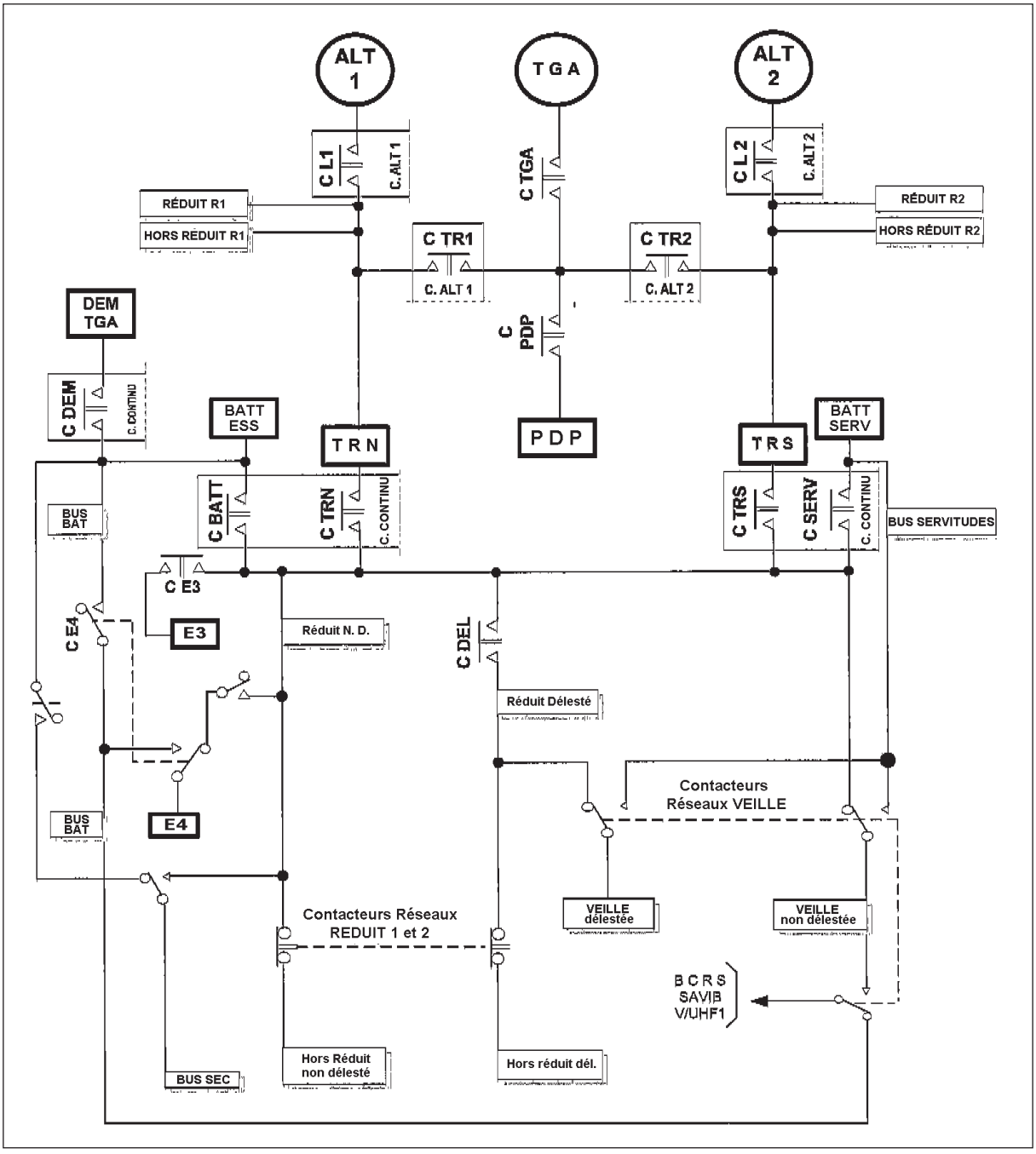
(source : AMD)



Rafale (bimoteur, 1998)

C'est le premier avion de combat français sur lequel on peut terminer la mission en cas de panne d'un alternateur (ici à fréquence variable).

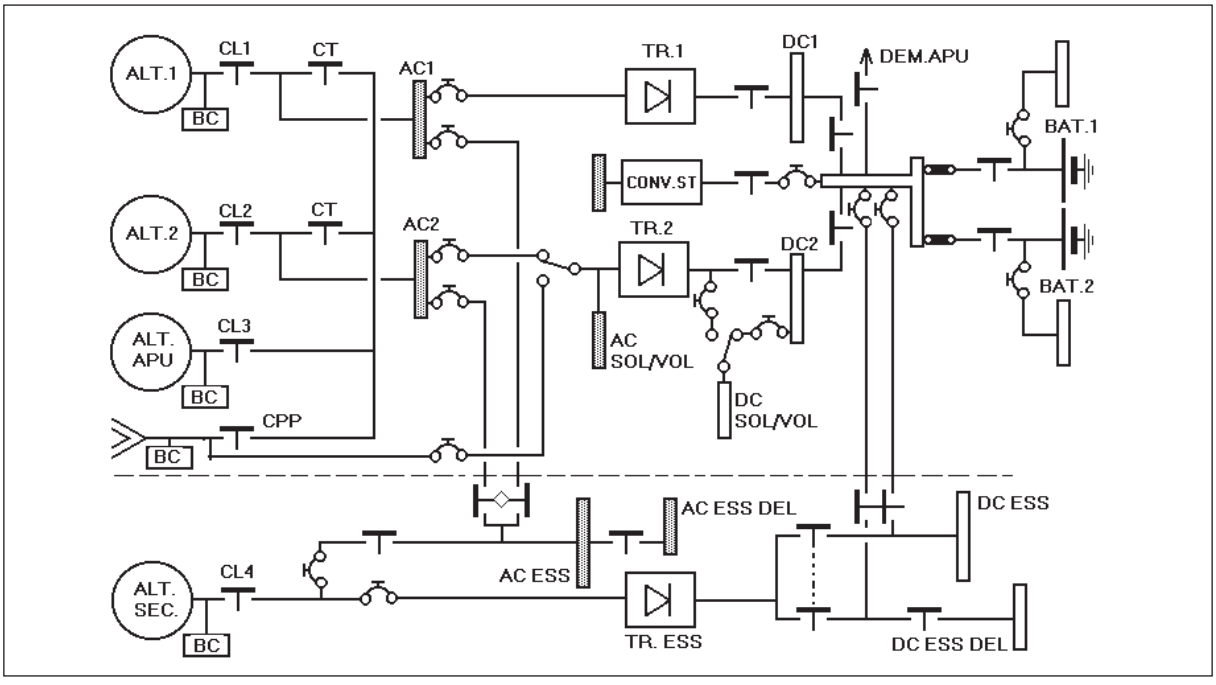
(source : AMD)



Airbus A 320 (bimoteur, 1988)

On trouve 2 alternateurs, et un 3e identique sur APU. La chaîne de secours figure sous les pointillés, avec le 4e alternateur entraîné par un moteur hydraulique, donnant une autonomie non limitée.

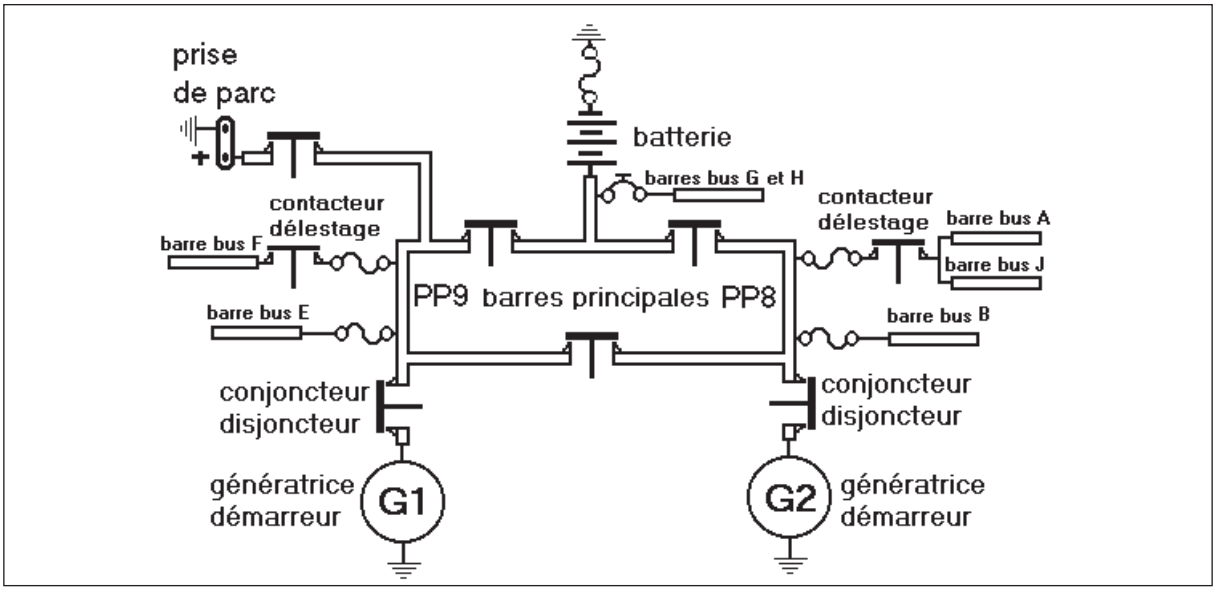
(source : Airbus Industrie)



Hélicoptère SA 365 Dauphin (bimoteur, 1977)

Génération exclusivement continue (circuit type I).

(source : Aérospatiale)



Les équipements de génération

*(source : constructeur ou clauses techniques, sauf aéronefs marqués *, pour lesquels la source est fiable mais non certifiée)*

Avions militaires	Génération électrique
MD 315R Flamant (1947)	2 génératrices LABINAL 2500W type G255 + régulateur de tension pile de carbone DUCELLIER type 710 (démarreur électrique Air-Equipement type 50.290) 1 batterie 25 Ah
MD 450 Ouragan (1952)	1 génératrice Labinal G 250 A + régulateur Labinal 4760 1 batterie d'accumulateurs DININ 25 Ah
N 2501 Noratlas (1952)	2 génératrices 6 kw Labinal ou Air-Equipement 2 convertisseurs 1000VA 400Hz 1 batterie plomb 48 Ah
Mir III C (1961)	1 génératrice 9 KW SEB 1000 + régulateur AE 85141 1 batterie 35 Ah SAFT 20.10.35 1batterie amorçable Andyar 1 vario-alternateur 4 kVA Labavia FC4 1 convertisseur 1 kVA Auxilec 1000 1 convertisseur 40 VA Auxilec 45
Mir III E (1965)	1 génératrice 9 KW SEB 1001A + régulateur AE 85141 (preotection surtensions ECE 4302) 1 batterie 35 Ah SAFT 20.10.35A 1 TR Auxilec 4001 1 vario-alternateur 9 kVA Labinal 2810 ou Auxivar 9100 (protection ECE 4320) 1 convertisseur 100 VA Auxilec 111 1 convertisseur 40 VA Auxilec 46
Mir III B Mir III R (1963)	1 génératrice 9 KW SEB 1001A + régulateur AE 85141 (preotection surtensions ECE 4302) 1 batterie 35 Ah SAFT 20.10.35A 1 TR Auxilec 4000 1 vario-alternateur 6 KVA Labinal 2701 (protection ECE 4320) 1 convertisseur 400 VA Auxilec 408 1 convertisseur 10 VA Auxilec 46
Etendard IV M (1961)	1 génératrice 6 KW 28,5V 1 batterie 35 Ah 1 TR (secours, panne génératrice) 1 alternateur 4 kVA 400 Hz 120/208V 1 convertisseur 400 VA (secours) 1 prise de parc continu et alternatif

Mirage IV (1965)	2 vario-alternateurs Labinal 2990 10-20 kVA (protection ECE 4321X3) 1 batterie SAFT 2.10.35 ou SAFT 1500 2 TR Ragonot 1200
BR 941 S (1967)	4 génératrices démarreurs SEB 8043 régulateurs de tension Air-Equipement 85141A 2 batteries 40 Ah SAFT 4050 (Ni-Cd) 2 alternateurs 40 kVA Auxilec 40.000 à fréquence variable (régulateur de tension compound) 2 convertisseurs Auxilec type 3010
Mirage F1(*) 1973	2 vario-alternateurs 15 kVA 400Hz Auxilec 15100 2 transfo-redresseurs Bronzavia 1 batterie 40 Ah SAFT 4050 1 convertisseur statique (secours)
Jaguar E (1973)	2 alternateurs 12/15 kVA 2 TR 2x150 A 1 batterie 40 Ah 1 convertisseur statique 150 VA
Mir 2000 (*) (1984)	2 vario-alternateurs 20 kVA 2 TR, 1 batterie
Rafale (*) (2002)	2x30/40 kVA à fréquence variable 2 TR, 1 batterie

Hélicoptères	**Génération électrique**
SE 3120 Proto.Alouette II (1963)	1 génératrice Ragonot Super Dynautron 300/450 w (avec un démarreur Salmson-Bosch type ED 30 1 batterie 24 V 12 Ah Dary
SA 3210 Super Frelon (1966)	1 batterie 40 Ah SAFT 4050 (Ni-Cd) 3 génératrices + régulateurs de tension AE 85141A 1 vario-alternateur auto-ventilé 9 kVA à fréquence constante Auxilec 9123 1 alternateur auto-ventilé 9 kVA à fréquence variable Auxilec 9002
SA 330 Puma (1974)	2 générateurs 400 Hz à 20 kVA à fréq. var. Auxilec 1062 1 transfo- redresseurs 150 A Auxilec 3101 1 batterie Voltabloc 40 Ah SAFT 4000

Avions civils	**Génération électrique**
Latécoère 631 (1947)	6 génératrices électriques 2400W LEECE Naville sur moteurs (+ 6 démarreurs électriques à inertie) 3 génératrices 2400W sur centrale (moteur SIMCA 8 à volant allégé) 1 batterie d'accumulateurs (150 kg)

A 320 (*) (1988)	2 IDG 90 kVA 115V 400 Hz + 3e IDG 90 kVA sur APU 1 alternateurs 5 kVA 400 Hz entraîné par un moteur hydraulique (secours) 1 convertisseur statique monophasé 1 kVA 400Hz (secours) 2 TR 200A (normal) + 1 TR 200A (secours) 2 batteries 23 Ah
A 340 (2001)	4 IDG 75 kVA 115/200V 400 Hz 1 alternateur 115 kVA 400 Hz entraîné par l'APU 1 générateur secours entraîné par un moteur hydraulique (circuit vert) 1 convertisseur statique monophasé (secours) 3 TR 28V 200A + 1 TR 200A pour démarrage APU 3 batteries Ni-Cd 37 Ah 28 V

4. CONCLUSION

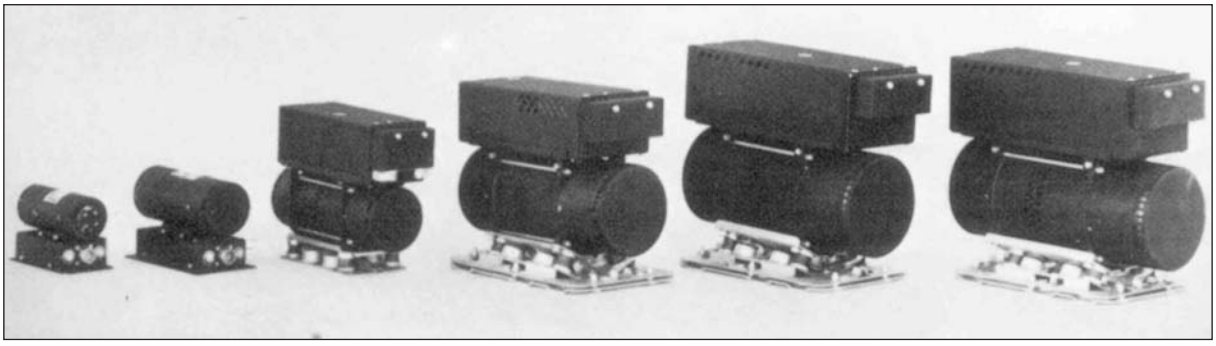
On est ainsi passé en quarante ans d'une situation où l'électricité est un élément presque accessoire sur les aéronefs, avec une puissance à peine supérieure à celle d'une voiture, à celle où elle est vitale pour le maintien en vol, avec une puissance installée qui, sur avion de transport civil, va rapidement approcher le demi mégawatt. Cette véritable révolution amène deux exigences : sécurité et réduction de masse.

La conception et la mise en place progressives d'une vraie structure de distribution d'énergie vont permettre de garantir la sécurité de fonctionnement requise, qui est devenue une spécification de premier plan, tant sur avion civil que sur avion militaire.

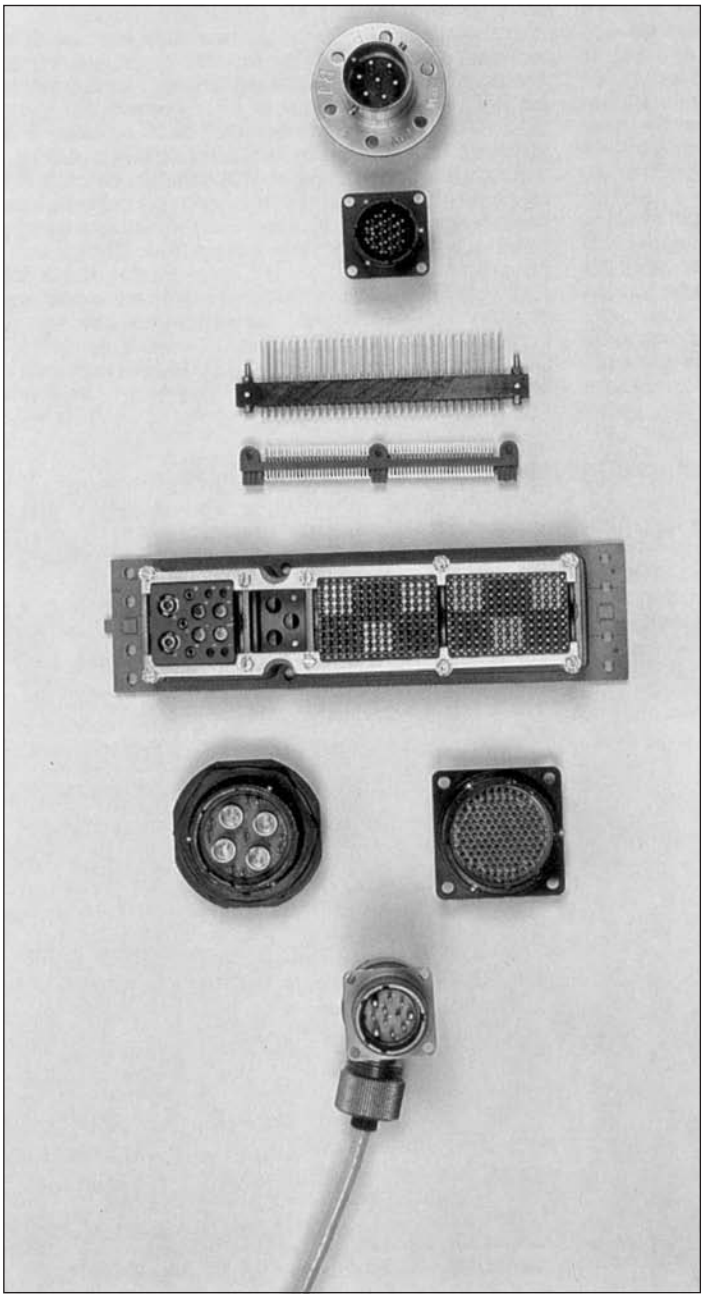
Parallèlement, l'évolution technologique, moins visible peut-être que dans l'avionique, n'en est pas moins importante, avec l'introduction des circuits alternatifs triphasés et les progrès des matériaux et des techniques de refroidissement qui vont permettre de satisfaire l'exigence de réduction de masse : un gain d'un facteur 4 a ainsi été obtenu sur la masse des équipements de génération électrique pour une puissance donnée.

Philippe MARTELLI
avec la participation de Gérard O'MAHONY et d'André COUTY

Sources:
– CAA-Centre d'archives de l'armement, Châtellerault.
– SHAA-Service historique de l'armée de l'Air, fort de Vincennes.



Convertisseurs tournants AUXILEC, continu 27 Volts-alternatif 115 Volts - 400 Hz, puissance 30, 100, 250, 1000, 2000, 3000 VA (Source GIFAS).



1950 : Connecteurs à vis ou à baïonnette, deux ergots, 1 contact au cm^2

1960 : Connecteurs à baïonnette, trois ergots, 2 contacts au cm^2

1960 : connecteurs pour cartes circuits imprimées de 4 à 6 contacts au cm^2

1970 : Connecteurs pour cartes circuits imprimées haute densité de contacts 12 contacts au cm^2

1980 : Connecteurs pour racks ARINC 600 haute densité de contacts quatre contacts au cm^2

1970-1980 :
– Connecteur à baïonnette haute densité, 4 contacts au cm^2
– Connecteurs pour ligne bus électrique

1980 : Connecteurs pour fibres optiques

Evolution des connecteurs électriques, de 1950 à 1980, et connecteurs pour fibres optiques, de 1980. (Source GIFAS).

ANNEXES B

ANNEXES THÉMATIQUES

B1 : LES RELATIONS INTERNATIONALES
B2 : STATISTIQUES SUR LES SOCIÉTÉS DU SECTEUR AÉROSPATIAL
B3 : LA FILIATION DES ÉQUIPEMENTS DE L'AÉRONAUTIQUE À L'ESPACE
B4 : LES ÉQUIPEMENTS FRANCAIS DANS LES PROGRAMMES AÉRONAUTIQUES (AVIONS ET HÉLICOPTÈRES) DE 1945 À 1985
B5 : HISTOIRE DES ÉQUIPEMENTS SPATIAUX
B6 : MOYENS D'ESSAIS AU SOL POUR L'INDUSTRIE AÉROSPATIALE
B7 : LE RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL DES ÉQUIPEMENTS AÉROSPATIAUX DE DÉCEMBRE 1975

ANNEXE B 1

LES RELATIONS INTERNATIONALES

Les relations internationales du secteur aérospatial, civil ou militaire, s'exercent dans le cadre du commerce ou de la coopération internationale. Elles impliquent, à des degrés et sous des aspects très divers, de nombreux acteurs de l'industrie et des services officiels.

Le commerce international pour les équipements aéronautiques s'est développé de manière indirecte, par les achats et les ventes de matériels aériens complets.

Les premières ventes d'avions à l'étranger sont intervenues à la fin des années cinquante et ont ainsi généré les premières exportations d'équipements. Parallèlement, l'industrie française des équipements développait sa compétitivité, avec le soutien attentif du Service technique aéronautique, et parvenait à réaliser, par elle-même, des ventes directes aux avionneurs ou utilisateurs étrangers pour l'équipement d'appareils nouveaux ou la rénovation d'appareils anciens. Cette activité s'est substantiellement renforcée dans les années quatre-vingt-dix, participant ainsi directement au développement des exportations de l'ensemble du secteur, essentielles pour l'économie du pays et vitales pour cette industrie.

Les exportations de matériels militaires ont constamment mis à contribution les services officiels, services techniques ou services chargés des relations internationales, tant pour l'organisation et le bon déroulement des actions promotionnelles, des visites et présentations générales ou spécifiques, que pour la participation aux premiers contacts avec les partenaires, l'accompagnement des négociations, la fourniture de divers avis, l'exécution de contrôles réglementaires et techniques, le suivi de la bonne exécution des contrats jusqu'à leur dénouement et même quelquefois au-delà de ces ventes, pour l'assistance au client en matière de soutien en service et de maintenance.

Le second volet des relations internationales concerne, bien évidemment, la coopération internationale, particulièrement développée en Europe depuis des décennies. Elle peut présenter des caractéristiques assez différentes, selon les programmes civils ou militaires, le degré d'implication des industriels dans la maîtrise d'œuvre et des gouvernements dans la maîtrise d'ouvrage.

La coopération a concerné en France de nombreux types de matériels, à l'exception principale des vecteurs de la dissuasion.

Les fruits de la coopération ont été très longtemps discutés et jugés quelquefois amers, car les avantages très souvent décisifs qu'elle apportait de renforcement de la puissance commerciale et industrielle, d'allégement du fardeau financier national par le partage des coûts de développement et d'industrialisation, d'allongement des séries et de réduction corrélative des coûts unitaires de production, avaient en contrepartie d'indéniables désavantages : l'alourdissement des organisations et de la conduite des programmes, la spécialisation des compétences, le partage "en juste retour" du travail et des parts de marchés.

Historiquement, la coopération internationale dans le secteur aérospatial, plus spécifiquement la coopération européenne, n'a cessé en France de profiter d'un environnement

et d'une volonté politique très favorable, considérée comme une des pierres d'angle de la construction de l'Union européenne. Dans la pratique cependant, des obstacles de tout ordre ont quelquefois fait achopper d'importants projets.

Le développement qui suit sur ce sujet est, dans la mesure du possible, plus précisément orienté sur les coopérations en matière d'équipements aéronautiques. Il ne sera cependant pas possible d'éviter un rappel sur les programmes d'ensemble qui les ont en général initiées. On pourra, en outre, mentionner quelques rares exemples récents de coopération dans le domaine amont de la recherche et de la technologie.

La branche des équipements occupe une place importante dans l'ensemble du secteur aérospatial. Elle employait, en 1995, environ 30 % des effectifs totaux et participait dans la même proportion à la construction du chiffre d'affaires global de la profession.

1. LE COMMERCE INTERNATIONAL

1.1. Les importations d'équipements

Les achats à l'étranger s'imposent généralement par absence de production française répondant au besoin ou par insuffisance de compétitivité sur un marché très concurrentiel comme celui de l'aéronautique civile. La mobilisation des moyens et des volontés a largement réduit ces déficiences mais des obligations nouvelles ont vu le jour, notamment dans le cadre des programmes en coopération internationale.

Les importations directes d'équipements sont réalisées par les utilisateurs et réparateurs pour la maintenance de matériels d'origine étrangère ou par des constructeurs aérospatiaux pour intégration dans leurs fabrications nouvelles.

Selon la catégorie ou la destination des équipements, les importations directes sont le fait des services officiels pour les forces aériennes de sécurité militaires ou civiles, des compagnies aériennes, des réparateurs, des constructeurs aérospatiaux.

Les importations indirectes d'équipements sont générées par les importations d'avions ou d'hélicoptères dans lesquels ils sont intégrés. Elles ont concerné en France à des degrés divers de nombreux pays fournisseurs étrangers : Grande-Bretagne, Pays-Bas, Suède, Brésil, Canada et en très grande majorité les États-Unis. Elles sont encore d'un volume considérable pour l'aviation commerciale.

Les achats et fabrications sous licence de l'après-guerre
Le programme d'assistance militaire

Après la guerre, le parc renaissant des compagnies aériennes françaises a été très largement reconstitué par des achats d'avions américains et notamment des Mac Donnell Douglas, DC 3, DC 4, DC 6, DC 7, Constellation, Super Constellation. Cette suprématie américaine se poursuivit après la mise en service des premiers jets B 707 et DC 8 fin 1950 début 1960 et ne fut que très légèrement entamée par l'arrivée de Caravelle, Mercure, Concorde, avant la montée en puissance d'achats des Airbus.

Depuis les fabrications des Mirage, les approvisionnements d'équipements étrangers ne se sont plus guère imposés pour la production des appareils militaires, à l'exception d'obligations éventuelles d'achat à un pays coopérant dans un programme en coopération interna-

tionale. Ils furent relativement importants dans le passé, dans les années cinquante, pour la maintenance des avions à réaction achetés aux États-Unis ou pour les avions construits sous licence en France.

Dans l'immédiat après-guerre, les achats d'avions militaires à l'étranger aux États-Unis ont été importants. Ils ont entraîné ipso facto des importations d'équipements (trains d'atterrissage, génération électrique, instruments de bord, pressurisation et oxygène).

Ces importations d'avions avaient un caractère assez particulier puisqu'elles étaient souvent financièrement aidées par un programme d'assistance militaire (PAM) alimenté, probablement exclusivement par des fonds américains, dans le cadre de l'OTAN. C'est ainsi que les missions d'achats françaises aux États-Unis eurent à s'occuper, entre autres, de l'achat au profit de l'armée de l'Air française de très nombreux avions : 350 avions T 6 fournis pour l'entraînement et l'appui au sol et près de 900 chasseurs bombardiers à réaction (Republic F 84 Thunderjet et Thunderstreak, North American F 86 et F 100 Sabre et Super Sabre).

Des achats aux États-Unis furent également effectués pour l'aéronautique navale : plusieurs centaines de chasseurs-bombardiers à réaction, Curtiss SB 2C Helldiver, Grumann F 6F Hellcat et F 8F Bearcat Chance-Vouht F4 U7 Corsair.

Ces avions furent livrés dans les premières années de la décennie 1950 et furent notamment engagés en Indochine, puis en Algérie.

Il faut aussi signaler l'achat, par la Marine nationale, d'hélicoptères américains Sikorsky HSS 1 et HSS 1N.

Le programme d'assistance militaire n'eut pas comme unique objet ces importations d'appareils américains. De manière plus surprenante aujourd'hui, il contribua à la renaissance de notre industrie aéronautique en apportant son aide financière au développement et à la production des Mystère IV, aide particulièrement bienvenue après le développement de l'Ouragan et du Mystère II, premiers chasseurs à réaction français du début des années cinquante.

En parallèle avec les premiers achats sur étagère d'avions de combat américains et pour accélérer la remise à niveau de l'industrie aéronautique nationale, le ministère de l'Air suscita des prises de licences de fabrication d'avions britanniques. C'est ainsi que furent produites par la Société nationale de construction aéronautique du Sud-Est les séries de Vampire Mk 5, Mistral, Aquilon, qui constituèrent un ensemble de plus de cinq cents chasseurs à réaction.

L'Ouragan était équipé d'un réacteur construit par Hispano Suiza qui, après un accord d'échanges d'informations techniques avec Rolls Royce en 1946, avait acquis auprès de ce motoriste des licences pour la fabrication du Nene, puis du Tay et du Verdon.

Le Nene de fabrication Hispano équipa les séries Ouragan et Mistral, les très nombreux avions d'entraînement T 33 de l'armée de l'Air française ainsi que la totalité des prototypes expérimentaux français (à l'exception bien sûr des avions à statoréacteur) qui firent leur premier vol entre 1948 et 1952.

Le Tay fut installé sur les premiers Mystère IV A, mais la série de plus de 400 appareils fut équipée du Verdon, développé par Hispano à partir du Tay.

Cette production d'avions sous licence a certainement apporté aux équipementiers français l'occasion de développer leurs propres capacités par des fabrications également sous licences ou de concevoir de nouveaux produits, en particulier pour les nouveaux instruments nécessaires au contrôle des avions à réaction (machmètre et instruments moteurs) et se mettre ainsi en mesure de satisfaire les principales demandes.

La revitalisation des sociétés d'équipements

Le très important ouvrage du GIFAS sur l'histoire de l'aéronautique de 1945 à 1985 a servi de référence principale pour le présent chapitre. Il donne quelques indications sur les fournitures et les équipementiers français du début de la période étudiée.

S'agissant de l'Ouragan, par exemple, on y cite les sociétés suivantes :
- Badin pour les instruments de pilotage (anémomètre, altimètre, variomètre, horizon artificiel, indicateur de cap) ;
- AMA et Faure Herman pour les instruments moteur (tachymètre, température tuyère, pression d'huile, débitmètre, jaugeur) ;
- Sarma pour les commandes mécaniques de gouvernes ;
- Messier pour le train d'atterrissage et le système de commande hydraulique du train, des volets et des aérofreins.

On y relève une liste, probablement non exhaustive, d'autres noms de sociétés françaises : Labinal, SAFT, Dinin, Aviac, Le Bozec, Bronzavia, Superflexit, SEMCA, concernées par la génération électrique, les circuits carburant et oxygène, la pressurisation cabine. Les premiers éléments cités d'avionique concernent le viseur de Sadir Carpentier sous licence Ferranti (GGS Mk IV E) et la radio VHF SARAM.

Cette liste se complète de quelques noms nouveaux pour la série des Mystère I, Mystère IV A et Super Mystère SM B2 : Bezu (horizon artificiel et compas gyromagnétique), SFENA (horizon gyroscopique), CEV/Beaudouin puis Derveaux (viseur type 100).

Dès le lancement de ces programmes d'avions de combat à réaction, l'industrie française des équipements y apporta une contribution importante en ayant suffisamment recouvré ses capacités de production et surtout de conception.

L'aide extérieure contribua à ce renouveau technique et industriel, par le financement de programmes de développement et d'acquisition de moyens de production dans le cadre du PAM, par le transfert de savoir-faire favorisé par des cessions de licences et par la participation de quelques excellents spécialistes allemands aux travaux de recherche et de technologie.

L'autonomie d'approvisionnement et la compétitivité retrouvées n'excluent pas quelques achats importants sur étagère.

Quelques importations pleines d'enseignements

Ces capacités retrouvées ne firent que se renforcer et s'étendre à une très large diversité de produits. Pour les programmes militaires nationaux, elles permirent ainsi fort heureusement d'éviter, à de rares exceptions près, le recours à des importations d'équipements importants.

Toutefois, pour l'exécution de certaines missions spécifiques, quelques achats importants d'avions furent effectués aux États-Unis au fil des décennies : avions ravitailleurs KC 135 et avions de combat embarqués Crusader dans les années soixante, avions de transports C 130, avions de détection lointaine Boeing SDA AWACS et Grumann AEW Hawkeye fin 1980-début 1990.

Ces achats entraînèrent ipso facto l'importation indirecte de l'équipement de ces avions, dont l'avionique de mission représentait certainement, tout au moins pour les AWACS et Hawkeye, la plus grande part de leur valeur.

La disproportion avec le besoin de l'investissement en coût et en délai qu'aurait nécessité un éventuel développement national ne pouvait, dans tous ces cas, que justifier un achat sur étagère. Il fut assorti dans la mesure du possible d'un "retour" par des compensations industrielles directes dans le secteur aéronautique.

Au titre des relations avec les États-Unis, on peut aussi évoquer les ventes ou exportations temporaires de composants sensibles ou d'équipements complets qui furent autorisées par le Pentagone à notre profit au début des années soixante, pour des tests et évaluation qui contribuèrent, avec l'exploitation de certains accords industriels, à l'acquisition de connaissances techniques et au développement d'équipements nouveaux. Tel fut par exemple le cas de certains composants inertiels, d'un système de navigation par inertie, d'un dispositif d'acquisition et de poursuite automatique d'étoiles, d'un des premiers calculateurs numériques embarqués évalués au laboratoire du Service technique aéronautique et au Centre d'essais en vol.

Bien peu de données chiffrées sur les importations

Les rapports annuels du GIFAS donnent accès à quelques données globales de commerce extérieur pour l'ensemble du secteur aérospatial, mais pour les importations on n'y a pas trouvé d'informations par branches et notamment pour les équipements aérospatiaux.

On a pu constater, d'une part, que les importations globales avaient pratiquement doublé en francs constants entre 1978 et 1998, atteignant à la fin cette période un montant de près de 30 milliards de francs, et d'autre part que le volume des importations réalisées par les constructeurs dépassait de plus en plus celui des achats à l'étranger effectués par les utilisateurs.

La consultation rapide de quelques statistiques douanières pour le secteur aérospatial civil a fourni quelques données complémentaires.

La comparaison des relevés pour 1985 et 1998 met en évidence des évolutions assez contrastées de la répartition des importations selon les pays ou zones géographiques traduisant clairement la perte de part de marché supportée par l'industrie aérospatiale des États-Unis dans le domaine de l'aviation commerciale.

	1985	1998
Union européenne	30,9 %	44,2 %
États-Unis	49,3 %	27,3 %
autres pays	19,8 %	28,5 %
TOTAL	100 %	100 %

L'exploitation plus complète des statistiques douanières pourrait permettre de disposer de données plus analytiques, notamment la répartition par catégories de matériels, avions, hélicoptères, moteurs, équipements.

Les rapports du GIFAS ne fournissent pas d'informations de ce type. En revanche, celles relatives aux exportations sont plus fournies et seront évoquées ci-dessous.

1.2. Les exportations directes d'équipements

Depuis les années cinquante, les exportations directes d'équipements ont concerné essentiellement des ventes de matériels aux constructeurs ou utilisateurs étrangers, accompagnées éventuellement de certaines prestations d'après-vente.

À compter des années quatre-vingt, quelques sociétés du secteur ont réussi à exporter leur compétence en matière de système et à obtenir des commandes de rénovation d'appareils à l'étranger.

Le terme "équipements" est global et imprécis. Il correspond à l'ensemble de ce que la profession dénomme organes, équipements et accessoires, dits OAE, qui inclut aussi bien

les semi-produits et fixations de base que les trains d'atterrissage et l'avionique ultra sophistiquée, que les maîtres d'œuvres concepteurs de systèmes utilisent dans la fabrication ou intègrent dans leurs matériels. Les intégrateurs en cause sont les grands systémiers, à savoir les constructeurs d'avions, d'hélicoptères, de missiles, de véhicules spatiaux, les leaders de l'électronique de défense (Thomson-CSF et Alcatel Space), ainsi que les motoristes.

Nombre de systémiers ou motoristes français ont eu ou ont encore une activité importante d'équipementiers, dans des départements particuliers de leurs entreprises ou des sociétés rattachées. Ils réalisent en priorité, pour répondre à leurs propres besoins, des équipements de contrôle et commandes de vol, d'électronique de régulation, de guidage, d'avionique.

Les exportations directes d'équipements

Les rapports du GIFAS montrent que les exportations directes d'équipements se sont, en francs constants, constamment accrues durant les quatre dernières décennies. Leur part du chiffre d'affaires consolidé de ce secteur est passé pendant cette période de 5 % à 30 %. Elles ont atteint en 1998 un montant de 11,7 milliards de francs.

L'histoire de l'aéronautique française de 1945 à 1985, publiée par le GIFAS, illustre par quelques exemples certains succès obtenus à l'exportation par des équipementiers français. On a ainsi relevé les ventes de radars CSF RA 223 pour l'avion de combat suédois Vigen, l'exportation de radars de télémétrie air-air et air-sol Aida II par EMD, de radars TH CSF/ESD Agave et le succès, remarquable sur la durée, de l'horizon de secours SFENA auprès de Boeing, qui décida en 1966 d'en équiper tous les B 707 et par la suite tous ses avions 727, 737, 747, 757, 767. On a également pu noter les ventes de viseurs CSF R20/21 et R322 en Italie – pour des Macchi 326 – et VE 110 en Yougoslavie pour des Arao.

Cette liste d'équipements d'avionique est extrêmement partielle et limitée. Elle serait certainement à compléter par d'autres exemples d'exportations directes d'équipements réalisées à une époque plus récente et dans un champ d'activité beaucoup plus étendu, qu'il s'agisse de la conduite du vol (servocommandes AMD et Air Équipement), du pilotage automatique pour avion et hélicoptères (SFENA et SFIM), de la navigation et du guidage (Sextant, SAGEM), des radars (Thomson-CSF, ESD) et des contre-mesures (Thomson-CSF, ESD, MATRA), des calculateurs numériques (ESD, SAGEM) et visualisations (Thomson-CSF, Sextant, SAGEM), des télécommunications et radionavigation (EAS, TRT, Thomson-CSF), des systèmes de préparation de mission et simulateurs (Thomson-CSF) d'organes importants comme les trains d'atterrissage et tous les organes associés (Messier-Hispano-Bugatti), des différents systèmes fonctionnels de circuits carburant, génération et régulation électrique et hydraulique, conditionnement d'air (ABG-SEMCA, Auxilec, SAFT, Intertechnique) et de tous les accessoires nécessaires aux constructeurs de cellules et de moteurs.

Les exportations de deux sociétés majeures dans le domaine de l'avionique : Sextant Avionique et SAGEM

L'émergence d'un mastodonte dans l'électronique de défense (Big is really beautiful)

Dans les années quatre-vingt, le secteur des équipements a connu une première restructuration importante avec la création de Sextant Avionique à partir des apports de Sfena, Crouzet Aviation et de certaines activités d'Aérospatiale et Thomson-CSF, qui se partagèrent à égalité l'actionnariat de cette nouvelle société d'avionique.

Une évolution plus limitée concernait Auxilec, absorbée par Thomson-CSF après être entrée précédemment dans le giron de Thomson-Lucas.

En décembre 1998, les trois sociétés Dassault Électronique, entrée dans le groupe Thomson-CSF six mois plus tôt, Thomson-CSF Radars et Contre-Mesures et Thomson-CSF Missile Electronics fusionnaient pour créer la société Thomson-CSF Detexis. Cette opération donnait ainsi naissance au n°1 européen pour les systèmes de détection et de guerre électronique aéroportés et d'électronique de missiles.

Enfin, le même mois, Thomson-CSF, devenant actionnaire à 100 % de Sextant Avionique, achevait une concentration sans précédent en France de l'électronique aérospatiale.

Dans le même temps, le groupe SAGEM qui avait absorbé la SAT puis la SFIM, sociétés d'une très grande compétence dans les domaines respectifs de l'optronique infra-rouge et du pilotage automatique des hélicoptères, revendiquait une place éminente de n° 3 européen en électronique de défense et de sécurité.

Les exportations de Sextant Avionique

Les premiers chiffres clés disponibles dans la structure du nouveau groupe Thomson-CSF concernaient l'année 1998. Le chiffre d'affaires consolidé était de 40,5 milliards de francs, dont 70 % à l'international. Les activités aérospatiales représentaient près de 50 % de la totalité des activités du groupe.

Elles concernaient les systèmes aéroportés de Detexis et Thomson-Thorn Missile Electronics, les systèmes avioniques du pôle aéronautique constitué par Sextant pour l'avionique, Airsys ATM pour le contrôle du trafic aérien, Thomson Training & Simulation pour les simulateurs et entraîneurs, les systèmes de sécurité aérienne et de missiles et l'optronique.

Dans la répartition par domaine d'activité, un pourcentage d'environ 14 % revenait à Sextant Avionique, dont le chiffre d'affaires global de 4,8 milliards de francs en 1999 était constitué pour moitié de ventes directes à l'étranger et pour un quart par des exportations indirectes.

Dans le domaine des avions et des hélicoptères, Sextant Avionique intervient dans de nombreux programmes de modernisation, tels ceux des Mirage F1 en Espagne, des Mig 21 en Inde, des A 4 en Argentine ou encore d'avions de transport C 130 et Nimrod en Grande-Bretagne. Sextant Avionique équipe le Mirage 2000-5, modèle de base des Mirage 2000 exportés, et prépare l'avenir à travers différents développements pour les programmes Rafale, Tigre et NH 90.

La société a également remporté des succès importants pour la fourniture de centrales inertielles pour missiles de croisière Storm Shadow et SCALP-EG.

Dans le domaine des avions civils de premier niveau, Sextant bénéficie pour nombre de ses produits de la forte augmentation des cadences de livraison d'Airbus.

Dans le domaine des avions de transport régionaux et d'affaires, Sextant fournit des équipements au GIE ATR et a développé des systèmes de commandes de vol d'avions Bombardier Global Express et le système complet d'avionique du Dash 8.

Sur le marché des hélicoptères, Sextant Avionique et SFIM-Industries ont développé, en coopération avec Eurocopter, un système complet d'avionique à bas coût (Meghaso) qui met en œuvre les toutes dernières technologies.

Sextant Avionique a vendu des produits et services à près de 200 compagnies aériennes et de 40 forces armées dans le monde, et mentionnait de nombreux partenaires industriels étrangers :

Agusta	**A109K2 et LUH, NH 90**
Bell	**Bell 427**
Boeing	**737, 747, 757, 767, 777**
Bombardier Aerospace	**Global ExpressOash 8-40,CRJ 700,Continental**
BAE System	**Nimrod**
Mapo Mig	**Mig AT, Mig 21**
Marshall Aerospace	**C130**
Sukhoi	**SU 30**
Westland	**EH 101**

Les exportations d'équipements aérospatiaux du groupe SAGEM

Le chiffre d'affaire du groupe en 1999 a été de 22,4 milliards de francs, dont 5 milliards pour la branche Défense, qui a fait état en 2000 de remarquables positions commerciales :

– leader européen de systèmes inertiels et optroniques ;
– leader mondial de la modernisation de systèmes avioniques, des commandes de vol d'hélicoptères, des optique spatiales ;
– plusieurs centaines d'avions, en service opérationnel, équipés de systèmes modulaires (Maestro) pouvant intégrer les fonctions de navigation inertielle, GPS, pilotage tête haute, calculateur de mission… ;
– livraison de plusieurs milliers de systèmes de navigation inertielle pour des applications aéronautiques, marines, terrestres ou spatiales, en particulier des séries Uliss et Sigma en service opérationnel dans plus d'une vingtaine de pays au monde.

1.3. La contribution du ministère de la Défense aux activités d'exportation des matériels militaires

Les contrôles et le service aux clients

Pour éclairer les instances politiques et assurer le bon déroulement ultérieur des exportations de matériels aérospatiaux militaires des représentants de l'état-major et des services techniques concernés sont mis à contribution pour avis sur les aspects opérationnels, techniques et industriels des dossiers, les conditions d'emploi, l'éventualité de prolifération et la potentialité d'une menace opérationnelle, la sensibilité technologique et la maturité des produits, leurs performances et la qualité de leur fabrication.

Ces analyses concernaient non seulement les avions et les hélicoptères militaires, leurs équipements de bord et les armements, mais encore les matériels à double usage possible, hélicoptères, propulseurs, avionique et composants sensibles exportés directement.

Les actions générales amont de promotion de l'industrie et de ses produits, l'appui technique donné aux présentations faites à des acheteurs, la préparation d'avis, l'étude de projets de contrats, des spécifications techniques, les analyses de prix, le contrôle de qualité promis

aux clients et réalisés pendant les fabrications en usine par le Service de la surveillance industrielle de l'armement et, si nécessaire, par des essais de réception en vol effectués par le Centre d'essais en vol, ont impliqué de nombreux ingénieurs et techniciens dans les directions et les services techniques.

Ces travaux se sont multipliés dans les dernières décennies avec l'évolution des organisations, la diversité, la complexité et la sensibilité des matériels, les points de vue divergeant quelquefois entre opérationnels et ingénieurs.

Les aides financières à l'exportation

Le secteur de l'aéronautique et de l'espace, à technologie de pointe et fort potentiel d'exportation comme quelques rares autres secteurs en France, ne pouvait se passer du soutien financier de l'État. Les exportations d'équipements aérospatiaux ont pu en bénéficier, comme d'autres branches du secteur.

Le soutien financier a pris diverses formes, dont la plus importante pour l'industrie au point de vue du volume financier, de la réduction des risques et de l'adaptation au besoin présumé, était celle des contrats que les Services techniques et de la production passaient aux sociétés d'équipements aérospatiaux et d'électronique de défense pour l'étude et la réalisation des prototypes et des moyens spécifiques de production de matériels destinés en France aux forces aériennes.

Cette aide à l'industrie par l'intermédiaire des contrats de l'État constituait une forme indirecte d'assistance à l'exportation. Une forme encore plus indirecte mais également importante reposait sur la possibilité accordée aux industriels d'introduire dans ces contrats une marge, à un taux fixé par le ministère de la Défense, pour le financement partiel des études dites "libres" conduites par les industriels pour leur propre compte.

Un mode d'aide beaucoup plus direct consistait à prendre en charge une partie des coûts de développement de matériels spécifiquement destinés à l'exportation ou d'adaptation d'équipements existants à des besoins d'exportation. Cette aide financière intervenait dans le cadre d'une procédure dite de l'article 90 – d'une certaine loi de finances – sous forme d'avances remboursables de manière échelonnée en fonction des ventes. Ces avances étaient en moyenne de l'ordre 60 % du coût des travaux.

Le volume de ces aides a décru sensiblement avec les restrictions budgétaires qui ont induit entre 1988 et 1998 une baisse de près d'un tiers, en francs constants, du chiffre d'affaires consolidé réalisé par le secteur aérospatial avec l'État.

1.4. La balance commerciale

Les excédents globaux aérospatiaux

Les exportations totales réalisées annuellement par l'ensemble des constructeurs aérospatiaux ont connu, en francs constants, sur la période 1978-1998 des évolutions très contrastées. Elles se sont accrues rapidement jusqu'en 1983, ont marqué un palier jusqu'en 1992 puis ont baissé de façon importante pendant les trois années suivantes. Les trois dernières années de la période ont connu un renversement complet et une très vive remontée. Elles ont atteint un montant de plus de 100 milliards de francs en 1998, qui représentait 76 % du chiffre d'affaires consolidé. Le pourcentage était de 55 % en 1978.

Les importations des constructeurs sont passées sur la même période de 2 à près de 20 milliards de francs.

L'excédent global dégagé par les constructeurs est passé entre les deux dates d'environ 30 à 75 milliards de francs 1995. Il a ainsi été multiplié par 2,5.

La contribution totale du secteur des équipements à la création de cet excédent n'apparaît pas dans les données disponibles.

Seuls sont identifiables les montants annuels d'exportations directes, la part qu'elles occupent dans le chiffre d'affaires de la branche équipements et dans le total des exportations du secteur aérospatial.

Pour l'année 1998, le montant des exportations directes d'équipements a été chiffré à 11,7 milliards de francs, correspondant à plus de 30 % du chiffre d'affaires de la branche et à 11,6 % seulement des exportations totales du secteur aérospatial.

2. LA COOPÉRATION INTERNATIONALE

2.1. Les différentes formes de coopération

La coopération internationale n'a cessé de se développer en France depuis les années soixante dans le secteur aérospatial. Elle concerne la très grande majorité des programmes civiles aéronautiques ou spatiaux. Elle s'est manifestée également dans les programmes militaires d'avions, d'hélicoptères, de missiles et de satellites, à l'exception très notable, cependant, des grands programmes d'avions de combat et des missiles balistiques. Elle concerne donc une part importante de l'activité des équipementiers.

La coopération internationale qui régit ces programmes est européenne, avec un degré particulièrement élevé d'implication des gouvernements concernés et une forte association des industriels de premier niveau dans la maîtrise d'œuvre de chaque grand programme.

La coopération internationale a pris dans le passé d'autres formes beaucoup plus restreintes et particulières, selon la nature des relations industrielles et le degré d'implication des États. Dans son ouvrage "La nouvelle géographie de l'industrie aéronautique" (Édition l'Harmattan, 1996), P. Beckouche propose, basée sur ces critères, une classification en quatre catégories qui modélise bien les différents scénarios et degrés de coopération.

Les compensations industrielles, apportées aux acheteurs étrangers en contrepartie de leurs acquisitions. Ces compensations peuvent concerner d'autres secteurs que l'aéronautique ou porter directement sur une contrepartie aéronautique. Des obligations de compensations industrielles se sont imposées fréquemment à l'industrie française, voire quelques fois aux services étatiques, pour l'obtention de contrats d'exportations importants, à partir des années quatre-vingt. Dans l'autre sens, en qualité d'acheteur, l'État français s'est efforcé d'obtenir le maximum de compensations pour des importations importantes effectuées en période de sous emploi.

La coopération commerciale impliquant un constructeur désireux de pénétrer sur un marché national et un industriel local, qui assure dans un premier temps la représentation commerciale et le service après-vente et se crée quant à lui une ouverture éventuelle de production locale sous licence. Tel fut souvent dans le passé le détour emprunté par des équipementiers et motoristes, dans les années cinquante et soixante.

La coopération industrielle dans laquelle le maître d'œuvre et ses coopérants industriels sont associés pour l'ensemble d'un programme avec divers degrés possibles de partage des risques et le plus souvent une place réduite à des interventions des États, s'il ne s'agit pas d'opérations très importantes et stratégiques comme l' alliance à long terme des deux motoristes General Electric et Snecma sur les moteurs CFM 56.

La coopération de maîtrise d'œuvre, qui caractérise tous les grands programmes internationaux civils ou militaires et implique très fortement les États dans de multiples aspects de la direction de ces programmes, au moins au point de vue technique et financier. Ce type de coopération internationale impose un degré élevé de partage des risques, d'une part, entre les industriels maîtres d'œuvre et, d'autre part, entre les États coopérants, authentiques maîtres d'ouvrage des programmes militaires ou investisseurs particulièrement importants dans le développement des programmes civils.

2.2. L'organisation étatique et industrielle pour la conduite des programmes en coopération internationale

Le principe de juste partage des droits et des devoirs a conduit, le plus souvent, les industriels coopérants à adopter une organisation très intégrée de direction et de gestion des programmes plutôt que déléguée à l'un d'eux, considéré alors comme chef de file industriel et contractuel. Le type d'organisation par délégation est évidemment plus léger, plus souple et réactif, plus proche de l'organisation de direction des programmes nationaux. Il fut généralement adopté pour les programmes internationaux dans lesquels la présence d'un leader industriel et commercial était incontestable : Nord-Aviation pour le programme Transall, Dassault Aviation pour l'Alphajet, Sud-Aviation pour les hélicoptères Puma et Gazelle, Westland pour les hélicoptères Lynx.

En l'absence de chef de file contractuel, la coordination des coopérants industriels fut effectuée de manière collégiale ou le plus souvent par un consortium industriel et commercial spécialement créé pour chaque programme, soit sous forme de groupement d'intérêt économique, soit sous forme de société : GIE Airbus, ATR ou Euromissile, sociétés SECBAT et SEPECAT pour les programmes Atlantic et Jaguar, NHI pour le programme quadripartite de l'hélicoptère NH 90.

Dans le programme Concorde, la coordination de type collégiale fut effectuée par Sud-Aviation et British Aircraft Corporation pour la cellule et la maîtrise d'œuvre d'ensemble, par Snecma et Bristol Siddeley pour les moteurs Olympus, par chaque couple franco-britannique de sociétés choisies pour assurer le développement des principaux systèmes et équipements importants.

Préalablement au lancement de tout programme militaire en coopération internationale, il était établi un accord intergouvernemental (Memorandum of Understanding), soumis à l'approbation des ministres de la Défense concernés et formulant les objectifs du programme, les prévisions de besoins des forces armées de chaque pays participant, les règles de partage des coûts et du travail dans les principales phases de développement, industrialisation et production du programme, les caractéristiques de l'organisation étatique et industrielle.

L'organisation étatique spécifique de chaque programme comportait à son plus haut degré un comité directeur responsable de la conduite générale de l'opération, dans le respect des dispositions des accords intergouvernementaux. Le comité directeur réunissait un représentant de haut niveau de chaque État coopérant, assisté par quelques autres représentants nationaux en tant que de besoin.

Cet organisme avait, en général, une présidence tournante, un droit de vote unique et strictement égalitaire pour chaque chef de délégation nationale, un mode de prise de décision à l'unanimité, qui ne manquait pas d'entraîner pour les questions les plus importantes industrielles et financières des atermoiements, blocages, négociations en coulisse, avec recours éventuels aux autorités supérieures nationales des ministères concernés.

Au niveau exécutif, l'organisation étatique adoptée pour la gestion et le suivi des programmes fut, le plus souvent, à l'image de celle de l'industrie. Lorsque les industriels coopérants confiaient la coordination d'ensemble à un seul maître d'œuvre, l'organisation étatique s'en trouvait naturellement confiée, en priorité, au service officiel de même nationalité, qui accueillait un Bureau de gestion du programme et disposait de la capacité de passer les contrats. Dans le cas du programme NH 90 de maîtrise d'œuvre intégrée, il fut établi une agence internationale, sous statut d'agence OTAN, dotée de la personnalité juridique lui permettant d'exercer des responsabilités contractuelles complètes. Ces organes exécutifs centraux s'appuyaient sur un réseau d'experts nationaux et de groupes de travail internationaux en correspondance avec les organisations de l'industrie.

L'organisation de programme en coopération internationale, parfois très lourde pour certains programmes militaires, s'assouplit considérablement pour l'opération Airbus lancée en mai 1969, et par la suite pour celle de l'ATR lancée en novembre 1981. L'Airbus bénéficia des enseignements tirés des coopérations antérieures, de la nécessité de tenir compte du caractère très concurrentiel du marché de l'aviation civile et des limitations et contraintes des aides financières étatiques, par avances remboursables. Il fut alors reconnu la nécessité d'une maîtrise d'œuvre complète impliquant responsabilité et autorité totale sur l'ensemble de l'opération de la conception technique à la production et aux ventes.

Cette libéralisation, ou déplacement d'autorité et de responsabilité, se répercuta sur les principaux fournisseurs des avionneurs, sur les motoristes et davantage encore sur les équipementiers qui, dans le contexte concurrentiel mondial, ne pouvaient plus guère espérer bénéficier d'une tutelle protectrice. Fort heureusement leur maturité technique, le renforcement de leurs capacités industrielles et commerciales permirent aux équipementiers français de se placer semble-t-il très honorablement dans les compétitions ouvertes par les avionneurs et les compagnies aériennes. Ces résultats commerciaux pourront être précisées en évoquant les relations de coopération avec différents pays.

2.3. Les relations franco-américaines

La politique des États-Unis et de la France et leur poids économique et militaire respectif n'ont pas permis depuis l'après-guerre d'instaurer des coopérations importantes dans le domaine aéronautique.

La forme de coopération sans aucun doute préférée du côté américain est une coopération purement commerciale dans laquelle le gouvernement autorise ou appuie de toute son

influence, voire de son aide financière, des exportations de matériels, à des degrés de sophistication en rapport avec la sûreté des pays acheteurs.

Après la guerre, comme on l'a déjà écrit, le gouvernement français bénéficia de cette assistance financière pour se constituer un premier parc d'hélicoptères et d'avions de combat à réaction et pour la production de Mystère IV A.

Une compétitivité retrouvée permettait alors au Mirage III de se présenter face au F 104 américain pour l'équipement des armées de l'air européennes à la fin des années cinquante, mais sans succès.

En 1974-1975, une nouvelle compétition opposant le Mirage F1 E au F 16 tourna également à l'avantage de ce dernier.

À la fin des années cinquante et au début des années soixante s'établirent quelques coopérations commerciales et industrielles dans le domaine des équipements aéronautiques.

La société SFIM entreprit des études et réalisations de pilotes automatiques pour avions et hélicoptères en basant ses travaux sur une licence de la société Sperry, dont elle avait aussi acquis une licence d'horizon gyroscopique.

Les premiers équipements issus de ces travaux furent retenus pour le Transall et l'Atlantic et les développements ultérieurs, fortement soutenus par le Service technique aéronautique, permirent à la SFIM de s'assurer un grand succès pour les pilotes automatiques d'hélicoptères.

On a déjà évoqué la collaboration qui fut établie dans le domaine du guidage inertiel entre la société Kearfott située dans le New Jersey et la SAGEM, coopération fructueuse en matière d'échanges techniques, concrétisée par un large accord de licence et certains achats de matériels.

À l'époque du développement de Caravelle par Sud-Aviation, quelques accords industriels ont été contractés. Citons, en particulier, un accord entre Hispano-Suiza, fournisseur du train d'atterrissage de Caravelle, avec la société Cleveland Pneumatic pour la maintenance de cet équipement aux États-Unis.

La plupart des équipements du programme Concorde ont été fournis par des fabricants français ou britanniques. Le développement de certains grands systèmes fut confié, sous l'autorité d'un des deux avionneurs, à des couples de sociétés franco-britanniques.

Le programme Concorde suscita quelques coopérations industrielles très ponctuelles avec des équipementiers américains dont la signature était considérée par les avionneurs comme une garantie de valeur technique et commerciale. Ces coopérations permettaient une acquisition plus rapide et moins coûteuse de technologies et de savoir-faire. Tel fut le cas, par exemple, de la coopération entre Bendix et Crouzet pour la réalisation des centrales aérodynamiques destinées aux avions prototypes, et de la même société Bendix avec le couple franco-britannique de SFENA et Elliot qui fournirent le système très complexe de pilotage automatique.

Pour l'équipement des avions "série", les deux centrales aérodynamiques par avion furent d'origine Crouzet, à partir de capteurs modulaires développés sur contrat STAé, qui présentaient un réel avantage, tant pour la performance que pour la maintenance.

Les sociétés SAGEM et Ferranti furent choisies pour l'étude et la réalisation de centrales de navigation inertielle et de leur calculateur numérique associé constituant le système SF 500/AE51. À la fin de 1966, ce type d'équipement fit l'objet pour l'aviation civile et à l'ini-

tiative très active des États-Unis d'une normalisation internationale (norme Arinc 561) parfaitement adaptée aux systèmes américains et qui leur ouvrit rapidement tout le marché du monde libre. Ce fut le cas, en particulier, pour les systèmes LTN 51 de la société Litton, avec le marché des avions de la compagnie Air France (Boeing 707, Concorde...) et, pour les systèmes Carrousel de la société AC Electronics, filiale de General Motors, avec le marché des Boeing 747.

Huit ans plus tard, entrait en service le premier Airbus A 300. Pour ce programme et pour tous les modèles suivants constitutifs de la famille Airbus, de nombreux équipements ont été conçus et fabriqués par des industriels français, allemands, britanniques travaillant ensemble.

Cette coopération européenne n'a cependant pas éliminé toute coopération industrielle entre Airbus et des sociétés américaines fournisseurs d'équipements et d'avionique de bord. Les noms les plus souvent trouvés mentionnés dans les listes d'équipements des différentes versions d'Airbus sont Air Research, Allied Signal, Collins, Honeywell.

Pour l'Airbus A 320, la société Honeywell fut appelée à coopérer avec la société SFENA pour le développement d'un système de guidage et de gestion du vol (FMGC).

On ne peut enfin omettre de rappeler, bien qu'extrêmement épisodique dans le déroulement des relations avec les États-Unis, quelque activité ou tentative de coopération internationale, au plein sens du terme, en matière de système ou d'équipement important.

On ne peut pas, par exemple, passer sous silence un programme tel que le GPS, qui connut un succès dépassant toute imagination. Dans la pratique, les États-Unis s'en assurèrent entièrement la direction et la conduite, sous l'égide de l'OTAN, et ménagèrent quelques places dans l'équipe de programme à des représentants de pays alliés coopérants financièrement au programme.

Il vient également à l'esprit la coopération internationale lancée à la fin des années quatre-vingt pour le développement d'un équipement d'avionique numérique de distribution d'informations MIDS, destiné aux futurs avions de combat. Ce programme réunissait des représentants des services officiels et de l'industrie d'électronique de défense des États-Unis et de différents pays alliés européens coopérants, dont la France. Un bureau de programme international a été installé à Washington ainsi que le consortium industriel chargé du développement.

L'avenir sera-t-il porteur de nouvelles tentatives substantielles de coopération transatlantique ? Le domaine des études amont et développements exploratoires paraît moins sensible pour ce qui concerne la concurrence industrielle et commerciale.

2.4. La coopération européenne

Les relations franco-britanniques

La coopération franco-britannique a connu une période très favorable dans les années soixante.

Après les développements conjoints de l'avion Concorde et du missile Martel, la France et le Royaume-Uni s'étaient engagés à réaliser dorénavant en commun leurs avions militaires.

L'accord du 17 mai 1965 a ainsi donné naissance au Jaguar et à la coopération coordonnée sur les trois hélicoptères Puma, Gazelle et Lynx. Il prévoyait également le lancement d'un

avion multimissions, à géométrie variable. Mais cette opération s'est heurtée à de nombreuses difficultés et la France s'est retirée du projet dès 1967. Le Royaume-Uni s'est alors retourné vers l'Allemagne et l'Italie, leur proposant de construire, à trois, l'avion de combat qui deviendra le Tornado.

Depuis cette époque, quelques tentatives de rapprochement coopératif ont été effectuées ; elles ne furent pas toutes infructueuses, mais aucun programme majeur ne put voir le jour, notamment sur les avions de combat.

À la fin des années quatre-vingt, il fut tenté de réactiver l'accord franco-britannique sur les hélicoptères, particulièrement fécond par les nombreuses exportations civiles et militaires qu'il avait entraînées et fort bénéfique pour les industries des deux pays. Cette tentative sombra presque immédiatement dans un oubli indifférent. Elle avait été entreprise sans grande conviction, compte tenu des engagements déjà pris par ailleurs dans ce domaine, par la France sur le Tigre et le NH 90, et par la Grande-Bretagne qui était engagée avec l'Italie et Agusta sur le EH 101 et l'A 129, concurrent du Tigre. De plus, les services britanniques n'excluaient pas l'éventualité d'un achat sur étagère de l'hélicoptère de combat américain Apache, en parfait accord avec la politique nationale hautement proclamée de value for money.

Cette proclamation de politique d'approvisionnement trouvait des échos favorables au sud du Channel, et la proposition d'institution d'une procédure d'achats croisé d'équipements fut assez facilement acceptée par la DGA. Cette opération concernait les équipements dans tous les secteurs des armements classiques terrestres, navals, aériens et préfigurait pour les équipements n'excédant pas une valeur très élevée et pour deux pays un marché européen de l'armement libre-échangiste. Cette opération fut lancée en 1986-1988 avec une forte mobilisation des services et de l'industrie des deux pays. Elle connut de bien piètres résultats pratiques et sombra après quelques années, ayant entraîné dans l'intervalle des réclamations sur des choix jugés inéquitables et un travail important d'élaboration de règles et procédures, de publication périodiques sur les besoins des services d'approvisionnement, d'actions de suivi et de relances périodiques sans effet. Il ne semblait pas qu'on ait trouvé, dans cette opération, l'approche idéale vers l'Europe de l'armement.

D'autres initiatives communes ont connu une bien meilleure issue.

Au début des années quatre-vingt, la Grande-Bretagne puis la France entamaient des négociations aux États-Unis pour l'achat d'avions AWACS de détection lointaine. La communauté d'intérêt des deux parties dans cette affaire très importante incita fortement chaque partie à coopérer, efficacement et de manière informelle, pour la négociation de chacun des deux contrats. La concertation fréquente entre acheteurs et la coordination de leurs actions dans la négociation avec Boeing furent extrêmement utiles et permirent d'obtenir des conditions de ventes particulièrement satisfaisantes.

La fin des années quatre-vingt a connu une certaine embellie du climat dans la coopération franco-britannique.

En l'absence de toute perspective relativement proche de développement d'un nouvel avion de combat en Europe, les services officiels français et britanniques ont considéré qu'il serait certainement très utile de coopérer en recherche et technologie sur des études et développements exploratoires d'équipements essentiels pour la préparation de l'avenir, comme le moteur et le radar, quelles que soient les options nationales ou internationales qui seraient choisies dans le futur. Deux programmes d'études communes et de réalisations

probatoires furent élaborés, baptisés Amet et Asar. Ils associaient Rolls Royce et Snecma pour le moteur, GEC Marconi et Thomson-CSF pour le radar et furent lancés au début des années quatre-vingt-dix. Peu de temps après, le gouvernement allemand et DASA étaient associés aux études sur le radar.

La coopération franco-allemande et la coopération multinationale

La coopération franco-allemande sur des équipements a débuté très ponctuellement avec l'arrivée en France dans l'immédiat après-guerre de quelques ingénieurs et techniciens allemands. La SFIM, puis surtout la SAGEM, bénéficièrent de cet apport technique. La SFENA en bénéficia également pour les premiers pilotes automatiques qui équipèrent les Breguet Deux-Ponts puis les Noratlas, dont la RFA assura, sous licence Nord-Aviation, une partie de la production.

Les premiers programmes de coopération internationale impliquant la France et la RFA, le programme multinational Breguet-Atlantic, les programmes franco-allemand de l'avion Transall et du missile air-sol AS 33 participèrent au retour de l'Allemagne fédérale dans le concert aéronautique international.

Les maîtres d'œuvre français, Breguet et Nord-Aviation, assuraient avec le Service technique de l'aéronautique le pilotage de ces programmes. Ils proposèrent selon les possibilités des choix d'équipements sous maîtrise d'œuvre française avec sous-traitance allemande.

Pour le programme expérimental AS 33, Nord-Aviation fit développer le premier système de guidage inertiel pour engin tactique, en double source chez SAGEM et SFENA pour l'ensemble des composants inertiels, par CSF en coopération avec Bodenseewerk pour le calculateur de guidage. Le développement de ce missile fut arrêté avant son aboutissement complet, mais son équipement de guidage inertiel fut repris et complété par un équipement de guidage terminal pour la production de nombreux engins air-mer et mer-mer (Exocet, Kormoran).

La coopération entre Nord-Aviation et MBB a été très active à travers le GIE Euromissile, dans le domaine des anti-chars Milan et Hot et dans celui des systèmes sol-air mobiles Roland.

La coopération franco-allemande se renforça en s'équilibrant toujours davantage avec les programmes binationaux de l'Alphajet et de l'hélicoptère de combat Tigre, ainsi que dans les programmes de coopération européenne multinationale dans lesquels le couple franco-allemand exerce des responsabilités étatiques et industrielles majeures, à savoir l'hélicoptère de transport et de lutte anti-sous-marine NH 90 et les programmes successifs de développement de toute la famille des avions Airbus.

Toutes ces opérations communes ont suscité dans le domaine des équipements et de l'avionique des rapprochements transnationaux de circonstance ou des alliances beaucoup plus durables. Les plus importantes furent sans aucun doute la création à la fin des années cinquante de la société Eurocopter et de la société EADS à la fin du siècle.

Pour les équipementiers français et allemands, il vient immédiatement à l'esprit la coopération industrielle entre Messier et Liebehr, instituée dès le programme Transall pour la fourniture de trains d'atterrissage et entre SFENA, puis Sextant, avec BGT pour l'avionique de bord.

La coopération internationale a pris dans la dernière décennie une part très importante dans les activités et les revenus des sociétés du secteur aérospatial dans leur ensemble. Selon les résultats de l'enquête du GIFAS pour 1998, 63 % des exportations ont été effectuées en

coopération internationale. La faiblesse du pourcentage (10 %) attribué, dans cette étude, au groupe des équipementiers peut s'expliquer comme une conséquence des exportations civiles des avions Airbus et des moteurs CFM 56.

3. LES RELATIONS INTERNATIONALES EN MATIÈRE SPATIALE

L'effort spatial français, dès le début, peut difficilement être considéré en dehors de son contexte international. La France, troisième puissance spatiale mondiale dès 1965, a pris à cœur cette nécessité de dépasser ses frontières, d'abord en Europe, puis au plan mondial. Déjà très présente dans les instances internationales où ces questions étaient abordées (par exemple, les comités spécialisés de l'ONU, l'UIT, le COSPAR, etc.), elle en a vite observé les limites et elle s'est énergiquement investie dans deux voies principales, concrètes et pratiques :

- l'association avec des partenaires de même niveau ou d'affinités voisines, en l'occurrence des partenaires européens, pour entreprendre ensemble des programmes ambitieux de développement spatial ;
- la coopération avec les deux premières grandes puissances spatiales, afin de bénéficier de leur avance technique et d'utiliser des moyens qui lui manquaient.

3.1. L'association européenne

Sur ce plan, notre action a consisté principalement en la participation à des entreprises communes au sein d'organisations intergouvernementale, essentiellement des deux organisations spatiales européennes dont les conventions ont été signées en 1962 et ratifiées en 1964 : l'Organisation européenne de recherches spatiales ou CERS/ESRO et l'Organisation européenne pour la mise au point et la construction de lanceurs d'engins spatiaux ou CECLES/ELDO.

Le CERS/ESRO

Son but était de favoriser un vaste effort de coopération entre les scientifiques européens, en mettant à leur disposition les moyens indispensables : véhicules, équipements, bases de lancement, centres de dépouillement. Le CERS/ESRO a permis un brassage des idées et la réalisation d'opérations exigeant des crédits qui dépassaient les possibilités d'un seul État. Dix nations ont signé et ratifié la convention de l'organisation dont le caractère européen est souligné par la dispersion de ses centres : siège à Paris, centre d'opérations à Darmstadt en Allemagne fédérale, centre de recherche et de technologie aux Pays-Bas, près de La Haye, base de lancements à Kiruna en Suède et institut de recherche en Italie, près de Frascati.

Le programme était, au départ, défini dans un plan dit "de huit ans", s'étendant jusqu'en 1971. Il prévoyait le lancement de quelques dizaines de fusées-sondes par an, la réalisation et le lancement, en 1968, à l'aide de fusées américaines des satellites ESRO 1, ESRO 2, et HEOS (une première mise en orbite du satellite ESRO 2 a échoué en 1967 à la suite d'un incident technique sur le lanceur), ainsi que la réalisation et le lancement, en fin de plan, des satellites TD 1 et TD 2.

Le budget annuel de l'organisation était de l'ordre de 250 millions de francs, la participation française en représentant le cinquième.

Le CECLES/ELDO

Né d'une initiative britannique, son programme initial prévoyait la construction, autour de l'étage Blue Streak, d'un lanceur capable de placer une tonne en orbite basse, avec un second étage français et un troisième étage allemand. Les six États-membres de l'organisation ont bâti, pour ce faire, un programme s'étendant, lui aussi, jusqu'en 1971 afin de réaliser un lanceur qui était amélioré par rapport au programme initial grâce à l'adjonction d'un étage supplémentaire et qui devait pouvoir placer, en orbite géostationnaire, un satellite de 170 kg dans une première version, puis de l'ordre de 350 kg.

L'effort financier de la France (25 %) correspondait à un montant d'environ 100 à 120 millions de francs par an en régime établi, c'est-à-dire pour les années 1967, 1968, 1969.

La création de l'Agence spatiale européenne

Dès le début, l'ESRO et l'ELDO rencontrèrent de nombreuses difficultés, d'une part parce qu'elles se lançaient dans des activités ardues et nouvelles et, d'autre part, parce que ces activités se sont déroulées dans un cadre lui aussi très nouveau car international et multilatéral.

Ces difficultés se manifestèrent sous la forme de retards et d'augmentations de coût dans les programmes et aussi, à plusieurs reprises, par des crises ouvertes, au cours desquelles un ou plusieurs partenaires allèrent jusqu'à remettre en cause non seulement les programmes mais encore l'existence même des organisations. Ces difficultés ont marqué ces organisations d'une certaine inefficacité. Ceci est dû, en partie et sans conteste, à l'insuffisance du pouvoir que les États participants déléguaient aux organismes exécutifs, c'est-à-dire aux secrétariats permanents des organisations. Un tel fait est particulièrement patent dans le cas de l'ELDO où, pour le premier programme, les États se sont trouvés seuls juges et seuls responsables des travaux qui leur avaient été attribués *a priori*. Mais cette inefficacité eut également pour cause l'incapacité pour les secrétariats de programmer et de contrôler de façon sérieuse les travaux dont ils avaient la charge.

Dans le cas du CERS, on est ainsi arrivé à une situation paradoxale où, à la suite de sous-estimations financières initiales, le programme opérationnel de fusées-sondes et de satellites a dû être réduit et retardé au bénéfice de la mise en place des moyens en infrastructure et en personnel, moyens qui apparurent ensuite surabondants.

Des premières mesures furent prises : le CECLES/ELDO reçut le pouvoir de faire travailler directement les firmes industrielles et de coordonner leurs activités. Le CERS/ESRO vit sa direction complètement réorganisée.

Mais c'est en 1973 que, la crise de l'Europe spatiale ayant atteint son paroxysme, fut enfin prise la bonne décision qui était de créer une véritable Agence spatiale européenne (ASE ou ESA) qui a conduit et continue de conduire, sous sa totale maîtrise et sa propre responsabilité, les programmes spatiaux en coopération européenne.

Les satellites de télécommunication

Dans le domaine des télécommunications également, le contexte européen joue, pour la France, un rôle considérable. L'initiative, dans ce domaine, vint des États-Unis. Ils disposaient en 1964 d'une avance technique indéniable, principalement grâce aux expériences menées avec les satellites TELSTAR, RELAY, SYNCOM qui avaient suscité la création d'une association, provisoire jusqu'en 1969, chargée de la mise en place d'un système international de satellites de télécommunications et à laquelle les Européens allaient participer : INTELSAT.

Dans ce domaine, les implications de tout ordre étaient si importantes que les Européens devaient s'associer et coordonner leur action. Ceci fut réalisé dès 1963, à l'initiative de la France, lors de la création de la Conférence européenne des télécommunications par satellites (CETS), regroupant une vingtaine de pays d'Europe.

Deux objectifs, tendant à faire de l'Europe un véritable partenaire au plan mondial, compétent et expérimenté, ont été définis et plus ou moins bien suivis :

- l'Europe devait réaliser et lancer elle-même des satellites de télécommunication. Une seule action européenne fut menée : le satellite franco-allemand Symphonie, décidé en 1967, mais lancé par les Américains après la déconfiture de l'ELDO ;
- l'Europe devait assurer elle-même l'exploitation de satellites de télécommunication. C'est ainsi qu'est née EUTELSAT, sur le modèle d'INTELSAT, à la fin des années soixante-dix.

Il a fallu attendre les années quatre-vingt pour que ces deux objectifs deviennent réalité, sous l'impulsion de l'ESA et grâce au dynamisme de l'industrie, avec le programme Ariane et le lancement, par la fusée européenne, des premiers satellites de télécommunication européens pour EUTELSAT (ECS 1, le 16 juin 1983) et pour France Télécom (TELECOM 1A, le 4 août 1984).

3.2. La coopération avec les grandes puissances spatiales

Coopération avec les États-Unis

Historiquement, la coopération avec les États-Unis est la plus importante, puisque c'est elle qui a conduit au lancement, par une fusée SCOUT, du premier satellite scientifique français FR 1, le 6 décembre 1965. Ce programme FR 1, qui a permis à nos équipes de se former aux États-Unis et à nos industries d'avoir des contacts fructueux avec les firmes d'outre-Atlantique, a joué un rôle important dans le démarrage de la recherche spatiale en France.

Coopération franco-soviétique

L'accord général de coopération franco-soviétique pour l'étude et l'utilisation de l'espace à des fins pacifiques, signé en juin 1966, prévoyait de placer en orbite des satellites scientifiques français au moyen de fusés soviétiques. Comme les accords avec la NASA, il correspondait à un important besoin scientifique.

Nota : la coopération avec les deux grands ne s'est pas limitée aux lancements de satellites, puisque des expériences françaises ont été montées à bord de satellites américains et que la conduite d'opérations semblables avec les Soviétiques est devenue systématique par la suite. Mentionnons aussi les grands programmes en coopération (TOPEX-POSEIDON avec les Américains sur l'observation des océans, les vols habités avec les Américains et les Russes…).

3.3. Conclusion

Si on ajoute aux grandes actions citées ci-dessus toutes les autres activités de coopération et les relations internationales telles que celles concernant l'implantation de stations de contrôle et de réception de télémesure partout dans le monde ou celles concernant la mise à disposition de nos moyens spatiaux aux autres pays (site de lancement de Kourou, fusées-

sondes, ballons, formation d'ingénieurs, transfert de technologies, etc.), il apparaît clairement que la France, dès 1959 et pendant au moins deux décennies, a développé un énorme effort en matière de coopération spatiale, effort qui a porté ses fruits pendant plus de vingt ans. À partir de 1980, avec l'accélération de "l'espace utile", ce fut à l'Europe de prendre le relais de cet effort, ce qui est une autre histoire… (voir, en particulier, l'effort européen rappelé dans l'annexe B 5 "Histoire des équipements spatiaux", notamment aux paragraphes 4 et 5).

Gérard BONNEVALLE
pour la coopération et le commerce international dans le domaine aérospatial
Charles BIGOT
pour la coopération spatiale

ANNEXE B 2

STATISTIQUES SUR LES SOCIÉTÉS DU SECTEUR AÉROSPATIAL

Les sociétés du secteur aérospatial français ont connu depuis la fin de la Deuxième Guerre mondiale, dans un partenariat fructueux avec les services publics tuteurs, les investisseurs et les clients, un développement remarquable de leurs capacités, de la diversité de leur production aéronautique et spatiale, militaire et civile, de leur présence internationale par la coopération européenne et un niveau d'exportation particulièrement élevé.

Des enquêtes annuelles sont effectuées par le GIFAS auprès de ses adhérents pour donner une mesure objective des moyens, capacités et performances du secteur. Les résultats en sont publiés dans les rapports annuels établis par ce groupement. Ils ont constitué la source essentielle de l'étude statistique qui suit.

Plusieurs modifications sont intervenues au cours de la période considérée (1956 à 1999) ; elles ont concerné le champ de l'enquête et la définition des branches.

• En 1983, les statistiques de la branche équipements ont pu prendre en compte les données concernant l'activité aérospatiale de certaines sociétés d'électronique adhérentes du SPER.

• En 1987, une modification est intervenue pour tenir compte des changements de contour juridique de certaines sociétés.

• En 1997, le GIFAS a remplacé la branche cellules-engins (initialement cellules) par celle de systémiers, constituée de la branche cellules-engins et de certains équipementiers majeurs concepteurs et réalisateurs de systèmes, tels Thomson-CSF et Alcatel.

• Enfin, en 1999, sont intervenues certaines modifications de périmètre qui ont constitué un élément relativement important d'augmentation de certaines données, notamment du chiffre d'affaires.

1. EVOLUTION DES EFFECTIFS DU SECTEUR

1.1. Les effectifs globaux et leur répartition par branche

À la fin des années cinquante, les effectifs globaux toutes branches confondues du secteur aéronautique étaient d'environ 80 000 personnes.

Un quart de siècle plus tard, ils avaient augmenté de plus de 60 %, atteignant un sommet historique à près de 128 000 personnes en 1984.

S'amorçait alors une baisse graduelle puis plus accentuée, avec un minimum à 95 000 personnes en 1997, puis une amorce de reprise avec le redémarrage de la croissance nationale et la consolidation des ventes des Airbus.

Sur la période 1956-1999, la moyenne des effectifs totaux s'établit à 104 000 personnes.

Sur la même période, la moyenne par branches a été la suivante :

cellules-engins	**56 000**
moteurs	**22 000**
équipements	**26 000**

Les effectifs de ces branches ont connu des évolutions assez analogues, si ce n'est pour l'incidence des changements de définition intervenues dans les enquêtes annuelles du GIFAS, qui ont concerné les équipements en 1983 avec un accroissement de plus de 12 000 personnes des effectifs pris en compte, et ont conduit en 1997 à transférer 4 400 personnes de l'effectif équipements à celui des grands systémiers.

Ayant accru ses effectifs de plus de un tiers entre 1956 et 1970, la branche cellules-engins a enregistré un palier autour de 60 000 personnes jusqu'à 1986, puis un repli important jusqu'à un minimum de 48 000 dix ans plus tard. En 1999, l'effectif des grands systémiers avait quelque peu remonté, à 54 000 personnes dont 4 400 par le transfert intervenu en 1997 d'effectifs de la branche équipements vers celle des grands systémiers.

Pour la branche équipements, les effets des changements de définition intervenus en 1983 et 1997 se sont en partie compensés ; les effectifs de 1999, évalués à 21 500 personnes, avaient dépassé 39 000 en 1983.

Les effectifs de la branche moteurs, lentement croissants depuis les années soixante, ont atteint près de 28 000 personnes en 1990 puis décru assez fortement dans la dernière décennie. Ils ont été de 21 100 personnes en 1999.

À la fin du siècle, motoristes et équipementiers se retrouvent au coude à coude pour ce qui concerne leurs effectifs, comme ils l'étaient déjà à la fin des années cinquante.

La planche 1.1 illustre ces constatations.

La planche 1.2 concerne également les effectifs du secteur. Elle présente la répartition par branches, exprimée en pourcentage des effectifs totaux.

Sur la période 1956-1999, les pourcentages moyens ont été les suivants :

cellules-engins/grands systémiers	**54 %**
moteurs	**21 %**
équipements	**25 %**

Les graphiques mettent en évidence une stabilité de ces pourcentages, mis à part l'incidence des modifications intervenues dans le champ de l'enquête et la définition des branches.

1.2. Les effectifs aérospatiaux par catégories professionnelles

Les rapports annuels du GIFAS rassemblent aussi des données sur la répartition des effectifs par catégories professionnelles : ingénieurs et cadres ; techniciens, dessinateurs, agents de maîtrise ; employés ; ouvriers.

Sur la période considérée, on constate des évolutions très contrastées dans ces différentes catégories.

En 1959, les ingénieurs et cadres aéronautiques ne représentaient que 5 % des effectifs totaux. Quarante ans plus tard, leur effectif était multiplié par sept, avec un total de 28 000 personnes, et correspondait à 30 % des effectifs totaux aérospatiaux.

Les effectifs des techniciens, dessinateurs et agents de maîtrise ont également beaucoup augmenté, pratiquement de manière continue jusqu'en 1984, avec un maximum à plus de 47 000 personnes, puis entamé une décroissance qui n'apparaît pas encore totalement achevée en 1999, avec un effectif ramené à 33 000 personnes, correspondant au tiers des effectifs totaux du secteur.

L'effectif total des employés, qui s'était accru sensiblement dans les années quatre-vingt, a diminué assez régulièrement dans la décennie suivante et ne représentait en 1999 que 11 % des effectifs du secteur.

En 1959, l'effectif des ouvriers était supérieur à 57 000 personnes et correspondait pratiquement aux trois quarts de l'effectif total du secteur. En 1999, il n'était plus que de 25 000 personnes et se réduisait au quart de l'effectif total.

Les planches 1.3 et 1.4 illustrent ces évolutions très remarquables et mettent bien en évidence l'accroissement de la technicité de la profession, le déclin important de l'effectif ouvriers et la réduction relativement limitée de celui des employés.

1.3. La répartition des effectifs aérospatiaux par types d'activités

La classification par types d'activités de l'enquête annuelle du GIFAS est la suivante :
- recherche et développement, faisant l'addition des effectifs d'études et de réalisation de prototypes ;
- production ;
- services généraux.

Pour la période 1967 à 1994, à laquelle on a matériellement limité le collationnement des données correspondantes d'enquête, l'effectif en recherche et développement a été en moyenne un peu inférieur à 30 % des effectifs totaux. Un peu plus de 50 % de l'effectif a été affecté à la production, et 20 % aux services généraux.

La planche 1.5 retrace l'évolution de ces pourcentages sur la période considérée.

On remarque l'assez grande stabilité des pourcentages relatifs à la production, un léger alourdissement des services généraux malgré une possible externalisation partielle de cette activité.

Selon les données de l'enquête, le pourcentage pour l'activité prototypes a beaucoup diminué au cours de la période considérée et la légère croissance des effectifs d'études n'a que très partiellement compensé cette baisse.

2. LE CHIFFRE D'AFFAIRES DU SECTEUR AÉROSPATIAL

Les rapports annuels du GIFAS fournissent pour l'ensemble du secteur et pour chaque branche de produits (cellules-engins/grands systémiers, moteurs, équipements) les agrégats suivants concernant le chiffre d'affaires :
- chiffres d'affaires global et consolidé ;
- répartition des chiffres d'affaires selon les différentes catégories de clients, à savoir l'État français, les exportations directes et les autres utilisateurs français (compagnies aériennes, aviation générale...), ainsi que les ventes entre constructeurs du secteur.

Ces agrégats chiffrés en millions de francs courants ont été exprimés, pour ce qui suit, en millions de francs constants 1995 en utilisant l'indice des prix du PIB.

Les planches 2.1 et 2.2 présentent l'évolution entre 1963 et 1999 des chiffres globaux et consolidés en MF constants 1995 pour l'ensemble du secteur et chacune des trois branches.

Sur la période considérée, le chiffre d'affaires global de l'ensemble du secteur est passé de près de 28 milliards à 152 milliards de francs 1995, soit une croissance moyenne de près de 5 % par an, malgré la très forte baisse d'activités et de revenus de 1993 à 1997.

Le chiffre d'affaires global du secteur a été en moyenne constitué à raison de 60 % par les ventes de la branche cellules-engins/grands systémiers et d'environ 20 % pour chacune des deux autres branches,

Pour l'ensemble du secteur et pour la branche cellules-engins/grands systémiers, on constate de fortes évolutions du chiffre d'affaires avec des hausses et des baisses importantes autour de la tendance moyenne de croissance. Pour les moteurs et les équipements, les évolutions ont été beaucoup plus "lissées", les avionneurs et les missiliers répercutant la partie sous-traitée de leurs contrats en des commandes échelonnées aux motoristes et équipementiers.

On peut, en outre, remarquer pour ce qui concerne les équipements que cette branche de l'industrie, par le renforcement de ses ventes directes, a pratiquement pu échapper, dans son ensemble, à la crise de 1993-1997.

L'écart entre le chiffre d'affaires global et le chiffre d'affaires consolidé correspond au chiffre d'affaires généré par les ventes entre les sociétés du secteur. Sur la période 1963-1999, ces ventes entre constructeurs ont constitué environ 17 % du chiffre d'affaires global du secteur. Pour la branche cellules-engins/grands systémiers, ces ventes ont représenté en moyenne 6 % de son chiffre d'affaires. Ce pourcentage moyen a été de 12 % pour la branche moteurs et a dépassé 50% pour la branche équipements. De 1963 à 1999, les ventes aux autres constructeurs ont apporté à la branche équipements un revenu annuel moyen de près de 10 MdF 1995.

Les planches 2.3 et 2.4 rapportent les chiffres d'affaires aux effectifs correspondants.

Le chiffre d'affaires global du secteur rapporté aux effectifs totaux est passé de 300 000 francs en 1963 à 1 570 000 francs en 1999. Il a été multiplié par plus de cinq, on a ainsi enregistré une augmentation moyenne proche de 5 % par an. Le chiffre consolidé du secteur a pratiquement suivi la même tendance.

Le chiffre d'affaires de la branche cellules-engins/grands systémiers correspond, hormis la fourniture de rechanges et de services, à des ventes d'appareils complets, qui intègrent pour leur fabrication de nombreux produits des deux autres branches (moteurs, organes, équipements, accessoires).

La fabrication des moteurs intègre également, à un moindre degré, des achats aux deux autres branches, notamment d' équipements.

La planche 2.4 est assez significative de cette situation qui n'était cependant pas applicable dans tous les cas. On peut évoquer, par exemple, les ventes d'avions militaires, tant nationales qu'à l'exportation, pour lesquelles les moteurs et certains équipements opérationnels majeurs ont souvent fait l'objet de contrats directs auprès des industriels concernés, ainsi que les programmes en coopération internationale pour lesquels la part de production confiée à un partenaire industriel est, de manière systématique, exclue du chiffre d'affaires du maître d'œuvre.

Jusqu'au début des années quatre-vingt-dix, les ventes de matériels militaires en France ou à l'exportation représentaient la plus forte part des ventes du secteur, de l'ordre de 70 % du total. Avec le développement de l'aéronautique civile, le succès remarquable des Airbus et des Falcon, le tassement des commandes militaires, la répartition des activités entre militaires et civiles n'a fait que se rééquilibrer au profit de ces dernières, à 50 %-50 % au début des années quatre-vingt et pratiquement inversée à 30 %-70 % à la fin des années quatre-vingt-dix.

Le chiffre d'affaires en recherche et développement s'est établi en moyenne, pendant la dernière décennie, à un niveau de 21 % du chiffre d'affaires consolidé pour l'ensemble du secteur, mais il n'a cessé de diminuer, passant de 24 % en 1991 à 15 % en 1999.

Le chiffre d'affaires avec les utilisateurs français autres que l'État ne représente qu'une faible part du chiffre d'affaires consolidé du secteur. Égal à 7 % en moyenne entre 1963 et 1999, le pourcentage s'est légèrement renforcé au cours de la dernière décennie.

3. LES CONTRATS DE L'ÉTAT FRANÇAIS

Les données collectées dans les rapports annuels du GIFAS sur le chiffre d'affaires réalisé avec l'État français ont été également limitées à la période 1963-1999.

Le chiffre d'affaires aérospatial avec l'État français a connu en francs constants une forte croissance jusqu'en 1967, atteignant près de 25 MdF 1995 et représentant alors 60 % du chiffre d'affaires consolidé du secteur.

Au cours des vingt-cinq années suivantes, le chiffre d'affaires État s'est accru sensiblement moins vite que le chiffre total consolidé dont il représentait moins de 40 % en 1991, bien qu'atteignant un sommet absolu de 40 MdF. Les années suivantes, le chiffre d'affaires État a très fortement décru, jusqu'à un plancher de 22 MdF en 1997, puis une légère reprise au-delà, autour de 20 % du chiffre d'affaires du secteur en 1998-1999.

Les planches 3.1 et 3.2 concernent le chiffre d'affaires État au niveau du secteur et pour les différentes branches, exprimés en MF constants et en pourcentages des chiffres d'affaires consolidés.

En moyenne, sur la période 1963-1999 la branche cellules-engins/grands systémiers a bénéficié de 62 % des crédits de l'État français attribués au secteur aérospatial, 22 % à la branche moteurs et 16 % à la branche équipements. En complément, cette dernière a pu bénéficier partiellement des crédits attribués aux avionneurs et motoristes par le jeu de sous commandes reçues de ces maîtres d'œuvre.

Sur la période 1963-1999, les chiffres d'affaires annuels moyens en MdF 1995 réalisés avec l'État français et leur part dans les chiffres d'affaires consolidés ont été les suivants pour le secteur et pour les trois branches :

secteur aérospatial	**26,6 MdF**	**36,3 %**
cellules	**16,2 MdF**	**33,8 %**
moteurs	**5,8 MdF**	**39,2 %**
équipements	**4,6 MdF**	**44,1 %**

4. LES EXPORTATIONS

Les données collectées dans les rapports annuels du GIFAS sur le chiffre d'affaires réalisé en exportation directes sont également relatives à la période 1963-1999.

Pour le secteur aérospatial dans son ensemble, le chiffre d'affaires généré par les exportations directes a connu une très forte croissance en francs constants 1995, passant de 10 MdF en 1964 à près de 100 MdF en 1999, et de 40 % du chiffre d'affaires consolidé à plus de 75 %.

Sur les trente-sept années considérées, le chiffre d'affaires annuel moyen à l'exportation a dépassé 40 MdF 1995 et constitué près des deux tiers du chiffre d'affaires total consolidé.

D'un montant annuel relativement stable autour de 60 MdF entre 1983 et 1992, les exportations ont connu une très forte chute dans les années suivantes et n'ont retrouvé un niveau très satisfaisant qu'en 1998.

Les planches 4.1 et 4.2 concernent les chiffres d'affaires exportations en MF constants et en pourcentages des chiffres consolidés.

Sur la période 1963-1999, les chiffres d'affaires annuels moyens procurés par les exportations directes et leurs pourcentages dans les chiffres consolidés ont été les suivants :

secteur aérospatial	**41,4 MdF**	**56,6 %**
cellules	**28,5 MdF**	**59,4 %**
moteurs	**8,0 MdF**	**54,2 %**
équipements	**4,9 MdF**	**47,4 %**

Le montant annuel des ventes réalisées par les équipementiers avec les deux autres branches du secteur a été de près de 10 MdF 1995 (cf. § 2). Les exportations réalisées par ces deux branches ayant en moyenne constitué 58 % de leur chiffre d'affaires consolidé, on peut estimer que les exportations indirectes d'équipements ont été annuellement de l'ordre de 6 MdF 1995, soit au moins du même ordre de grandeur que celui des exportations directes.

5. LA BALANCE COMMERCIALE AÉROSPATIALE

Les rapports du GIFAS présentent les soldes commerciaux successivement au niveau des constructeurs puis au niveau national, en tenant compte du solde des utilisateurs français (État et autres utilisateurs nationaux).

Au cours des trois dernières décennies, le solde des constructeurs a constamment été largement bénéficiaire, les importations effectuées par le secteur aérospatial n'ayant en moyenne représenté que 18 % des exportations. Le solde s'est fortement accru sur cette période. Exprimé en francs constants 1995, il a été de 9,6 milliards en 1970 et atteignait plus de 78 milliards en 1998, soit une multiplication par plus de huit.

Le solde des utilisateurs nationaux (État français, compagnies aériennes, aviation générale...) fut au contraire constamment négatif, le coût des importations d'appareils complets et de rechanges ne pouvant à l'évidence n'être que très partiellement compensé par des ventes de matériels d'occasion et de prestations diverses.

En moyenne, le solde des utilisateurs a été de -7,3 milliards, mais avec un facteur de croissance dans le temps beaucoup plus faible que celui du solde des constructeurs.

Au total, le solde annuel aéronautique et spatial national, solde constructeurs amputé du solde utilisateurs, n'en est pas moins resté largement excédentaire.

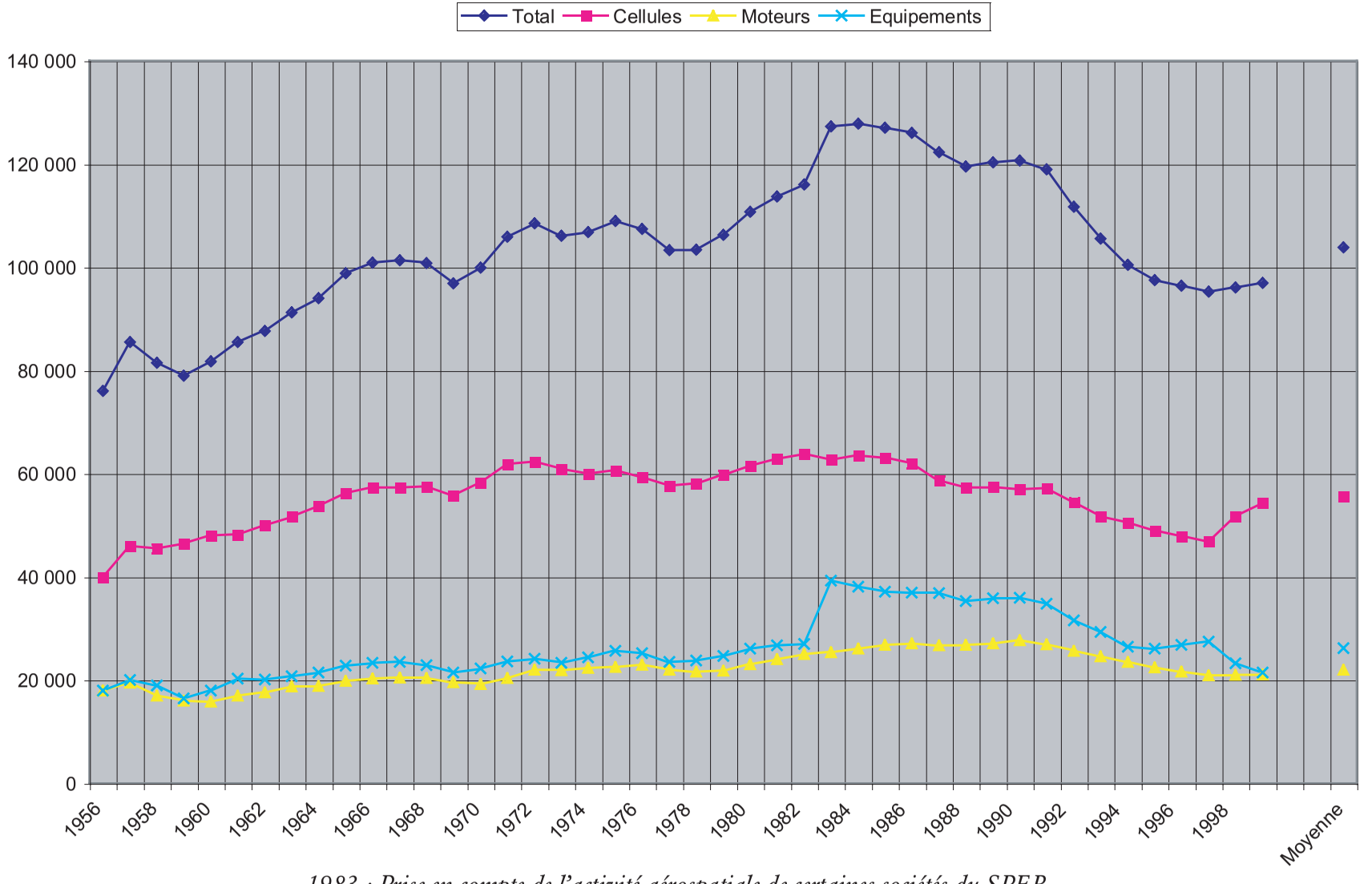
Depuis 1970, sa valeur en francs constants a plus que décuplé, atteignant 66 milliards de francs 1995 en 1998 et se situant sur la période à une moyenne de près de 31 milliards.

Cet excédent commercial a, en moyenne, dépassé la totalité du chiffre d'affaires enregistré par le secteur pour les contrats reçus de l'État, tant pour des travaux de recherche et développement que pour les commandes spécifiques d'industrialisation et de production.

Les planches 5.1 et 5.2 présentent pour l'ensemble du secteur les soldes commerciaux et leurs composants.

L'absence de données statistiques sur les importations par branches n'a pas permis de réaliser une analyse à ce niveau.

Planche 1.1. Effectifs Aérospatiaux. Répartition par Branches



1983 : Prise en compte de l'activité aérospatiale de certaines sociétés du SPER
1997 : La branche "Cellules-Engins" devient branche "Systémiers"

Planche 1.2. Effectifs Aérospatiaux. Pourcentages par Branches

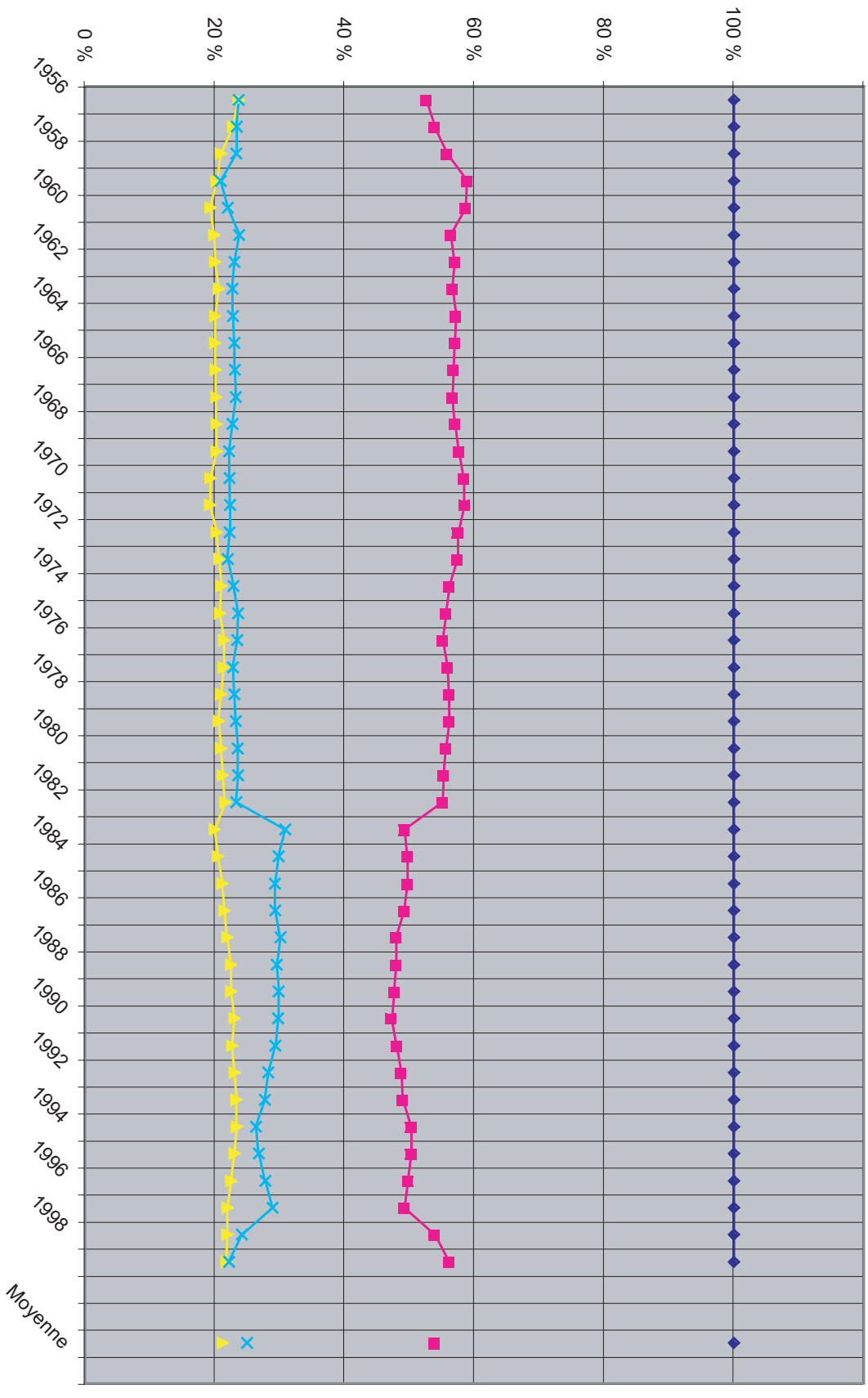


Planche 1.3. Effectifs par Catégories Professionnelles

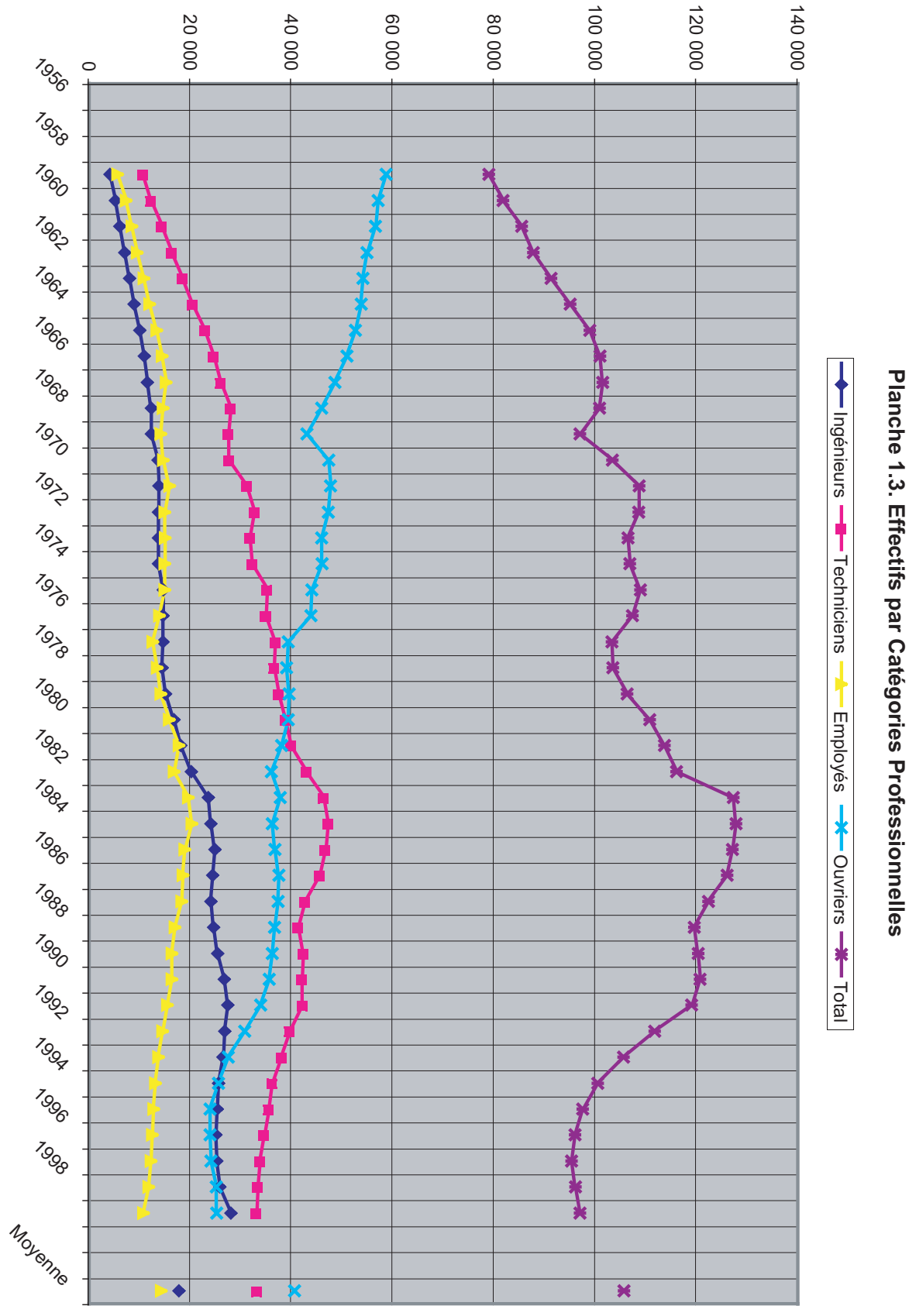
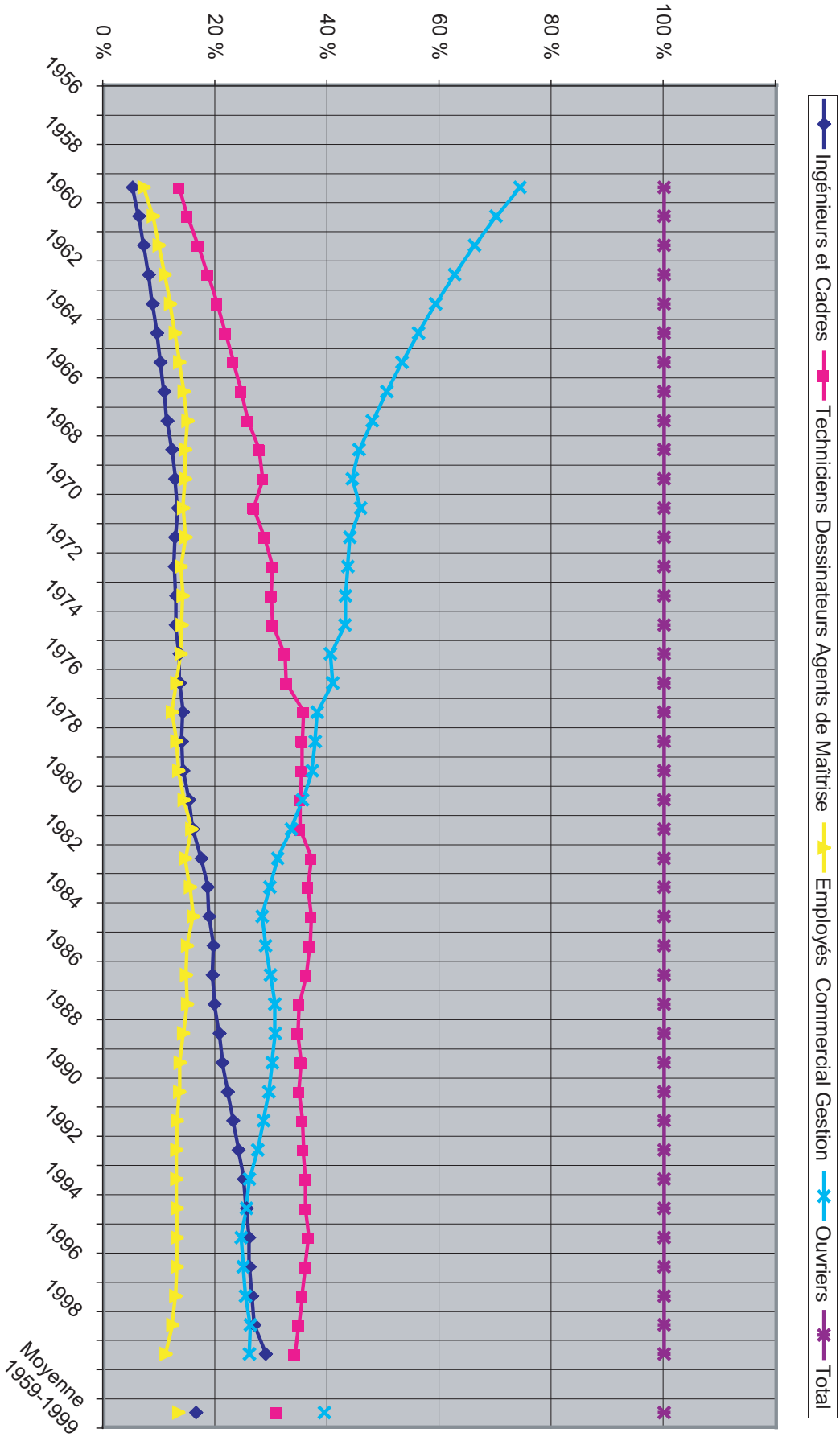


Planche 1.4. Effectifs Aérospatiaux. Pourcentages par Catégories Professionnelles



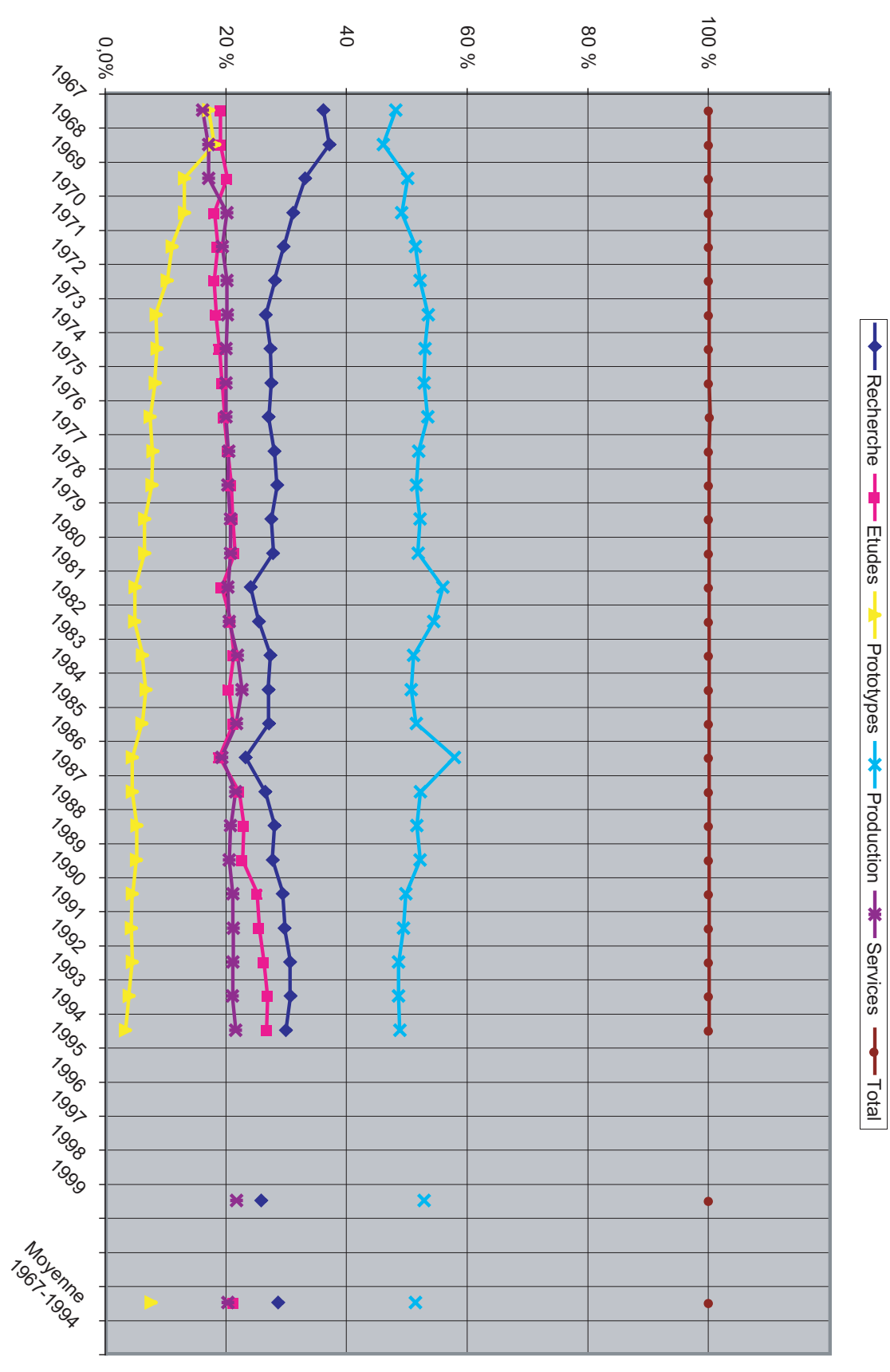


Planche 1.5. Effectifs par Activités

Planche 2.1. Chiffres d'affaires globaux pour le Secteur et par Branches

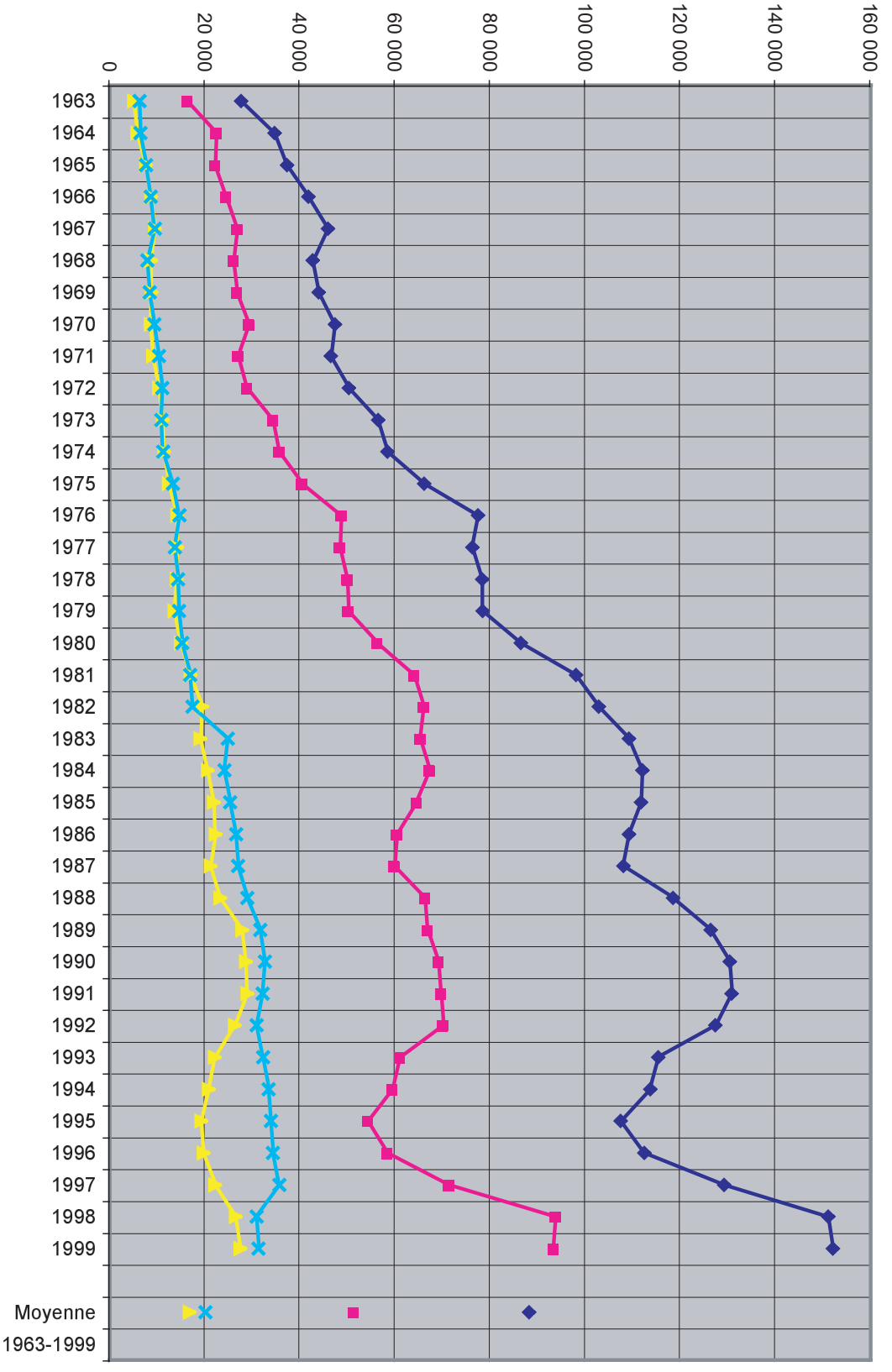


Planche 2.2. Chiffres d'affaires consolidés en MF constants 1995

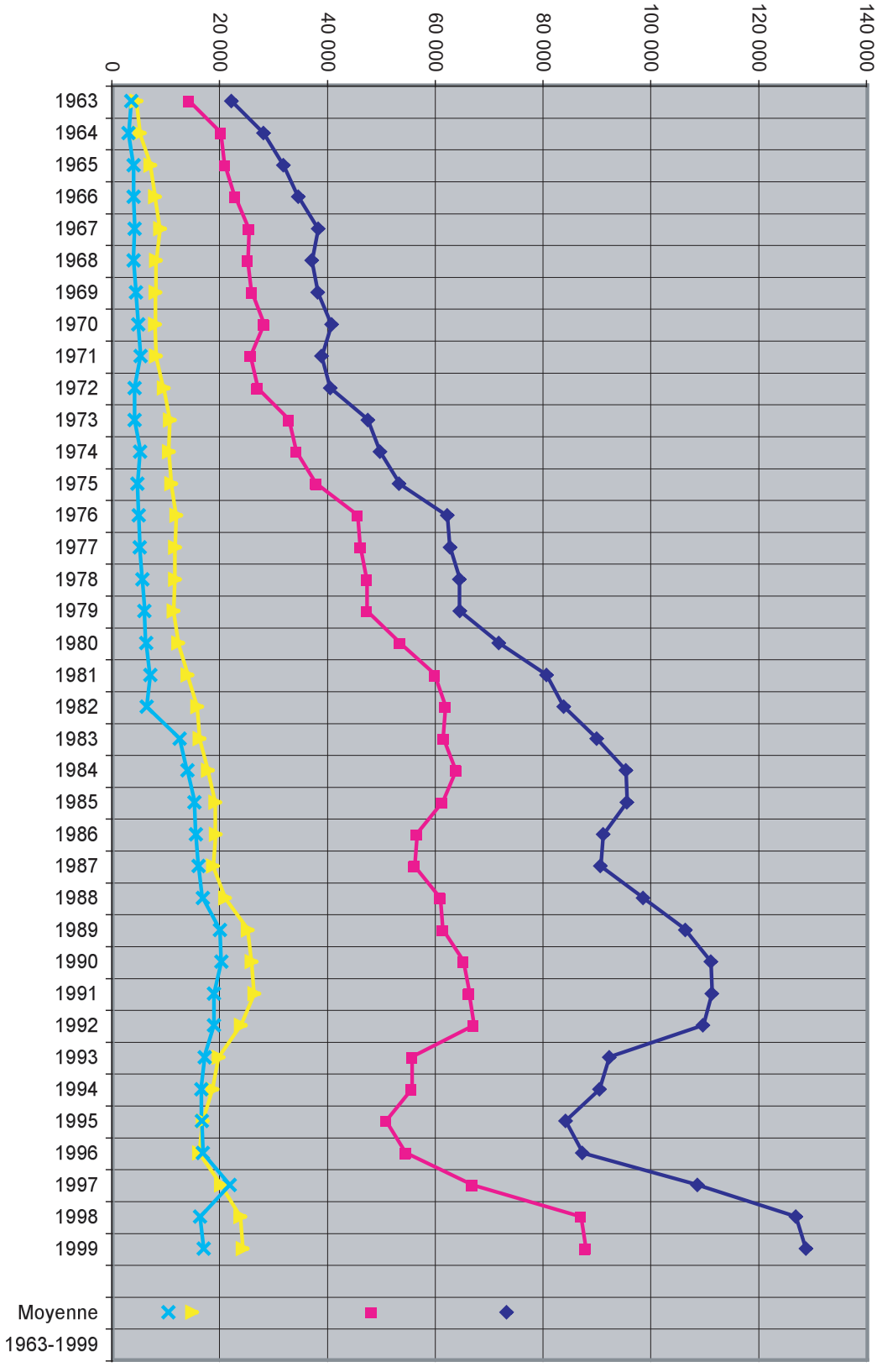
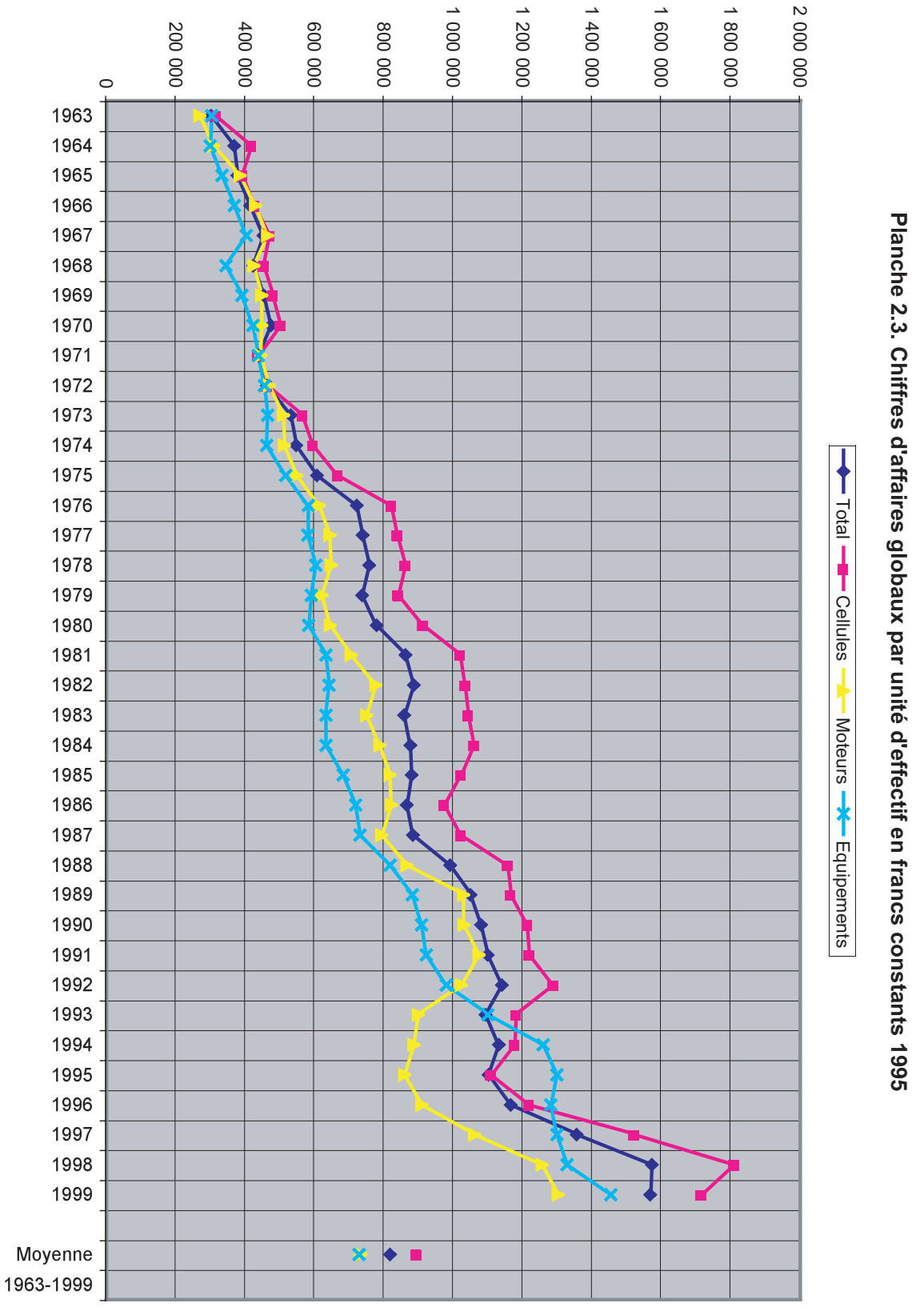


Planche 2.3. Chiffres d'affaires globaux par unité d'effectif en francs constants 1995



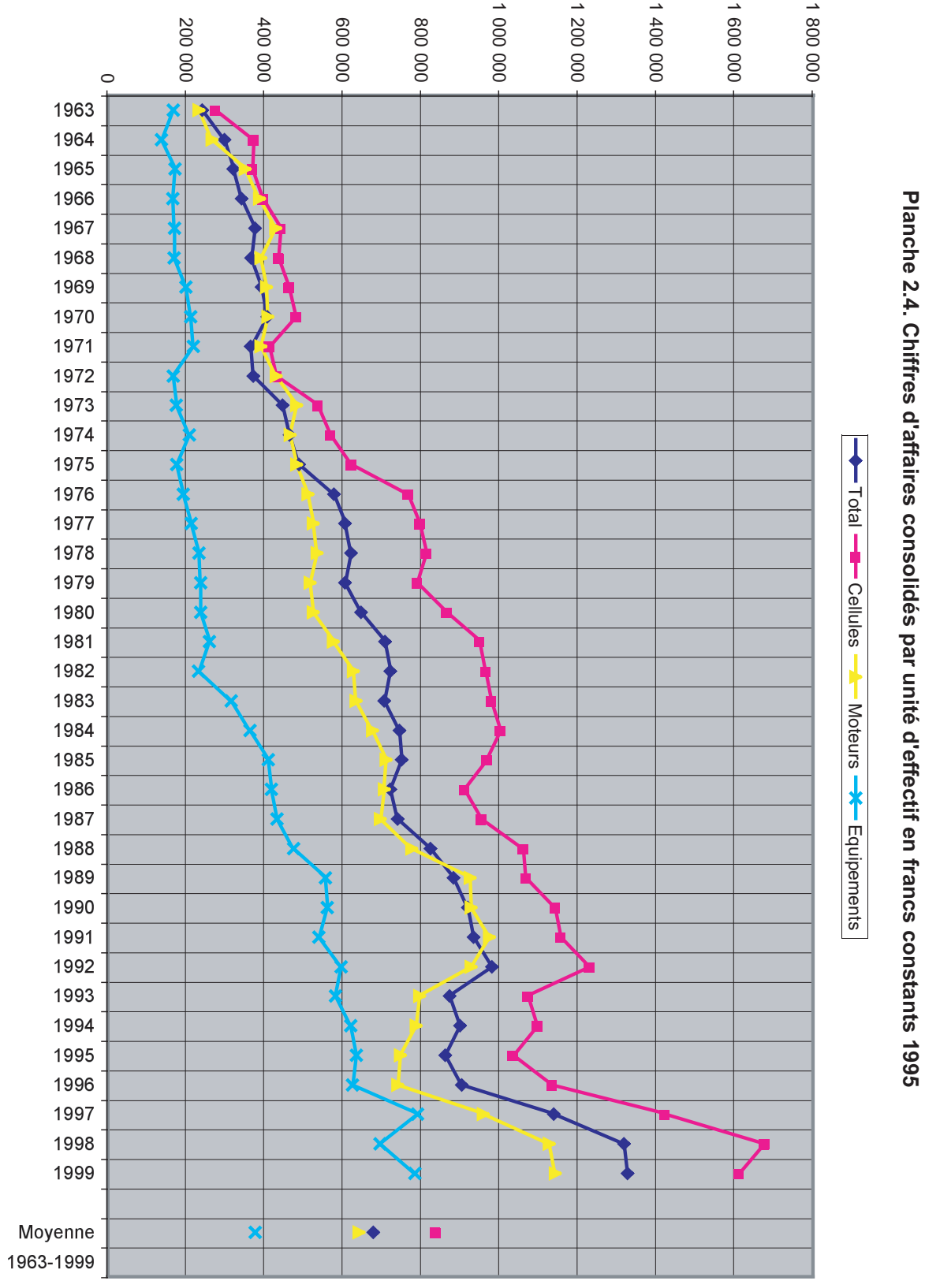


Planche 2.4. Chiffres d'affaires consolidés par unité d'effectif en francs constants 1995

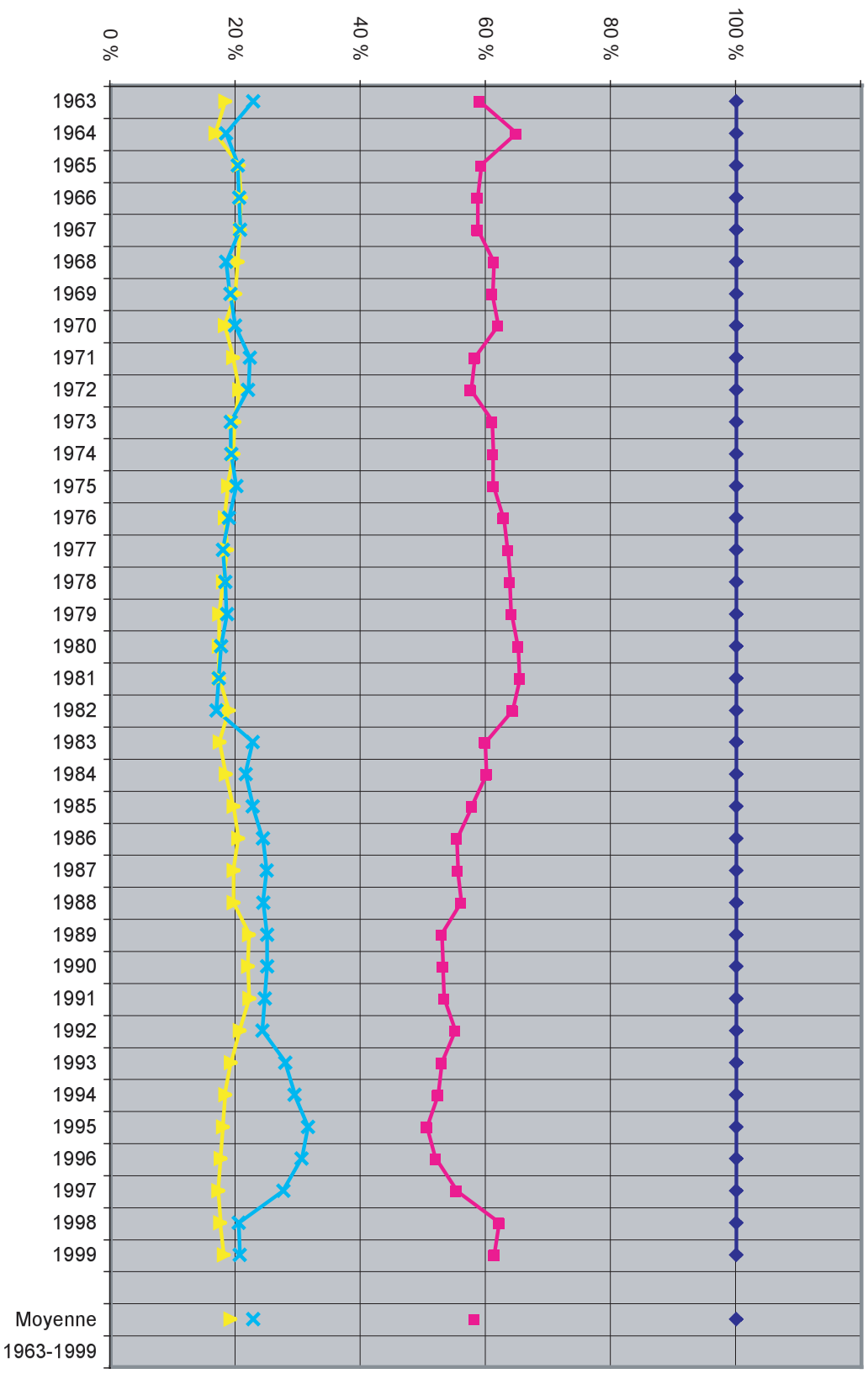


Planche 2.5. Répartition du chiffre d'affaires global par Branches

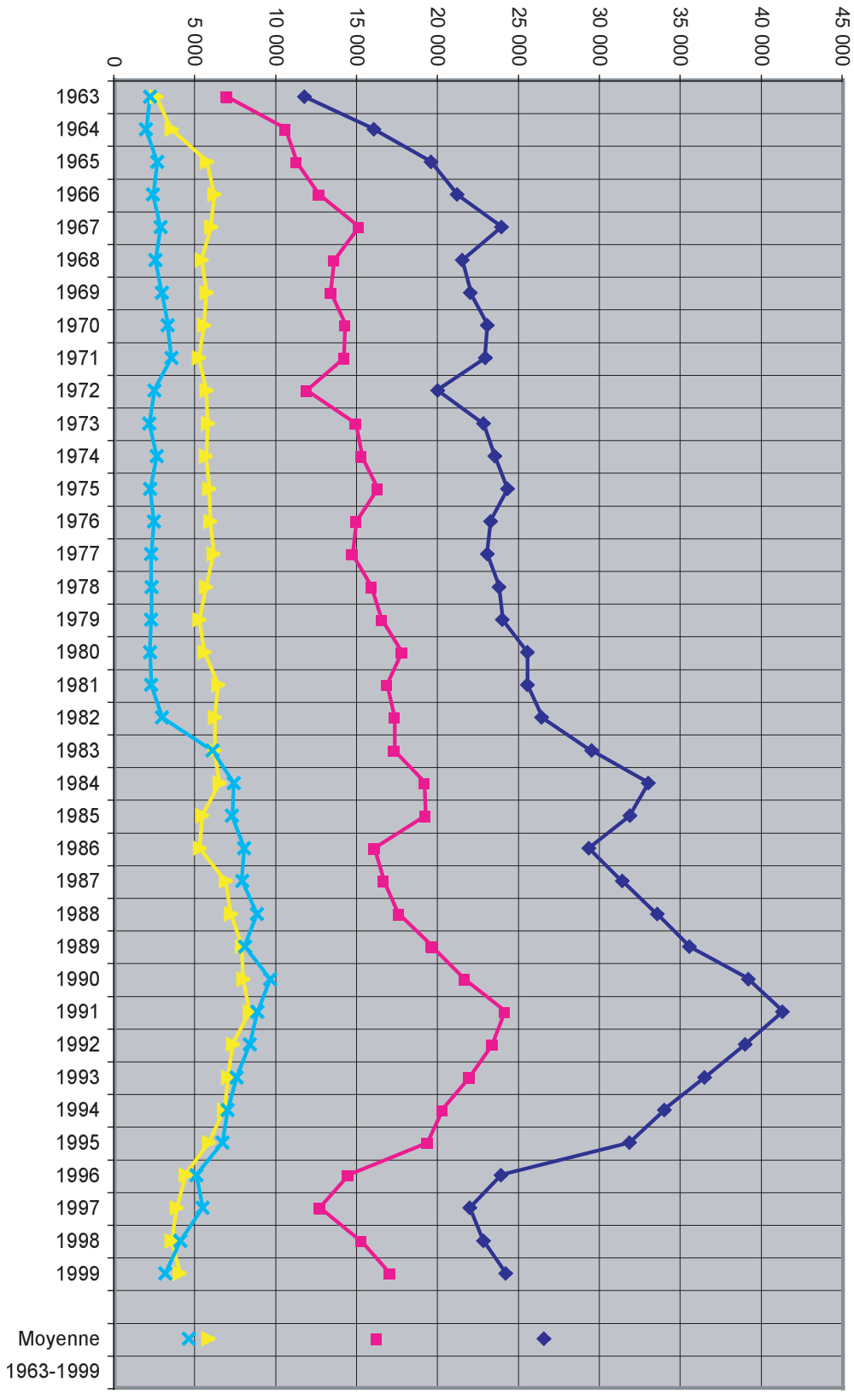
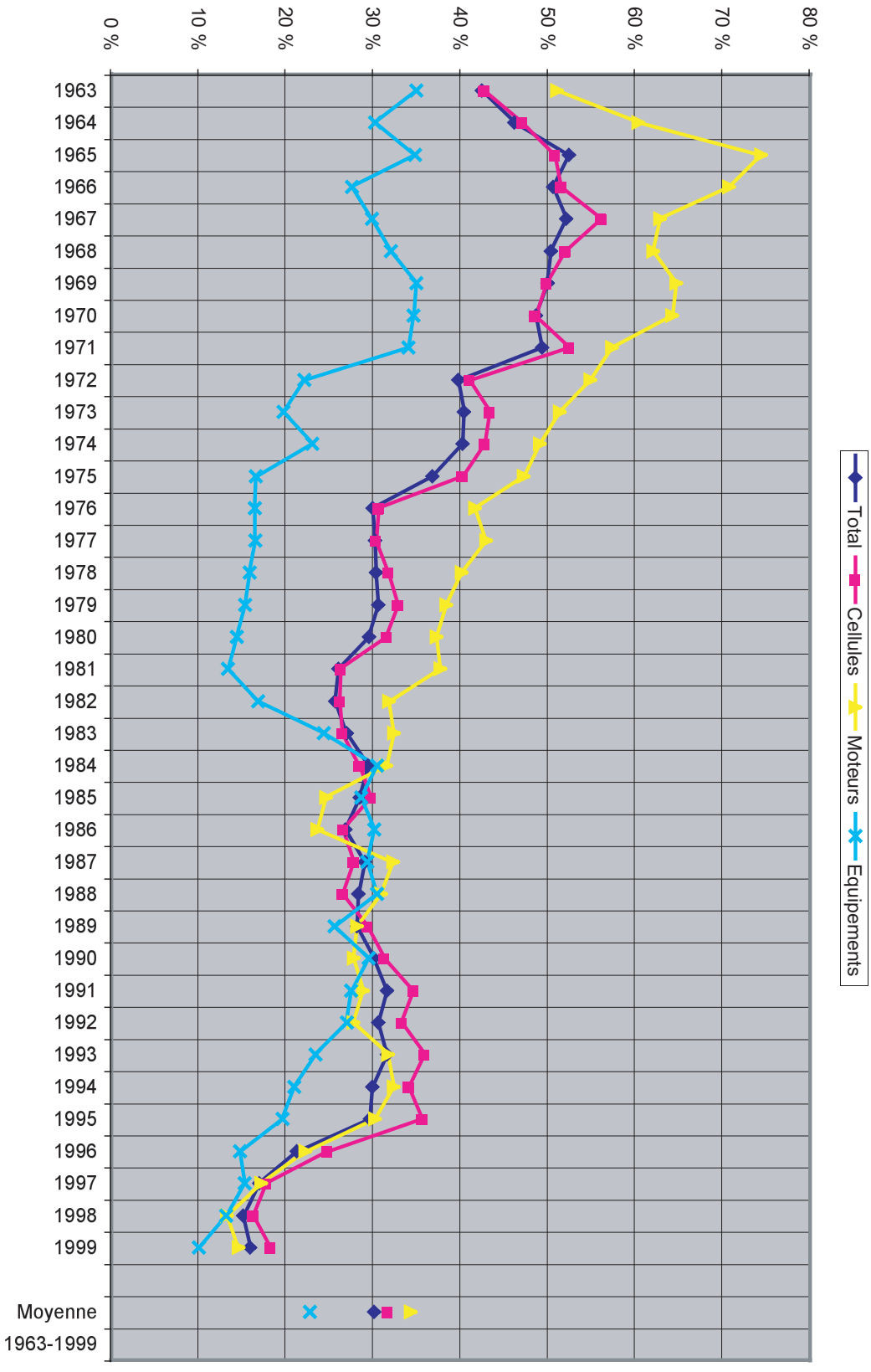


Planche 3.1. Chiffre d'affaires avec l'Etat français en MF 1995

Planche 3.2. Chiffres d'affaires avec l'Etat français en pourcentages des chiffres d'affaires globaux de chaque branche



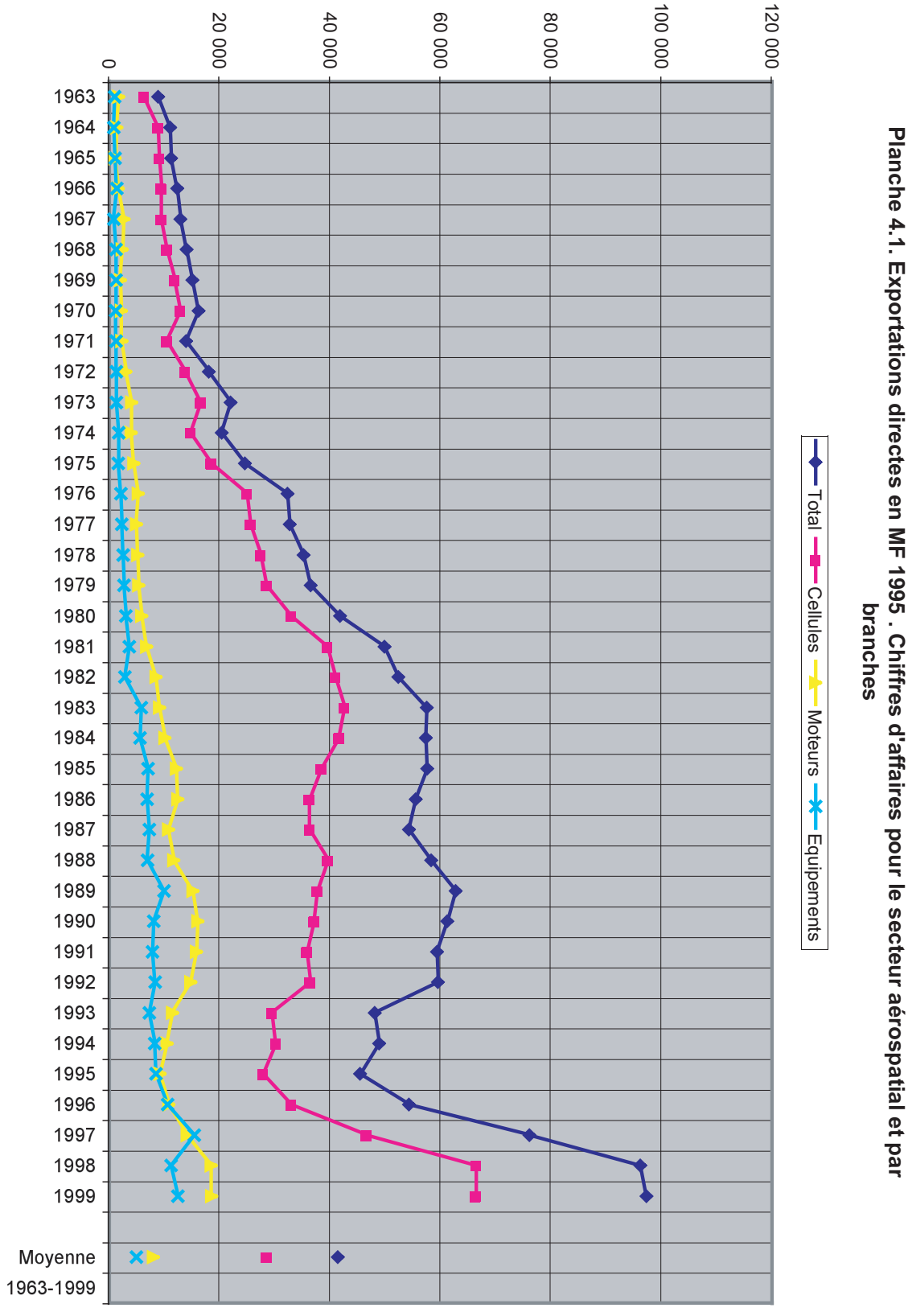


Planche 4.1. Exportations directes en MF 1995 . Chiffres d'affaires pour le secteur aérospatial et par branches

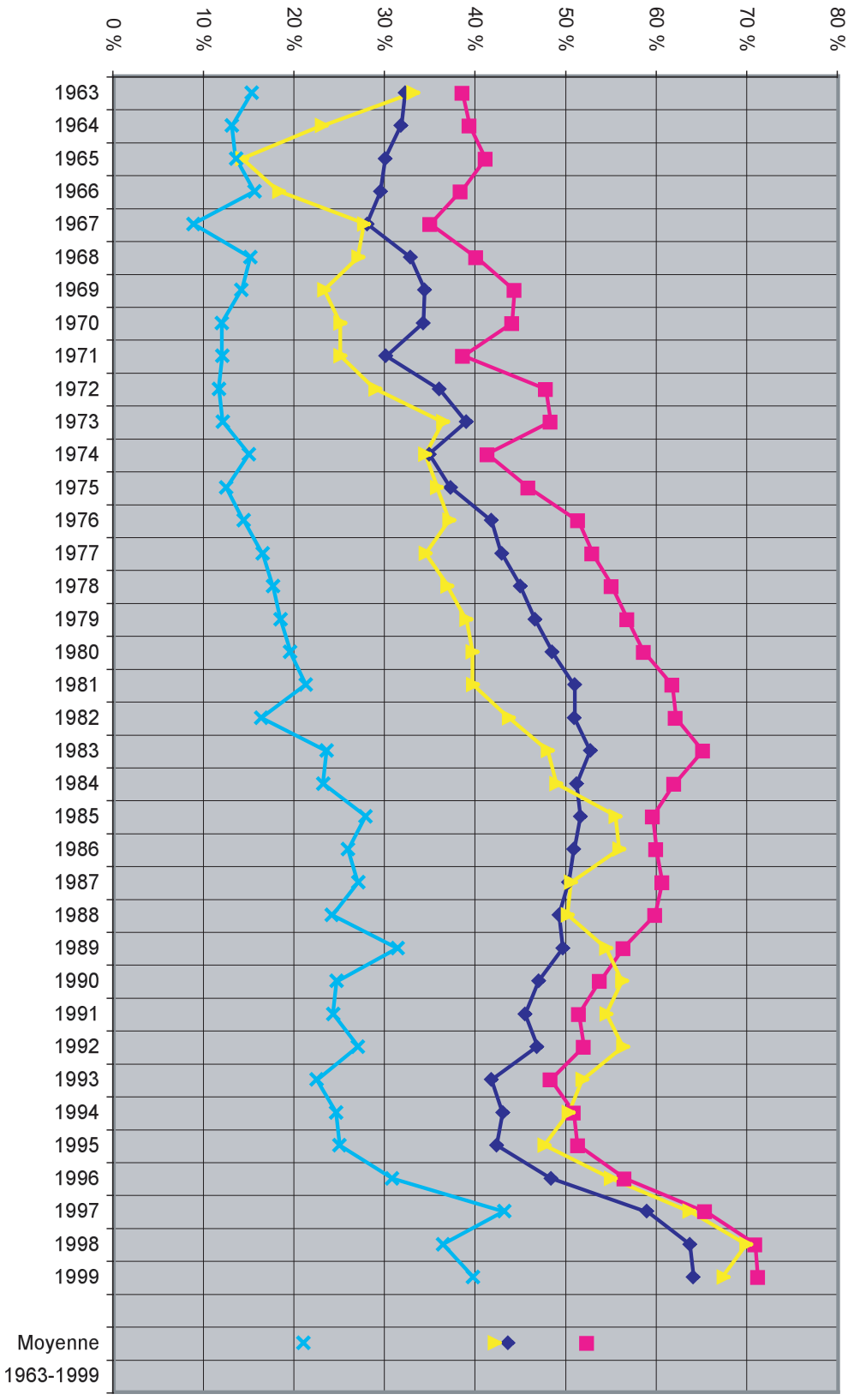
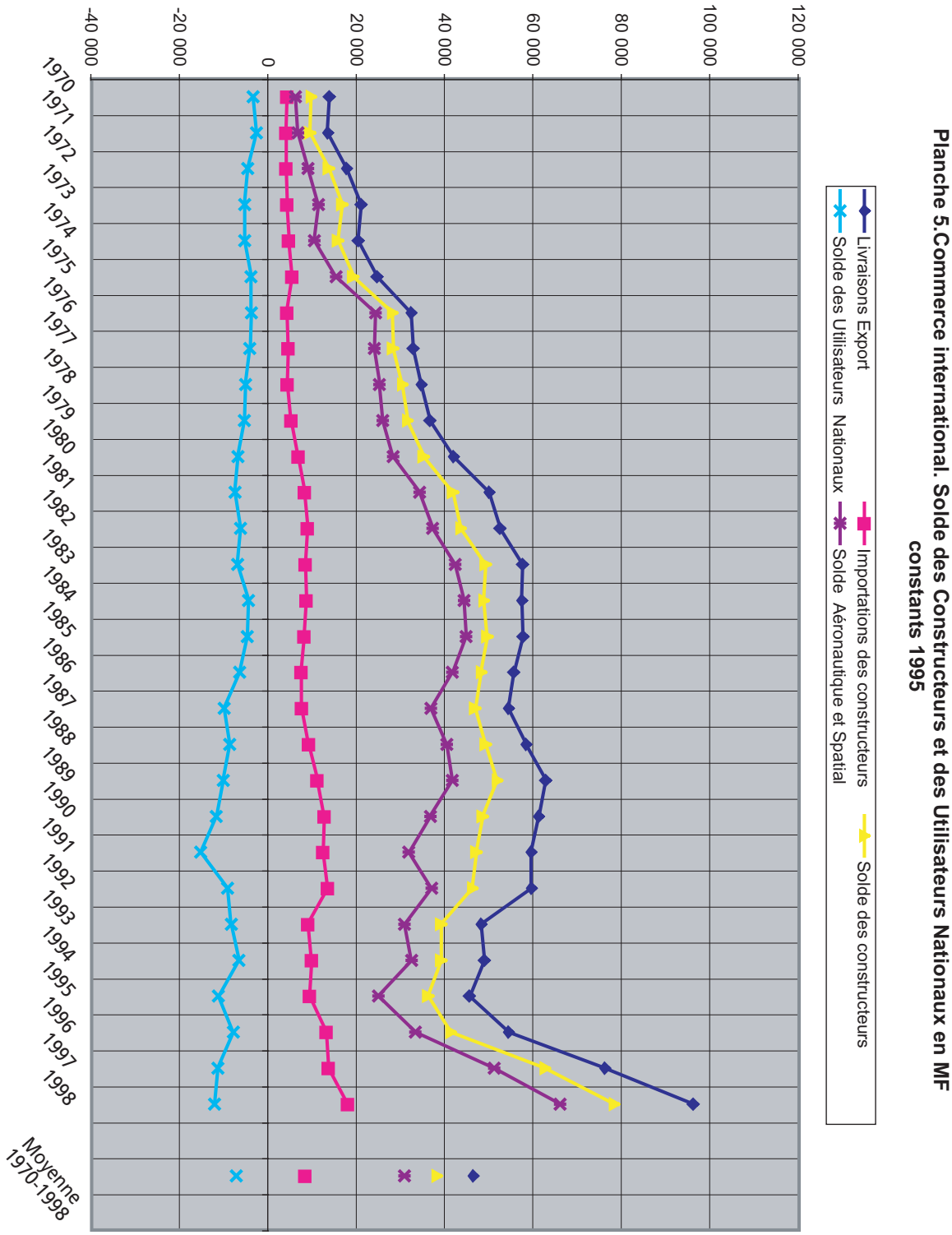


Planche 4.2. Exportations directes en pourcentages des chiffres d'affaires

Planche 5.Commerce international. Solde des Constructeurs et des Utilisateurs Nationaux en MF constants 1995



ANNEXE B 3

LA FILIATION DES ÉQUIPEMENTS, DE L'AÉRONAUTIQUE À L'ESPACE

Plus encore que l'industrie des cellules d'avions ou que celle des moteurs, l'industrie des équipements aéronautiques se trouvait, en 1945, totalement désorganisée.

Cette situation était d'autant plus dramatique que, pendant la guerre 1939-1945, les équipements à bord des avions militaires avaient été très fortement développés aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en URSS, comme d'ailleurs en Allemagne et au Japon.

L'industrie française était dans l'incapacité de se mettre immédiatement au diapason : pour les avions français en étude et en réalisation au cours de la période 1945-1955, il fallut procéder par achats d'instruments étrangers, américains ou britanniques, puis en fabriquer sous licence.

En parallèle, il était impératif d'entreprendre un travail de longue haleine pour combler un retard qui, sans cela, ne pouvait que s'accroître du fait de l'augmentation des performances des avions. Celles-ci étaient dues aux progrès de l'aérodynamique et des structures, mais surtout à la généralisation de l'emploi des turboréacteurs. Le domaine de vol des avions de combat, en vitesses, altitudes, accélérations s'élargissait sans cesse. Il fallait concevoir des anémomètres, des machmètres, des altimètres, des accéléromètres de grande étendue de mesure et de précision élevée. Les évolutions des avions de combat à réaction exigeaient des centrales à 2 ou 3 gyroscopes pouvant donner une indication correcte de l'attitude de l'avion en roulis, tangage, et cap, quelles que soient les évolutions en combat.

L'approche, puis le franchissement du mur du son exigeaient la connaissance exacte des phénomènes de compressibilité en transsonique, d'où la nécessité de machmètres précis et de dispositifs automatiques pour réduire les effets de ces phénomènes sur la stabilité et le pilotage.

D'autre part, la sécurité de l'équipage obligeait à installer des sièges éjectables et des masques à oxygène sur les avions de combat tandis que, sur les avions de transport commercial, le conditionnement d'air et le secours en oxygène étaient indispensables.

Le champ des équipements de bord se trouvait ainsi considérablement étendu. Les équipementiers de 1945 n'étaient pas préparés à une telle révolution. Jusqu'alors, ils étaient dispersés en petits groupes de spécialistes de disciplines différentes : mécanique fine, hydraulique, pneumatique, optique, électricité. L'électronique était peu utilisée, du fait de la faible durée

1. PÉRIODE DE 1955 À 1970

L'apparition des semi-conducteurs, avec les diodes et les transistors en 1955, modifia considérablement la situation. Grâce aux performances, à la compacité, à la faible dissipation d'énergie et à la grande fiabilité de ces nouveaux composants, le virage des équipements

vers l'électronique put être entrepris. Ceci devenait d'autant plus nécessaire que les techniques classiques étaient à bout de souffle. Elles étaient beaucoup mieux adaptées à la réalisation d'instruments individuels non connectés entre eux qu'à celle d'ensembles cohérents, indispensables pour pouvoir accomplir des missions des nouveaux avions de combat qui conduisaient à des spécifications bien plus sévères que celles des avions de la Deuxième Guerre mondiale.

Bientôt, le concept de système d'armes s'imposa, aussi bien pour les avions d'interception que pour les avions de bombardement. À cet égard, le système de navigation-bombardement du Mirage 4 peut être considéré comme le pionnier d'une nouvelle famille d'équipements désormais conçus autour d'un calculateur central auquel les différents senseurs et instruments sont reliés, pour le transfert des informations et des données.

Pour les servocommandes, le Mirage 4 marqua un grand tournant avec, pour la première fois en série, la commande électrique des élevons par servocommande électro-hydraulique. Celle-ci apportait une excellente précision de pilotage en même temps qu'elle évitait une grande longueur de timonerie. Cette application servit ensuite de modèle pour le supersonique Concorde. La voie des commandes de vol électriques était ouverte, le contrôle automatique généralisé (CAG) devait conduire à l'intégration complète des équipements, dès la conception de l'avion.

Le lancement, à partir de 1960, des programmes de missiles balistiques de la Force nationale stratégique (FNS) eut des répercussions directes sur les équipements, notamment en ce qui concerne le pilotage et le guidage. Grâce à ces programmes et à celui du sous-marin nucléaire lanceur d'engins (SNLE), la France maîtrisa la technologie des centrales de navigation par inertie.

2. PÉRIODE DE 1970 À 1990

Les progrès de la microélectronique intégrée à grande échelle à partir de 1960 permirent de réaliser des circuits logiques et des mémoires de plus en plus performants. Ceci conduisit à concevoir des systèmes d'avionique autour de calculateurs numériques embarqués sur les avions d'armes et sur les avions de transport commercial.

Le Mirage 2000 DA (défense aérienne) et le Mirage 2000 N (nucléaire) purent ainsi être équipés de systèmes de navigation et d'armement traitant les données de nombreux senseurs, dont des centrales de navigation à inertie.

Sur le Mirage 2000, les chaînes de pilotage transmettent non seulement les ordres directs du pilote, mais aussi tous ceux nécessaires pour améliorer la stabilité statique et dynamique et pour assurer la protection aérodynamique et structurelle dans tout le domaine de vol de l'avion, en particulier en transsonique.

L'Atlantique (ATL 2) fut doté du système d'armes aéroporté le plus complet développé en France.

Le Rafale fut doté de commandes électriques de gouvernes, avec trois chaînes principales numériques et une quatrième analogique, ayant chacune leurs gyromètres et leurs accéléromètres propres, la sécurité étant assurée par la comparaison permanente des chaînes de pilotage.

Parmi les avions de transport commercial, l'Airbus A 310 fut le premier avion européen à être doté d'un pilote automatique numérique et d'indicateurs à tubes cathodiques.

L'expérience acquise sur Concorde en matière de commandes de vol électriques et la connaissance des possibilités offertes par les calculateurs numériques utilisés dans les pilotes automatiques des dernières versions des Airbus A 300 B et A 310 conduisirent, lors de la conception de l'Airbus A 320, à apporter des innovations profondes dans les commandes de vol électriques, avec reconfiguration en cas de panne, permettant ainsi d'avoir le niveau de sécurité nécessaire malgré l'absence de secours mécanique pour les gouvernes principales de profondeur et de gauchissement. L'innovation la plus frappante fut incontestablement l'utilisation de mini-manches latéraux au lieu des organes de pilotage classiques.

Dans le domaine des missiles balistiques stratégiques, le M 4 démontra, par sa mise en service pleinement réussie à la date prévue (1985), la maîtrise française des techniques modernes de guidage inertiel avec calculateur numérique.

3.PÉRIODE DE 1990 À 2001

La dernière décennie a été marquée par des changements majeurs dans le contexte international, changements qui ont eu des conséquences notables sur les véhicules aérospatiaux et sur leurs équipements.

Dans le domaine militaire, la fin de l'affrontement Est-Ouest et l'apparition de menaces nouvelles dans des zones sensibles ont conduit à privilégier les moyens de localisation et de destruction très précises, avec l'identification de cibles ponctuelles et leur neutralisation.

Ceci a nécessité d'améliorer encore les moyens d'observation optique, dans le visible et dans l'infrarouge, et les moyens de détection radar.

Ces dispositifs de détection et d'observation devaient pouvoir être installés sur les avions, sur les satellites, mais aussi sur les drones, petits avions sans pilote téléguidés, dont l'emploi s'est très largement étendu au cours des opérations militaires de cette décennie. Parallèlement, les armements à guidage de grande précision furent développés et la furtivité des avions d'attaque fut accrue.

L'insertion des avions, des hélicoptères, des drones, des satellites dans des grands systèmes incluant les radars sol et les avions de surveillance de l'espace aérien a nécessité de faciliter les échanges de données entre tous ces vecteurs et senseurs, ce qui a été rendu possible par les progrès continus de la microélectronique et de l'informatique.

À signaler, tout particulièrement, la localisation ultra précise des vecteurs par l'association des données des récepteurs GPS et des centrales inertielles.

Dans le domaine du transport aérien commercial, aux préoccupations d'efficacité, de sécurité et de rentabilité sont venues s'ajouter celles relatives à l'environnement qui ne concernent plus seulement le bruit, mais aussi l'impact sur l'atmosphère et sur le climat. D'autre part, la croissance du trafic aérien oblige à repenser le contrôle de la navigation dans des zones surchargées.

La conception de nouveaux équipements pour la navigation en route, le guidage à proximité du sol et même sur les aérodromes, par tout temps, en situation de trafic intense, est indispensable.

4. CONCLUSION

L'évolution des instruments de bord, de 1945 à nos jours, peut être caractérisée par la succession de plusieurs générations.

La première génération fut celle des instruments installés directement sur la planche de bord, sans connexion entre eux : il appartenait au pilote d'observer tous ces instruments séparés et de faire mentalement la synthèse de leurs indications. En cas de panne ou de dysfonctionnement de l'un ou de plusieurs instruments, le pilote devait choisir le comportement adéquat en se fiant à sa propre expérience de situations semblables. D'autre part, l'installation des instruments directement sur la planche de bord nécessitait des conduits de fluide (air, huile…) de grande longueur, ce qui induisait des retards ou des constantes de temps pour les signaux au pilote, pouvant le gêner dans les situations critiques, par exemple au voisinage du décrochage ou en évolutions. En outre, ces conduits de grande longueur étaient sources de pannes pouvant conduire à des décisions inadaptées.

La deuxième génération apparut avec les instruments à indication à distance comprenant des senseurs munis de potentiomètres ou de selsyns dont les signaux, en courant continu ou en courant alternatif, étaient, après amplification, appliqués à de petits servomoteurs qui actionnaient les aiguilles ou les compteurs des indicateurs de la planche de bord. Cette génération régna sans partage au cours des années soixante, grâce à la fiabilité des composants à semi-conducteurs. Elle atteint son épanouissement avec l'emploi des calculateurs analogiques, puis numériques. Grâce à ces calculateurs, le pilote pouvait disposer d'une information élaborée donnant une certaine synthèse de la situation. D'autre part, des possibilités de redondance étaient offertes, d'où un accroissement notable de la sécurité.

La troisième génération est celle du tout-numérique. Rendue possible par les progrès de la microélectronique intégrée et par ceux des logiciels informatiques, cette génération a conduit à la conception de nouvelles planches de bord, de nouveaux cockpits, et même d'avions entièrement nouveaux, tels que l'Airbus A 320 ou le Rafale. Les calculateurs numériques de l'avion traitent l'ensemble des données fournies par les senseurs de bord ou par les transmissions du sol, en apportant la redondance et les possibilités de choix de manœuvres à l'équipage qui dispose ainsi d'une vue complète de la situation et des meilleurs moyens pour faire face à ses aléas.

Il est intéressant de constater que cette évolution de 1945 à nos jours des instruments de bord et plus généralement de tous les équipements d'avions, a grandement facilité le transfert vers les équipements spatiaux. Examinons successivement les cas des lanceurs, des satellites et sondes spatiales, et des navettes habitées.

Pour les lanceurs, il faut rappeler l'existence d'un large tronc commun avec les missiles balistiques stratégiques : ce tronc commun, initialement illustré par le lancement du premier satellite artificiel, le Spoutnik en 1957, s'est appliqué aux équipements de guidage-pilotage et aux servocommandes aussi bien qu'à la structure des véhicules et à leur propulsion. Ce sont les mêmes techniques et les mêmes constructeurs qui ont œuvré pour les équipements des missiles et pour ceux des lanceurs spatiaux. En France, la qualité du guidage des lanceurs Ariane est due, en grande partie à celle des centrales à gyrolasers, également utilisées sur avions et missiles.

Pour les satellites et pour les sondes spatiales, c'est essentiellement l'effort continu sur la microélectronique intégrée, à faible consommation et durcie contre les radiations, qui a permis la réalisation d'ensembles automatiques de grande fiabilité et de longue durée de vie. Là encore, les techniques mises en œuvre et les acteurs industriels ont été les mêmes, pour les composants des équipements de missiles et pour ceux des satellites.

Pour les navettes habitées et pilotées, le concept numérique s'est imposé comme ce fut le cas pour les avions, militaires ou civils. D'autre part, les simulateurs au sol, indispensables pour la formation des équipages des navettes, utilisent les mêmes techniques que celles des avions de combat ou des avions de transport. Il en est de même pour les dispositifs de survie et les moyens de sauvetage. Cette similitude a, d'ailleurs, facilité la formation des spationautes qui avaient déjà une grande expérience du vol sur avions à hautes performances.

En conclusion, en dépit des spécificités des véhicules spatiaux, les progrès remarquables des équipements aéronautiques, à partir des années soixante, ont été très précieux pour l'obtention des performances exigées pour l'espace, dans les conditions de sécurité et de fiabilité requises.

En France, les industriels et les organismes de recherche ont parfaitement utilisé leur compétence pour ce transfert, en effectuant les adaptations indispensables.

Il en est résulté, dans le domaine des équipements de bord, au cours de la deuxième moitié du XX^{e} siècle, une grande continuité entre l'aéronautique et l'espace. Cette continuité a beaucoup contribué aux succès des lanceurs et des satellites qui ont fait de la France la troisième puissance spatiale.

Jean CARPENTIER

ANNEXE B4

LES ÉQUIPEMENTS FRANÇAIS DANS LES PROGRAMMES AÉRONAUTIQUES (AVIONS ET HÉLICOPTÈRES) DE 1945 À 1985

Première introduction d'instruments de bord et d'équipements français sur le prototype et sur l'appareil de série. Cette liste, non exhaustive, porte sur les équipements marquants. En particulier, les équipements de génération électrique sont français sur tous les avions militaires et sur les hélicoptères. Les dates indiquées sont celles du premier vol du prototype et du premier vol de l'appareil de série.

1. AVIONS MILITAIRES

MD 450 Ouragan (1949, 1950)

Machmètre, accéléromètre, débitmètre, indicateur de température tuyère.
Siège éjectable SNCASO (sauf début de série).

Breguet Deux ponts (1949, 195)

Pilote automatique Alkan type 15 avec référence baro-altimétrique.

Mystère 2 (1951, 1954)

Premier programme abordant le vol transsonique, d'où d'importantes difficultés et des délais de mise au point. Cet avion avait sensiblement les mêmes équipements que le Mystère 4 A ci-dessous, mais pas les servo-commandes double corps ni les circuits hydrauliques en tubes d'acier inoxydable. Ce standard, introduit en commission locale de modification, ne fut pas appliqué, du fait de l'interruption de la série.

Mystère 4 A (1952, 1954)

Compas gyromagnétique Bézu, viseur Sadir-Carpentier.
Servo-commandes hydrauliques AMD et Jacottet.
Régulation d'oxygène Eyquem, conditionnement d'air SEMCA, Aérazur.
Siège éjectable SNCASO.

Super-Mystère SMB 2 (1956, 1957)

Horizon gyroscopique GTA 703. Compas gyromagnétique Bézu.
Viseur CEV Beaudoin, télémètre Derveaux, caméra enregistreuse OMERA.
Auto-commande de profondeur et amortisseur de lacet SFENA.
Génératrice Labinal, batterie SAFT.

Mirage III (1956, 1960)

Horizon boule SFIM et horizon tonneau SFENA (horizon de secours).
Centrale gyromagnétique Bézu. Indicateur d'incidence AMD.
Radar CSF Cyrano 1 bis.
Viseur CSF et enregistreur OMERA.
Pompes hydrauliques Messier.
Réseau alternatif Auxilec.
Génératrice continue Labinal ou SEB.
Auto-commande de profondeur SFENA.

Le Mirage III E (avion polyvalent, 1961, 1963) est équipé d'un système de navigation et d'armement comprenant le radar CSF Cyrano 2, un radar doppler Thomson-CSF (licence Marconi), une centrale de cap et de verticale Bézu-SFIM, une centrale aérodynamique Crouzet, un viseur et un radioaltimètre Thomson-CSF, des dispositifs de protection électronique Thomson-CSF et MATRA.

Breguet 1050 Alizé (1959)

Circuit anémométrique et indicateurs homologués.
Pilote automatique SFENA 315 et synthétiseur SFENA-Chombard.
Horizon de secours SFENA.

Étendard 4 (1956, 1962)

Circuit anémométrique et indicateurs homologués.
Horizon boule SFENA.
Centrale de cap Bézu.
Inhalateur Intertechnique.

Mirage 4 (1959, 1964)

Circuit anémométrique et indicateurs homologués.
Système de navigation-bombardement (haute et basse altitudes), avec boule Chombard.
radar panoramique CSF, dispositif de recalage optique COTELEC (hyposcope) calculateur central et calculateur de bombardement analogiques EMD, centrale aérodynamique Kelvin Hughes-Jaeger, sonde altimétrique haute altitude CSF.
Pilote automatique SFENA 331. Horizon de secours SFENA. Génération de courant alternatif Labinal. Circuit d'oxygène Intertechnique.

Atlantic-Breguet (1961, 1965)

Cet appareil de patrouille maritime, conçu en coopération, a demandé un équipement très complet de navigation et radionavigation et d'analyse de signatures acoustiques et magnétiques. Radar et équipements de contre-mesures CSF. Détecteur magnétique, basé sur le pompage optique, CSF. Calculateur de cap SFIM. Calculateur de navigation Crouzet. Table tactique et table de recherche Breguet-Crouzet. Des licences ont permis la production du pilote automatique par SFIM (Sperry) et de la centrale gyroscopique de précision par SAGEM (Kearfott).

Jaguar (1968, 1971)

Système de navigation et attaque, avec radar doppler EMD, centrale gyroscopique SFIM, centrale aérodynamique Smiths-Jaeger, calculateur numérique Crouzet, viseur Thomson-CSF, télémètre laser CGE, détecteur de radar Thomson-CSF.

Apparition, avec le calculateur Crouzet, du premier équipement français utilisant les techniques numériques.

Le système ATLIS (CSF), comportant un pod d'acquisition et d'illumination par laser, a permis ultérieurement le tir de missiles AS 30 L et de bombes guidées ; il a été complété par le système ELIAS pour un avion, non équipé d'ATLIS, tirant sur un objectif désigné par un avion équipé d'ATLIS ou par un laser au sol (CILAS).

Mirage F1 C (1966-69, 1973)

100 % d'équipements français. Système d'armes successeur du Mirage 3 C.

Après le Mirage III C, analogique, nombreuses versions du Mirage F1, tant pour l'armée de l'Air que pour l'exportation. Passage aux techniques numériques pour le Mirage F1 CR et pour le Mirage F1 CT.

Mirage F1 CR (1979, 1982)

Système de navigation et d'armement centralisé : le calculateur numérique EMD gère, via une ligne numérique multiplexée (digibus), les principaux équipements : centrale à inertie SAGEM, radar Cyrano IV Thomson-CSF, capteurs de reconnaissance photographique OMERA et infrarouge SAT. Des nacelles spécifiques permettent des missions de reconnaissance optique longue distance, reconnaissance tous temps, reconnaissance électronique, en complément de celles de l'avion lisse.

Mirage 2000 (1978, 1983)

Viseur tête haute et écran multifonction Thomson-CSF.
Commandes de vol électriques (4 chaînes AMD-BA)
Pilote automatique numérique SFENA.

Le Mirage 2000 DA (défense aérienne) est équipé d'un système de navigation et d'armement, avec radar doppler multifonction Thomson-CSF/ESD pour conduite de tir air-air et air-sol, deux calculateurs numériques ESD, un viseur Thomson-CSF tête haute et tête basse, une centrale à inertie SAGEM, une centrale aérodynamique Crouzet. Transmission de données par DIGIBUS.

Le Mirage 2000 N (nucléaire) est équipé d'un système de navigation et d'armement conçu spécialement pour la mission principale : pénétration tous temps basse altitude, avec le missile ASMP. Le vol en suivi de terrain basse altitude utilise le radar Antilope ESD, le radioaltimètre TRT, les indications de vitesse et d'altitude de deux centrales à inertie SAGEM. Deux calculateurs numériques ESD gèrent l'ensemble des échanges.

Sur le Mirage 2000, apparaît ainsi le premier système numérique centralisé avec calculateurs centraux, digibus, visualisations tête haute et tête basse TV couleur multiplexées, radars de détection air-air basse altitude RDM et RDI, et dispositifs de contre-mesures passifs électromagnétiques intégrés.

Super Étendard (1974, 1977)

Centrale à inertie SAGEM (licence Kearfott) alignée sur le porte-avions par infrarouge SAT. Radar Agave Thomson-CSF/ESD, centrale aérodynamique Crouzet, calculateur d'attaque SAGEM. Premier système français avec centrale à inertie et calculateur numérique d'attaque.

Transall C 160 (1963, 1967)

Servocommandes Dassault. Équipements hydrauliques Messier. Pilote automatique SFIM. Directeur de vol SFENA. Centrale de cap SFIM. Calculateur de navigation et anémométrie Crouzet . Radar OMERA. Tacan LMT. Radioaltimètre TRT. VOR-ILS EAS. VHF-ADF SOCRAT.

Réseaux électriques (continu, à fréquence variable, à fréquence régulée) Auxilec.

Fouga Magister (1952, 1956)

Équipements homologués (sauf altimètre Smith).

Horizon SFENA GTA 604. Centrale gyromagnétique Bézu.

Alphajet (1973, 1977)

La version MS2 a un système de navigation et d'attaque avec centrale à inertie SAGEM, collimateur tête haute et télémètre laser Thomson-CSF, boîtier interface digibus Dornier.

Atlantique ATL 2 (1981,1988)

Système d'armes aéroporté le plus complexe développé en France à cette époque :

- deux centrales à inertie SAGEM, centrale aérodynamique et table cartographique Crouzet ;
- pilote automatique et directeur de vol SFENA, chaîne de secours en cap SFIM ;
- récepteur Navstar. Radiocommunication et radionavigation, CME et radar de navigation ;
- interrogateur Thomson-CSF, détecteur d'anomalie magnétique Crouzet-CENG, visualisation Thomson-CSF, calculateur tactique CIMSA, logiciel CPM, optronique TRT-SAT-OMERA-SFIM, armement ECE-Aérospatiale-MATRA-Alkan.

2. AVIONS CIVILS

Caravelle (1955, 1959)

Premier avion commercial avec servocommandes (Air Équipement) sans secours mécanique. Système de sensations artificielles 3 axes. Batteries alcalines SAFT.

Premier avion certifié atterrissage tous temps catégorie III A (50 pieds-150 m) en 1965.

Radioaltimètre TRT.

Concorde (1969, 1976)

Premier avion civil équipé de commandes de vol électriques (avec secours mécanique). Deux centrales anémométriques, par avion, Bendix-Crouzet, pour les prototypes, et Crouzet pour la "série".

Pilotage automatique et directeur de vol Elliott-SFENA. ADI et HSI SFENA.

Circuit hydraulique 275 bars. Courant alternatif 1800 Hz.

Trois centrales à inertie ; navigation horizontale et verticale.

Atterrissage catégorie III A (radioaltimètre TRT).

Mercure (1971, 1973)

Certifié pour pilotage à deux (mais utilisé à trois). Certifié catégorie III pour Air Inter. Collimateur tête haute (Thomson-CSF) analogique.

Automanette Dassault, amortisseur de lacet Dassault.

Airbus A 300 (1972, 1974)

Indicateurs de planche de bord asservis à la centrale anémométrique et au système de navigation ; instruments directs en secours sur le panneau central. ADI et HSI SFENA. Trois centrales de cap et de verticale SAGEM. Horizon de secours SFENA. Atterrissage automatique en catégorie III (25 pieds-125 m) SFENA.

Servocommandes hydrauliques avec sensations artificielles Air Équipement.

Airbus A 310 (1982, 1983)

Premier avion de transport européen équipé de pilote automatique numérique et d'indicateurs à tube cathodique. Le système automatique numérique (Arinc 701 et 703) comprend un calculateur de contrôle de vol, deux calculateurs de stabilisation, un système automatique de commande des moteurs.

3. HÉLICOPTÈRES

Alouette 2 (1955, 1958)

Instruments vol à vue.

Commandes mécaniques directes, puis servocommandes SAMM.

Alouette 3 (1959, 1962)

Trois instruments VSV. Indicateur de pas avec graduation d'altitude et calculateur de masse au décollage. Stabilisateur SFENA pour le tir de missiles SS11 et SS12 de l'ALAT.

Gazelle (1972)

Planche de bord concentrée.

Ministab SFENA ou pilote automatique SFIM.

Génération continue Auxilec.

Super Frelon (1962)

Système d'armes de lutte ASM. Calculateur et anémométrie Crouzet. Table tactique Breguet-Crouzet. Pilote automatique SFIM. Radioaltimètre TRT. Couplage radar doppler-pilote automatique permettant le vol stationnaire automatique.

Puma (1965, 1970)

Planche de bord pour deux pilotes. Trois horizons, deux radioaltimètres. Pilote automatique SFIM.

Super Puma (1977, 1980)

Planche de bord complète avec écran radar et tableau indicateur de panne. Pilote automatique duplex SFIM, maintien en alignement sur VOR ou sur ILS.

Nota :

L'annexe C décrit l'évolution des équipements vers les systèmes jusqu'en 1995, avec indication des équipements étrangers aussi bien que français. Voir, en particulier, l'historique de la famille Mirage 2000, les équipements du Rafale et la comparaison entre l'Atlantic ATL 1 et l'Atlantique ATL 2, l'évolution des planches de bord des avions de la famille Airbus et de la famille Falcon.

ANNEXE B 5

HISTOIRE DES ÉQUIPEMENTS SPATIAUX

Filiation des équipements spatiaux, à partir des équipements existant pour l'aéronautique à la fin des années cinquante, et à travers l'évolution des premiers véhicules balistiques dans les années soixante.

Acteurs étatiques : DMA, SEREB, ONERA, CNET, CNRS, CNES.

Acteurs industriels : LRBA, Nord-Aviation, Sud-Aviation, Aérospatiale, MATRA, SEPR, SFENA, SFIM, SAGEM, Air Équipement, Crouzet, Intertechnique, LCT, Pyroméca, RTC, SAT, SODERN, Thomson-CSF, SAFT, Arianespace.

1. LE MÛRISSEMENT PRÉALABLE

L'histoire des équipements spatiaux français est précédée d'un long mûrissement, de 1946 à 1961, avec deux lignes d'actions en parallèle, qui se prolongèrent jusque dans les années soixante-dix :

- actions de la DEFA, notamment au LRBA, pour développer les fusées-sondes bi-liquides : de 1949 à 1965, 96 Véronique et 5 Vesta furent tirées au rythme global moyen de 10 à 15 par an, à partir de l'année géophysique internationale (1957-58), avec 80 % de succès. Ces fusées-sondes emportaient des charges utiles de 60 à 200 kg, à des altitudes comprises entre 100 et 500 km ;
- actions de l'industrie : SEPR pour la propulsion, et surtout Sud-Aviation, depuis 1960, avec sa panoplie de fusées-sondes à poudre, mono- et bi-étages, emportant des charges utiles de 30 à 450 kg, à des altitudes comprises entre 100 et 600 km. En quinze ans, il y eut 300 lancements de ces fusées (Bélier, Centaure, Dragon, Dauphin, Eridan), avec 85 % de succès.

Ces fusées-sondes n'étaient pas guidées, mais stabilisées par empennage et/ou mises en rotation en sortie de rampe (celles du LRBA étaient pré-guidées par 4 fils d'acier, sur 60 mètres). Elles n'avaient donc que peu d'équipements (assez rudimentaires) et ceux-ci n'étaient consacrés (en majorité) qu'aux expérimentations de mise au point (télémesure sommaire, télécommande de destruction) et parfois à la localisation par répondeur-radar.

À partir de 1955, un programme de recherche en haute atmosphère fut lancé avec trois axes principaux :

- biologique : 3 rats, 2 chats, 2 singes (avec seulement 3 survivants) ;
- scientifique : CNRS, professeurs Vassy et Blamont, Observatoires de Paris, de Haute-Provence, de Nice, de Marseille ;
- technologique : mise au point de matériaux et d'équipements pour l'espace.

Toutes les données furent obtenues soit par récupération de la charge utile, soit par transmission des informations par des télémesures très sensibles et à grande bande passante, dérivées des standards de l'aéronautique et des missiles (télémesures IRIG de SAT ou de Sud-Aviation).

2. LA PREMIÈRE ÉTAPE

L'histoire de l'espace en France commence pleinement par la décision prise par le Général de Gaulle, chef de l'État, de créer en France une activité espace. Cette décision faisait suite à celle de mettre en place la Force nucléaire stratégique, avec notamment les missiles stratégiques SSBS et MSBS :

- création du Comité des recherches spatiales, formé de représentants du CNRS, de l'ONERA, de l'Observatoire de Paris et des ministères concernés : Défense, Recherche, Télécommunications, Affaires étrangères, Finances. Le comité, présidé par le professeur Pierre Auger, au sein de la DGRST, deviendra en 1962 le Conseil de l'espace ; il disparaîtra en 1965, après le premier plan quinquennal spatial ;
- création, le 19 décembre 1961, du CNES qui assurera, à partir du 1er mars 1962, tout le programme spatial français.

Une première étape, de 1962 à 1967, est conduite par les deux organismes étatiques impliqués dans ce domaine :

- la DMA (devenue ensuite DGA), responsable du programme balistique militaire dont elle confie l'exécution à une société créée à cet effet en 1959 pour être mandataire de l'État, la SEREB ;
- le CNES, en charge de l'espace, à partir de 1962.

Ces deux organismes vont coopérer de façon pragmatique, donc évolutive ce qui conduit, au cours de la première étape :

- à la brillante démonstration, par la SEREB, de la capacité spatiale française, avec la mise en orbite de la capsule technologique Astérix, par le lanceur Diamant A le 26 novembre 1965, à partir du champ de tir de la DMA à Hammaguir (Colomb-Béchar) ;
- au lancement, sous l'égide du CNES, du satellite FR 1 par la fusée américaine Scout, le 6 décembre 1965.

Cette première étape (1962-1967) comporte donc les deux lignes d'action étroitement coordonnées, au sein du Comité de l'espace, par la DMA et le CNES.

2.1. Programme Diamant A

Décidé en décembre 1961, ce programme utilisa, avec bonheur et ambition, les spectaculaires réussites de la SEREB dans le cadre du programme des missiles balistiques. Celui-ci, décidé au début de 1960, mit en œuvre une soixantaine de véhicules d'essais (VE) en vol, dont les 50 derniers furent tirés à la cadence moyenne de un par mois, entre 1963 et 1967, avec un taux de réussite de plus de 87 %, ce qui constitue, pour l'époque, un remarquable record.

Les premiers VE (8, 9, et 110 Agate) furent essentiellement consacrés à la maîtrise de la propulsion. Ils étaient, en fait, des fusées-sondes, mono-étage, ni pilotées, ni guidées, mais qui possédaient déjà une case d'équipements récupérée par parachute et contenant des enregistreurs de vol et des appareils de télémesure.

Les quatorze VE 111 (Topaze) étaient pilotés, avec des solutions inspirées de celles du missile Casseur (programme SSBT de Sud-Aviation). Leur case équipements était déjà plus compliquée, elle comportait un système de pilotage (bloc gyros et électronique de commande) qui actionnait le bloc de puissance (Air Équipement) agissant sur les quatre tuyères. Pour les treize premiers VE 111, le guidage était limité à un programme d'attitude. Le dernier VE 111 (LG), lancé en mai 1965, comportait des éléments de guidage inertiel SAGEM.

Les quinze VE 231 (dont le premier étage bi-liquide avait été mis au point avec cinq VE 121 Émeraude), baptisés Saphir, furent lancés en trois versions :
– 231 P (propulsion) ;
– 231 R (mise au point de la rentrée) ;
– 231 G (représentant un missile SSBS complet, en version d'essai bi-liquide).

La case équipements de ces VE comportait toutes les fonctions d'un missile balistique : guidage inertiel (plate-forme stabilisée trois axes de la SAGEM, portant les accéléromètres inertiels, calculateur de guidage), chaînes complètes de pilotage, chaînes séquentielles, télémesure, télécommande, chaîne de localisation à base de répondeurs radars, alimentation électrique, chaînes pyrotechniques, servitudes diverses, prises ombilicales, etc.

Tous ces équipements furent mis au point et introduits progressivement dans les différents VE de 1961 à 1967, à partir des technologies disponibles, à cette époque, dans l'aéronautique, mais aussi grâce à des développements spécifiques sous licence américaine (gyroscopes flottants Kearfott pour les centrales inertielles, calculateurs Librascope).

Le Diamant A fut conçu en ajoutant au VE 231 une partie haute comportant un troisième étage à poudre très performant (non piloté, mais stabilisé par rotation). Diamant A était piloté (mais non guidé) sur ses deux premiers étages. Ses trois étages fonctionnaient selon un programmeur séquentiel d'attitude. Sa case équipements était donc plus simple que celle du missile SSBS de la SEREB, et même que celle du VE 231 G, puisqu'elle ne comportait pas de chaîne de guidage inertiel, mais elle possédait, en plus, une plate-forme SAGEM de référence d'attitude à plusieurs gyros et, pour la partie haute, un dispositif de basculement d'orientation, de mise en rotation et de séparation du troisième étage, ainsi que la commande de séparation de la coiffe. Cette case équipements du Diamant A, développée par MATRA, fut essayée et qualifiée en vol sur les VE 210 (Rubis), spécialement conçus pour valider la partie haute du Diamant (2^{e} étage, case équipements, troisième étage et coiffe).

2.2. Les premiers satellites

Pendant que la SEREB, sous l'autorité de la DMA, développait ainsi le premier lanceur spatial français, en retombée du programme des missiles balistiques, le CNES, déchargé de ce souci (mais il finançait l'adaptation spécifique du Diamant A), se consacrait à la réalisation des premiers satellites français.

N'ayant pas la chance de trouver en France le niveau technique et technologique suffisant (alors que le lanceur bénéficiait des résultats du développement des missiles balistiques), le CNES fut obligé d'innover dans tous les domaines, sauf dans celui des structures pour lequel les compétences françaises étaient suffisantes (métaux aéronautiques, protections, matériaux composites, clinquant, nid d'abeille, etc.). En tout cas, il était nécessaire de concevoir les équipements spatiaux à monter dans les structures.

Besoins et contraintes

Les besoins et les contraintes furent progressivement mis en évidence, à commencer par les plus évidents :
– la masse pouvant être satellisée était faible (environ 100 kg). Une réduction drastique de la masse des équipements s'imposait : il fallait "chasser le gramme" ;

– l'ambiance était sévère (vibrations acoustiques) pendant la phase propulsée, mais restait hostile pendant toute la vie du satellite (vide, thermique, rayonnement solaire et électromagnétique, exposition aux météorites, etc.) ;
– l'alimentation électrique par batterie ou générateur thermique, comme en aéronautique ou pour les missiles, était impensable pour les longues durées de vie (plusieurs mois, plusieurs années). Il fallait développer de nouvelles sources d'énergie (panneaux solaires photovoltaïques, générateurs nucléaires, batteries plus légères, piles à combustible, etc.) ;
– les transmissions radioélectriques (télémesures, télécommandes) étaient à repenser en vue de gagner un facteur de 10 à 100 sur les paramètres habituels (sensibilité des récepteurs, puissance des émetteurs). Le bilan de liaison était très contraint par les distances et la quantité d'informations à transmettre conduisait à un difficile partage entre les informations techniques et fonctionnelles (house keeping) et celles provenant de la mission scientifique du satellite. À ces contraintes s'ajoutaient celles résultant de la sécurité et de la précision de l'information (codage, réduction du "bruit", etc.) ;
– la stabilisation des satellites par rapport à la Terre, au soleil, aux étoiles, ou à une référence inertielle, exigeait l'étude des perturbations en orbite. Les couples exercés étaient certes d'un ordre de grandeur extrêmement faible (quelques dynes.cm), mais ils étaient d'origines très nouvelles (pression de radiation solaire, gradient de gravité, couplages magnétiques, etc.). Ceci nécessitait de nouveaux types d'équipements (capteurs, senseurs, références d'attitude, générateurs très précis de faibles couples correcteurs, dispositifs d'équilibrage, etc.).

Innovations et inventivité

Face à ces exigences, il fallait innover et faire preuve d'inventivité. Le CNES recruta de jeunes ingénieurs et les envoya se former, pendant un an, aux États-Unis (à la NASA) d'où ils revinrent enthousiastes et déterminés. Les spécifications des équipements pour satellites épouvantaient les industriels français ou provoquaient leur hilarité ("Vous vous êtes trompés d'un facteur 10 !") qui se transformait rapidement en perplexité ("Comment faire ?"). Cependant, les industriels se mirent au travail, sous la conduite du CNES, et le résultat fut remarquable : 40 % du premier satellite français (FR1, lancé le 6 décembre 1965) fut fabriqué en France et presque 100 % des suivants (D1A, D1C, D1D).

C'est ainsi qu'au cours de cette première étape (en gros, pendant la décennie 1960) furent développés et utilisés les nouveaux équipements spatiaux indispensables :
– les cellules solaires photovoltaïques (La radiotechnique), les batteries étanches Ni-Cd (SAFT), dérivées de celles utilisées en aéronautique et dans les missiles ;
– la nouvelle électronique, ultra légère et résistante aux vibrations, incluant des circuits imprimés à base de mini composants fiabilisés (d'abord américains, puis fabriqués en France), immergés dans une mousse protectrice (Ecofoam) suivant une technique de potting apprise aux États-Unis, selon des procédures très délicates ;
– les nouveaux standards de télécommande et de télémesure, utilisant des fréquences plus élevées qu'en aéronautique, des techniques de codage numérique (PCM) des émetteurs, des codeurs, des décodeurs, des récepteurs beaucoup plus sensibles, précis et sûrs ;
– les senseurs solaires, les senseurs stellaires, les références gyroscopiques, les dispositifs de stabilisation à gaz froid avec microtuyères de détente, etc. ;
– les organes moteurs (micro-impulseurs, moteurs-couples, etc.) ;
– la pyrotechnie, pour l'amorçage et les séparations d'étages ;

– le contrôle thermique (caloducs pour évacuer la chaleur, revêtements à émissivité et absorptivité quantifiées, etc.) ;
– la fiabilité, obtenue grâce à des technologies et des procédés de réalisation résistants et précis, mais aussi grâce à une redondance judicieusement distribuée le long des chaînes d'équipements ;
– le recours systématique aux essais "en ambiance" (vide, vide-thermique, accélérations, vibrations, humidité, etc.) et aux simulations déjà sophistiquées (soleil artificiel, grands caissons à vide-thermique, etc.) du satellite complet, suivant des procédures de qualification (niveaux très élevés) sur le prototype ou de recette (niveaux plus faibles) pour les modèles en vol ;
– "l'assurance de qualité", concept nouveau à l'époque (qui complétait le traditionnel contrôle de fabrication) déjà abordé pour les missiles (et plus tard en aéronautique) appliqué rigoureusement pour l'espace, en privilégiant les phases critiques, dès la conception, dans l'application stricte des procédures et le contrôle des points-clés en fabrication, en qualification et en recette.

Autres équipements

D'autres équipements, plus spécifiques, furent développés pour les expériences (scientifique ou technologique) embarquées sur les satellites. Ces équipements furent conçus et mis au point selon les mêmes procédures innovantes et inventives et avec les mêmes objectifs de fiabilité et de qualité et parfois par les mêmes équipes, ou par des équipes intégrées (CNES + laboratoires scientifiques). Leur réalisation dans l'industrie intervint à la demande et plus tard d'une façon systématique (notamment au cours des deuxième et troisième étapes) lorsque ces équipements devaient être fabriqués de façon répétitive.

2.3. Autres activités spatiales

Pendant les années soixante, il faut aussi mentionner d'autres activités spatiales, même si elles n'eurent pas d'impact direct sur les équipements spatiaux.

L'ONERA, dans le cadre des EBB (études balistiques de base) mit au point des fusées multi-étages, notamment pour l'étude des phénomènes de rentrée. Huit fusées Antarès furent tirées de 1959 à 1962, puis douze Bérénice, quadri-étages à poudre (les deux derniers étages étaient allumés au cours de le retombée, portant ainsi la vitesse de rentrée jusqu'à Mach 12). Enfin, deux Tibère clôturèrent ce programme en 1971-1972 avec une vitesse de rentrée de Mach 16.

D'autres fusées-sondes furent également développées par l'ONERA : Tacite (mono-étage à poudre), Titus (bi-étage à poudre, dérivé de Bérénice) dont deux exemplaires furent tirés en 1966, sous l'égide du CNES, pour l'observation d'une éclipse solaire en Argentine.

Le SEPR, forte de son expérience sur les fusées montées en 1952 sur l'avion Espadon de la SNCASE (1er vol supersonique horizontal), puis sur le Trident SO 6020 (1er vol horizontal à Mach 2 en 1958), sur le Durandal SNCASE et sur les Mystère IV B et Mirage I Dassault, développa, sur contrat DMA, un moteur quadrituyère HM4 (à hydrogène et oxygène liquides) monté sur un étage cryogénique H 3,5 (3,5 tonnes d'ergols) Onyx, qui, faute d'être utilisé à ce moment sur Diamant, servit de base pour le développement du futur troisième étage H8 (avec moteur HM7 monotuyère utilisant la turbopompe de HM4) d'Ariane 1.

La SEREB, sous contrat de la DMA puis du CNES, développa le deuxième étage du lanceur Europa 1 de l'organisation européenne ELDO. Cet étage, baptisé Coralie, était propulsé par quatre moteurs (sans turbopompe) de 16 tonnes de poussée, fonctionnant à l'UDMH et Aérozine. Sa version d'essai, décollant du sol (Cora), fut tirée en quatre exemplaires et l'étage Coralie lui-même monté sur le Blue Streak britannique ne vola que cinq fois (tirs Europa F6/1, F6/2, F7, F8, F9) dont trois fois avec succès. Les équipements montés sur cet étage n'apportaient aucune innovation par rapport à ce qui a été mentionné précédemment à propos du programme des missiles balistiques et du programme du lanceur Diamant.

3. LA DEUXIÈME ÉTAPE (1966-1975)

La deuxième étape correspond à la montée en puissance du CNES, fort des brillants résultats de la première étape et désireux d'assumer pleinement la responsabilité complète des activités spatiales. Il fallait notamment, tout en accélérant le développement des satellites et en élargissant leur utilisation à des fins d'"applications utiles" et non plus seulement purement scientifiques, définir une politique de lanceurs, faisant suite au programme Diamant A et trouver une base de lancement pour remplacer le champ de tir d'Hammaguir. Celui-ci devait, selon les accords d'Evian de 1962, être abandonné à la mi-1967, après le dernier lancement du quatrième Diamant A (D1D lancé en février 1967).

3.1. Le programme Diamant B

Ce programme fut décidé par le CNES et développé sous la responsabilité de sa nouvelle division Lanceurs créée le 1er janvier 1966, après une âpre discussion entre plusieurs versions rendues possibles grâce aux remarquables succès de la filière balistique développée par la DMA avec la SEREB et de Diamant A. Écartant les versions jugées trop ambitieuses (Diogène de la SEREB, basé sur un premier étage P40 ou Vulcain du LRBA, sur un fagot de quatre Émeraude, ou encore sur l'étage cryogénique Onyx), le CNES choisit un lanceur Diamant B utilisant un premier étage L17 bi-liquide avec les ergols de Coralie et un nouveau moteur Valois de 35 tonnes de poussée, de préférence à l'étage P16 proposé par la SEREB. Par contre, le deuxième étage (2 260 kg de poudre) est le même que celui du Diamant A, avec son dispositif de basculement (figure).

De même, aucune modification notable ne fut apportée à la case équipements du Diamant A, ce qui reconduisit, pour près de dix ans, le niveau technologique et les configurations techniques atteints à cette époque (1965) pour les équipements des lanceurs spatiaux.

La version Diamant B-P4, conçue vers 1971, lancée en trois exemplaires en 1975, fut l'occasion de moderniser quelque peu la case équipements qu'il fallut fabriquer en diamètre 1 500 (au lieu de 800) et donc réaménager complètement.

La figure présentant la case équipements du lanceur BP4 est une bonne synthèse de l'état des équipements spatiaux pour les lanceurs en France au début des années soixante-dix :

- architecture dispersée (cinq chaînes d'équipements séparées, alimentées par des batteries spécifiques à chacune, pour des raisons de sécurité) ;
- technologie proche de celle utilisée dans les avions, les hélicoptères et les missiles, mais fabrication plus spécifique de l'ambiance spatiale (vibrations, accélérations, vide, etc.) ;

– regroupement des commandes dans une centrale d'ordres, avec dispositif séquentiel électronique à redondances ;
– les équipements de pilotage n'ont pas changé : ce sont ceux des véhicules balistiques de la SEREB. Ils sont placés sur chaque étage. Le dispositif de basculement et d'orientation de la partie haute est réaménagé dans une virole spéciale (anneau de basculement) située entre le propulseur du deuxième étage (P4) et la case équipements ; il reconduit la plupart des éléments de Diamant B, pour créer les couples de lacet, de tangage et de roulis par détente de gaz froids comprimés au travers de huit électrovannes-tuyères. L'azote est préféré au fréon 14 pour les derniers Diamant B-P4, il est contenu dans quatre sphères (au lieu de deux).

Le troisième étage de Diamant B est nouveau (développé dans le cadre du programme PAS de Europa II) : 685 kg de poudre isolane, diamètre 806 mm (au lieu de 650 mm), stabilisé en rotation à 180 tours/minute. Sur Diamant B-P4, cette mise en rotation a lieu après séparation, par des fusées placées dans la jupette avant, avec les équipements spécifiques du troisième étage (trois chaînes : séquentielle, télémesure, servitudes).

Deux coiffes furent utilisées sur Diamant B :
– une coiffe de diamètre 800 mm, dérivée de celle de Diamant A (diamètre 650 mm) ;
– la coiffe du lanceur britannique Black Arrow, en alliage léger, pour les trois versions finales Diamant B-P4 (diamètre 1 500 mm) lancées en 1975.

3.2. Technologies et réalisations

Comme pour les lanceurs, les équipements des satellites pendant la deuxième étape (1966-1975) subirent une évolution sans révolution : il s'agissait de consolider les nouvelles technologies et les méthodes de fabrication imaginées au début des années soixante, et de parvenir ainsi à une maturité industrielle de conception et de fabrication de ces équipements.

Les cellules solaires furent produites par SAT et par RTC. Cependant ces productions françaises n'eurent pas le succès européen qu'elles méritaient.

Les batteries Nickel-Cadmium, étanches, furent fabriquées par SAFT, avec un succès complet.

L'électronique était diversifiée :
– convertisseurs CGA et Crouzet ;
– codeurs et télémesure Intertechnique et Sud-Aviation ;
– décodeurs et télécommande Thomson-CSF ;
– centrale d'ordres et dispositifs séquentiels LCT et Crouzet.

La stabilisation utilisait :
– des senseurs, de toute sorte, fabriqués par SODERN ;
– des références inertielles : centrales SAGEM, blocs gyros SFENA ;
– des générateurs de couples correcteurs, par détente de gaz froids dans des microtuyères (Nord-Aviation) ou par gaz chauds obtenus par décomposition catalytique de l'hydrazine (SEP et Nord-Aviation) et plus tard dispositifs de micropropulsion biliquides (SEP).

La pyrotechnie était conçue et réalisée par Dassault, par Pyroméca et par le Service des Poudres.

Les enregistreurs embarqués étaient fournis par IER.

La localisation était effectuée, pour la plupart des satellites, par des stations interférométriques au sol. Quelques satellites étaient localisés par des répondeurs radars Thomson-CSF.

Tous ces équipements furent utilisés, d'abord, sur les satellites du CNES. Après les premiers satellites (FR1, Diapason, Diadème), une nouvelle série, scientifique et technologique, fut lancée par les Diamant-B, de 1970 à 1975, à partir du centre spatial guyanais (inauguré dès 1968, avec un tir de Véronique qui fut suivi le 10 mars 1970 par le premier lancement Diamant-B1, avec capsule technologique et satellite allemand d'aéronomie WIKA) ; puis ce furent les satellites d'observation solaire D2-A et D2-B, le satellite de géodésie PEOLE, deux satellites technologiques D5-A et D5-B (Castor et Pollux) et STARLETTE (satellite géodésique).

Les mêmes types de matériels équipèrent les neuf satellites européens de l'ESRO qui furent lancés, de 1967 à 1974, par des lanceurs américains. L'industrie française participa activement, avec succès, à ces programmes, dans le cadre de consortia industriels mis en place pour asseoir la coopération en Europe (MESH, STAR, COSMOS). Elle se vit confier trois maîtrises d'œuvre :

- ESRO 1A et ESRO 1B (LCT) furent lancés en 1968 et 1969 par deux Scout ;
- TD1A (MATRA), le plus gros de tous (471 kg), stabilisé trois axes (c'était une grande première !) fut lancé en 1974 par un Thor-Delta. (Trois autres maîtrises d'œuvre furent aussi confiées à l'industrie allemande et trois autres à l'industrie britannique).

Sur ce fond d'une quinzaine de satellites à vocation essentiellement scientifique ou technologique se détachaient deux programmes de satellites d'application :

- METEOSAT (maîtrise d'œuvre Aérospatiale) d'origine française, européanisé en 1972 (premier lancement en 1977) ;
- SYMPHONIE, ambitieux programme franco-allemand, dont la maîtrise d'œuvre fut confiée au consortium industriel CIFAS, créé à cette occasion par Aérospatiale et MBB. Les deux premiers satellites de télécommunication européens, stabilisés 3 axes (première mondiale) furent lancés en 1975 et 1976, par deux Thor-Delta américains.

4. ESPACE UTILE ET GRANDS PROGRAMMES SPATIAUX (1975-2000)

Après les deux premières étapes qui viennent d'être décrites, le devenir des équipements spatiaux fut assuré par le développement spectaculaire de l'"espace utile" partout dans le monde (télécommunications, télédétection, observation, météorologie) et par l'amplification des programmes spatiaux stratégiques des gouvernements (programmes militaires, exploration de l'espace, programmes scientifiques, vols humains, etc.).

4.1. L'européanisation

Ce développement spatial se caractérisa par :

- l'européanisation, marquée par la création en 1975 de l'Agence spatiale européenne, porteuse d'immenses espoirs (à la hauteur des difficultés qui présidèrent à sa constitution !) ;

– l'avènement d'une véritable industrie de l'espace, dont la filiation est, clairement, d'origine aéronautique. À l'industrie aéronautique s'est jointe ensuite l'industrie des télécommunications pour créer des entreprises spatiales qui répondaient aux besoins de l'espace utile et étaient animées par l'économie de marché, avec les soucis de rentabilité et de profitabilité ;

– le développement des projets basés sur l'architecture technique hiérarchisée (systèmes, sous-systèmes, etc.) et sur des réalisations hiérarchisées (ensembles, sous-ensembles, etc.), ce qui entraîna la répartition des responsabilités de développement (conception et qualification), puis d'exploitation (production et mise en œuvre) confiées à des entités gouvernementales et industrielles structurées en fonction de ces architectures du projet (maîtres d'œuvre, ensembliers, sous-ensembliers, équipementiers, etc.) ;

– une distinction moins marquée entre lanceurs et satellites, ces deux concepts devant, à terme, évoluer vers celui, plus réaliste et plus complet, de véhicule spatial, propulsé ou non (dans le plus grand exploit spatial du XX^{e} siècle, le programme APOLLO, où est le lanceur, où est le satellite ?) ;

– un plus grand souci d'économie, notamment dans la conception plus précise des systèmes spatiaux et de leur plan de développement, visant à la réussite de la mission "du premier coup". On est loin de la méthode des années soixante (soixante lancements d'essais pour le programme des engins balistiques !).

4.2. La période 1975-2000

Le quart de siècle 1975-2000 fut marqué, en Europe, par :

– le développement et l'exploitation d'un système de lancement au service de tous les utili-sateurs, dans le monde entier : Ariane 1 (1975-1983), puis Ariane 2 et 3 (1984-1989) et enfin Ariane 4 (1989-2000), champion du monde pour la fiabilité et la précision, numéro 1 sur le marché commercial mondial.
Ces lanceurs automatiques, pilotés et guidés, utilisèrent, au début, des équipements très similaires à ceux des lanceurs et des engins balistiques de 1975, avec une évolution continue dans les technologies disponibles ensuite (voir plus loin).
L'avènement d'Ariane 5, avec des technologies remises à niveau permet à l'Europe de hausser encore ses objectifs. Ce n'est plus seulement un service de lancement, mais un système très complet de transport spatial, qu'elle prépare pour ce XXI^{e} siècle ;

– l'explosion des satellites de télécommunications, domaine où l'Europe est maintenant un acteur majeur. L'industrie (ASTRIUM, ALCATEL, ALENIA) en possède tous les atouts. Les exploitants (SES, EUTELSAT) rivalisent avec les plus grands mondiaux ;

– l'arrivée, en Europe, des programmes militaires d'observation, sous l'impulsion de la France (programme HELIOS), ce qui renforce la composante stratégique gouvernementale en Europe et complète les programmes déjà engagés par le CNES et l'ESA dans ces domaines (SPOT, ERS, ENVISAT, METEOSAT). La DMA trouve là une justification à ses efforts pour soutenir l'espace depuis 1960 (contribution aux programmes Diamant et Ariane) ;

– la maîtrise européenne des grandes missions scientifiques (GIOTTO, ULYSSE, SOHO, ISO, CLUSTER, XMM, etc.), qui permet à l'ESA d'être un partenaire crédible et incontournable pour les grandes aventures spatiales du XXIe siècle, qui ne peuvent être effectuées qu'en coopération mondiale : l'étude de l'univers, l'astrophysique, l'exploration et la découverte du système solaire, et d'abord de la Lune, des planètes les plus proches, Mars et Vénus, et du Soleil lui-même. Cette coopération européenne, menée, dès 1975, par l'ESA avec les États-Unis et l'URSS (vols habités, programme Spacelab) et maintenant étendue au Japon, à l'Inde, à la Chine, se trouve actuellement particulièrement concentrée sur le grand programme ISS (International Space Station).

4.3. Les nouvelles tendances

Dans ce contexte, les équipements pour l'espace vont se développer suivant une logique propre au marché spatial. On peut alors dire que la filiation aéronautique est dépassée, même s'il existe heureusement bien des points communs entre les deux domaines, dans les technologies et dans les réalisations, ce qui est source d'économies pour la recherche, pour les développements, pour les produits.

Les nouvelles tendances de cet essor spatial sont :
– l'européanisation. Celle-ci nuit un peu aux équipements français, car le "juste retour", principe de base de la coopération européenne, favorise plutôt les maîtrises d'œuvre et les sous-ensembles français aux dépens des équipements ;
– le recours systématique aux techniques inertielles, pour la localisation et le guidage du véhicule spatial, propulsé ou non, habité ou non : les centrales à inertie utilisées pour les lanceurs furent d'abord britanniques (centrales à cardans FERRANTI sur Ariane 1, 2, 3 et 4) puis françaises (centrales à gyrolasers SEXTANT sur Ariane 4 et 5) ;
– la digitalisation des équipements, par exemple le pilotage numérique d'Ariane 4 qui a succédé à l'électronique analogique de Ariane 1, 2 et 3 ;
– l'architecture interne des informations dans le véhicule est passée d'abord par une centralisation avec les calculateurs centraux (on Board Computer) qui orchestraient et géraient l'ensemble des fonctions, auparavant dispersées dans des chaînes plus ou moins totalement séparées.

On assiste ensuite à une certaine décentralisation locale de la gestion des informations au niveau des équipements eux-mêmes. Ceux-ci sont reliés entre eux et au calculateur central par un circuit complet (bus) sur lequel transitent les paquets d'informations jusqu'à la destination indiquée par l'adresse du paquet (Ariane 5).

5. ÉVOLUTION DE L'ORGANISATION

Après la période de mûrissement, de 1946 à 1960, favorable à de multiples initiatives, souvent sans suite, le coup d'envoi de l'ère spatiale française fut donné, en deux fois, par le général de Gaulle en décidant, de créer en 1959, la Force nucléaire stratégique (FNS) et le Comité de recherches spatiales, puis le CNES (1961).

Ce double coup d'envoi obligea les deux entités responsables de ces activités à s'organiser et à définir une politique et des méthodes de recherche, de développement et d'engagement industriel, ainsi que les modalités de coopération entre eux.

La DMA, consciente de la dispersion (et donc de la faiblesse) des forces dans le secteur public et dans l'industrie française, adopta une attitude résolument dirigiste, avec la mise en place :

– de la SEREB, mandataire de l'État, pour assurer la maîtrise d'œuvre des engins balistiques. Elle fut créée en 1959, à partir de toute l'industrie aéronautique de l'époque. Celle-ci participa à l'actionnariat de la SEREB et reçut d'elle des contrats pour développer les "ensembles" et "sous-ensembles" constituant le "système" de l'engin balistique ;
– du département Engins (DMA/DEN) qui devint rapidement la Direction technique des engins (DTEN). Celle-ci s'ajouta aux trois anciennes et classiques directions techniques de la DMA (DTIA, DTAT, DTCN). Le département engins était directement issu du Groupe des engins balistiques (GEB) formé, dès 1959, à la Section des engins spéciaux du Service technique de l'aéronautique (STAé/ES) pour assumer la responsabilité du programme des engins balistiques, pour le compte de l'État.

Le CNES adopta une attitude dirigiste similaire, mais pour des raisons très différentes, presque opposées, qui étaient motivées par la nouveauté du domaine, l'Espace, et par l'absence de l'industrie dans ce domaine.

Le CNES créa donc, ex nihilo, dès mars 1962, une division des satellites, constituée de néophytes sans aucune expérience, jeunes ingénieurs sortant d'école qu'il envoya se former aux États-Unis (un an à la NASA). Ils étaient chargés de "tout inventer" pour les premiers satellites français : le satellite FRI, lancé le 6 décembre 1965 par le Scout américain, fut totalement conçu et intégré par la division satellites.

5.1. Organisation pour la première étape

La première étape (1960-1967) se déroula, tambour battant, sous la conduite extrêmement ferme de la DMA et du CNES qui se partagèrent, d'une façon pragmatique, les tâches du développement spatial.

La DMA, responsable des engins balistiques, se vit confier, sur sa proposition, le programme du lanceur Diamant A dont elle délégua la maîtrise d'œuvre à la SEREB. Celle-ci appliqua les mêmes méthodes que pour les engins balistiques avec les industriels coopérants :

– Nord-Aviation, pour les 1er et 2e étages ;
– Sud-Aviation, pour le 3e étage et pour la coiffe ;
– LRBA, assisté de SNECMA, pour la propulsion du premier étage ;
– SEPr et la Direction des Poudres, pour la propulsion du 2e étage ;
– Direction des Poudres pour la propulsion du 3e étage ;
– MATRA pour la case équipements.

La DMA encadra l'amont et l'aval de ce programme : elle contrôlait la SEREB pour la conception et l'intégration au CAEPE et pour les quatre tirs (26 novembre 1965, 17 février 1966, 8 et 15 février 1967) sur la base Brigitte du CIEES à Hammaguir. Le CNES en assurait le financement.

Le CNES assura lui-même le démarrage de toutes les autres activités spatiales : la maîtrise d'œuvre des satellites fut confiée à sa division Satellites.

La mise en place d'un réseau de stations pour l'orbitographie, la poursuite, la télécommande, la réception des télémesures des satellites en orbite fut confiée à la division Équipement Sol. La conduite d'expériences suborbitales incomba à la division Fusées-Sondes.

Les méthodes utilisées par les deux organismes de maîtrise d'œuvre (SEREB et CNES) vis-à-vis de l'industrie procédèrent des mêmes principes.

Le maître d'œuvre assurait lui-même en totalité les tâches amont et aval de l'ensemble dont il était chargé (lanceur ou satellite) : conception, intégration, essais fonctionnels, essais de qualification et de recette, opérations de préparation au vol, lancement, exploitation des vols, etc.

Les sous-ensembles et les équipements de base étaient, en principe, confiés à l'industrie, mais avec un encadrement très sévère (jugé parfois excessif par l'industriel) du maître d'œuvre : spécifications extrêmement précises, méthodes imposées pour la conception, la fabrication, les essais, avec surveillance active du maître d'œuvre, essais de qualification et de recette exercés par le maître d'œuvre, etc.

Cette omniprésence du maître d'œuvre, justifiée par sa responsabilité propre dans un domaine nouveau et par la nécessité de "former l'industrie" à de nouvelles normes de fiabilité et de qualité, descendit souvent jusqu'aux équipements de base, surtout lorsque ceux-ci représentaient une avancée technologique décisive (par exemple : les gyroscopes flottants, pour le guidage inertiel) ou lorsqu'ils tenaient une place essentielle pour la fiabilité du système complet. L'intervention directe du maître d'œuvre auprès des équipementiers constituait une organisation très élargie, du type "râteau", au grand dam des industriels ainsi court-circuités.

5.2. Organisation pour les étapes suivantes

La seconde étape (1966-1975) et les étapes ultérieures (1975-2000) constituèrent indiscutablement un virage industriel vers une prise en charge de plus en plus marquée des responsabilités techniques et économiques par les entreprises industrielles et commerciales.

Le programme Diamant B

Dès le programme Diamant B, le CNES mit en place une organisation simplifiée, plus décentralisée vers l'industrie. Elle se perpétua ensuite dans le programme Ariane : le maître d'œuvre (direction des lanceurs du CNES), tout en conservant les tâches de conception, d'intégration et de lancement, confia aux industriels des responsabilités complètes sur la propulsion (LRBA, puis SEP), sur les étages (Aérospatiale) et sur la case équipements (MATRA) et n'intervint plus directement sur les équipements de base, sauf pour les décisions stratégiques (choix des solutions, acceptation des plans de développement). L'intervention du CNES dans la phase industrielle était organisée par sa direction de la qualité, fonction introduite, pour la première fois en tant que telle, pour Diamant B en 1967.

Pour l'assister dans la conception et la coordination technique du système complet, le CNES inventa, dès 1966, la fonction d'architecte industriel qui fut confiée à la SEREB pour Diamant B et à l'Aérospatiale pour Ariane.

Le transport spatial européen

Le 26 mars 1980 (date historique !), pour la première fois au monde, voyait le jour une société commerciale de transport spatial, Arianespace, société européenne pour la production et la commercialisation des lanceurs Ariane.

L'organisation ainsi mise en place prévoyait que, après le développement des versions de base (Ariane 1, 2, 3, 4, 5...) par l'ESA qui en déléguait la maîtrise d'œuvre au CNES, c'est Arianespace qui devait assurer l'exploitation du système de lancement, au service de tous les utilisateurs dans le monde, organismes spatiaux, publics ou privés.

Responsable des missions proposées aux clients, de l'adaptation du lanceur à leurs besoins et des éventuels développements complémentaires nécessaires, Arianespace commandait à l'industrie européenne les sous-ensembles (étages, case équipements, coiffe, structures de déploiement, boosters...), puis devait les contrôler, les assembler, intégrer le lanceur complet, puis assurer les opérations de lancement jusqu'à livraison au client du satellite sur orbite.

Le stupéfiant pari européen de 1980 a porté ses fruits puisque Arianespace, après avoir conquis, de haute lutte, la première place sur le marché commercial mondial des services de lancement, notamment avec Ariane 2 et 3 (17 lancements, de 1984 à 1989), s'est ensuite engagée dans un formidable programme de production en série d'Ariane 4 (116 lancements, plus de 1 000 moteurs Viking construits).

Ce lanceur Ariane 4, champion du monde de fiabilité, de précision et de régularité, a dominé le marché, face à une concurrence acharnée des États-Unis, puis des lanceurs russes et chinois (vendus au rabais) et japonais, jusqu'au début de XXI^{e} siècle.

Les satellites

La même évolution intervint dans les satellites, la maîtrise d'œuvre étant finalement confiée à l'industrie pour la plupart des projets après 1970, surtout pour les satellites d'application (Symphonie en fut le premier exemple notable), le CNES se réservant la maîtrise d'œuvre des satellites qui présentaient un caractère stratégique pour l'État ou un saut technique ou technologique important.

Cette évolution permit de placer l'industrie française (Aérospatiale, MATRA, ALCATEL) en bonne position pour gagner les appels d'offres de l'ESRO, puis de l'ESA, et, enfin, des opérateurs des systèmes de télécommunications spatiales dans le monde entier (EUTELSAT, INMARSAT, INTELSAT) et des opérateurs privés.

Tout ceci répondait à l'ambition du CNES d'entraîner et de former l'industrie française pour la préparer à affronter victorieusement la concurrence, américaine notamment, dans la compétition mondiale ("Le CNES aura réussi lorsqu'il disparaîtra !").

6. CONCLUSION

L'industrie spatiale française est ainsi devenue majeure en ce début du XXI^{e} siècle, tant pour la conception des systèmes complets de véhicules spatiaux ou de transport spatial que dans la maîtrise des équipements pour l'espace. De plus, elle s'est elle-même organisée au niveau de l'Europe, pour constituer des ensembles industriels européens parfaitement comparables aux meilleurs, devenant parfois même les leaders mondiaux en certains domaines.

L'aéronautique française peut être satisfaite d'avoir ainsi engendré, par une filiation continue pendant un tiers de siècle, une capacité industrielle spatiale européenne de premier plan.

Charles BIGOT

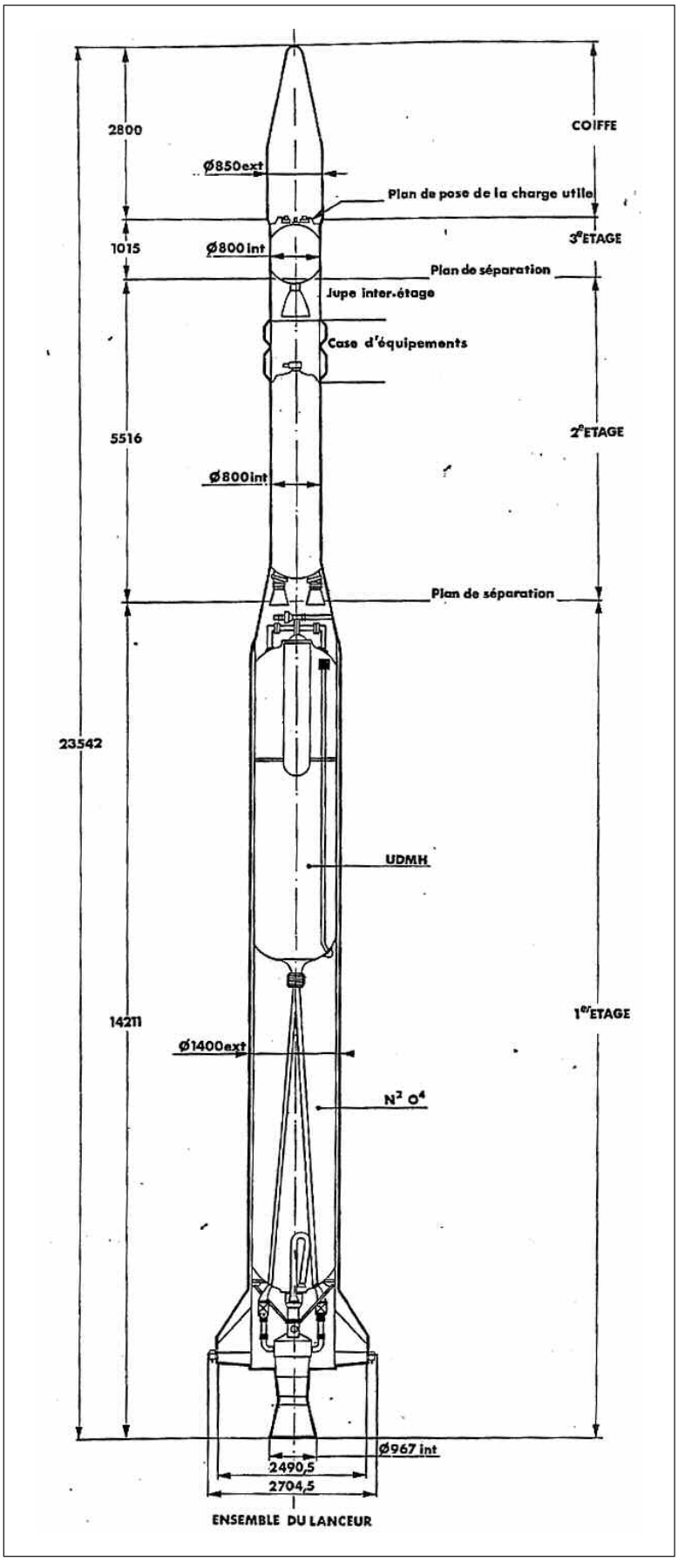
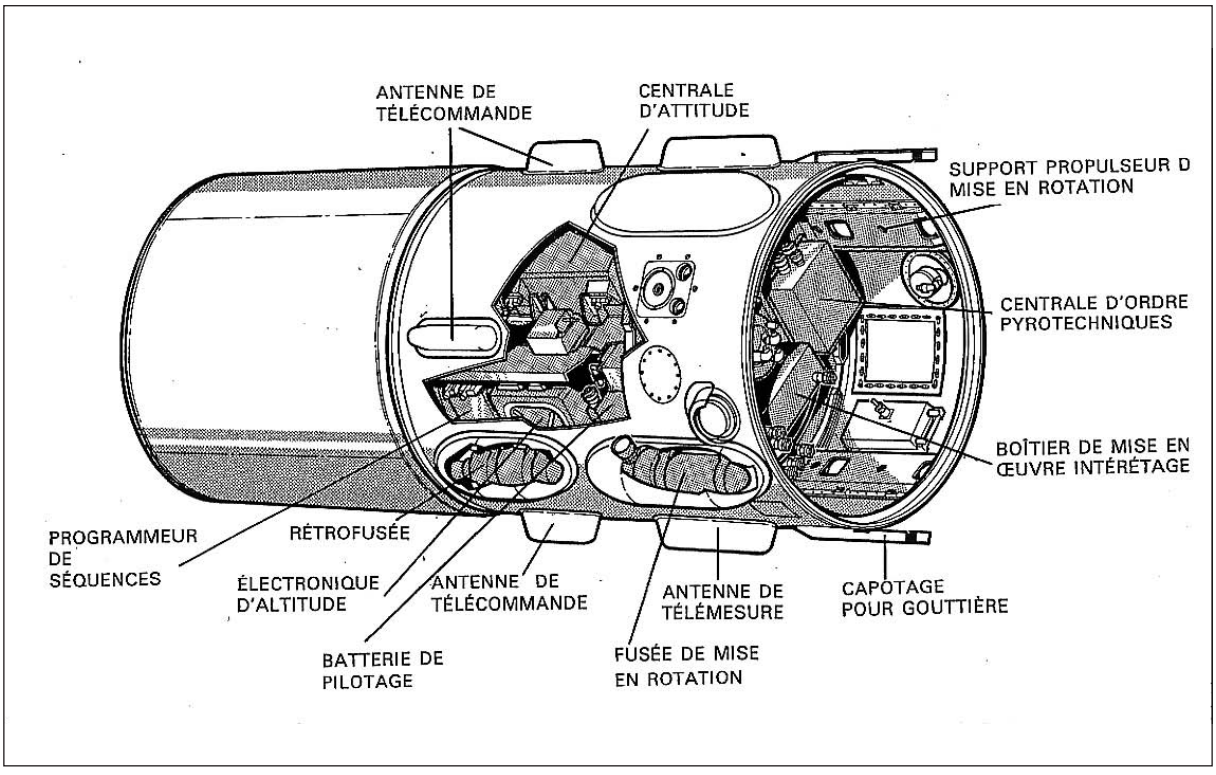
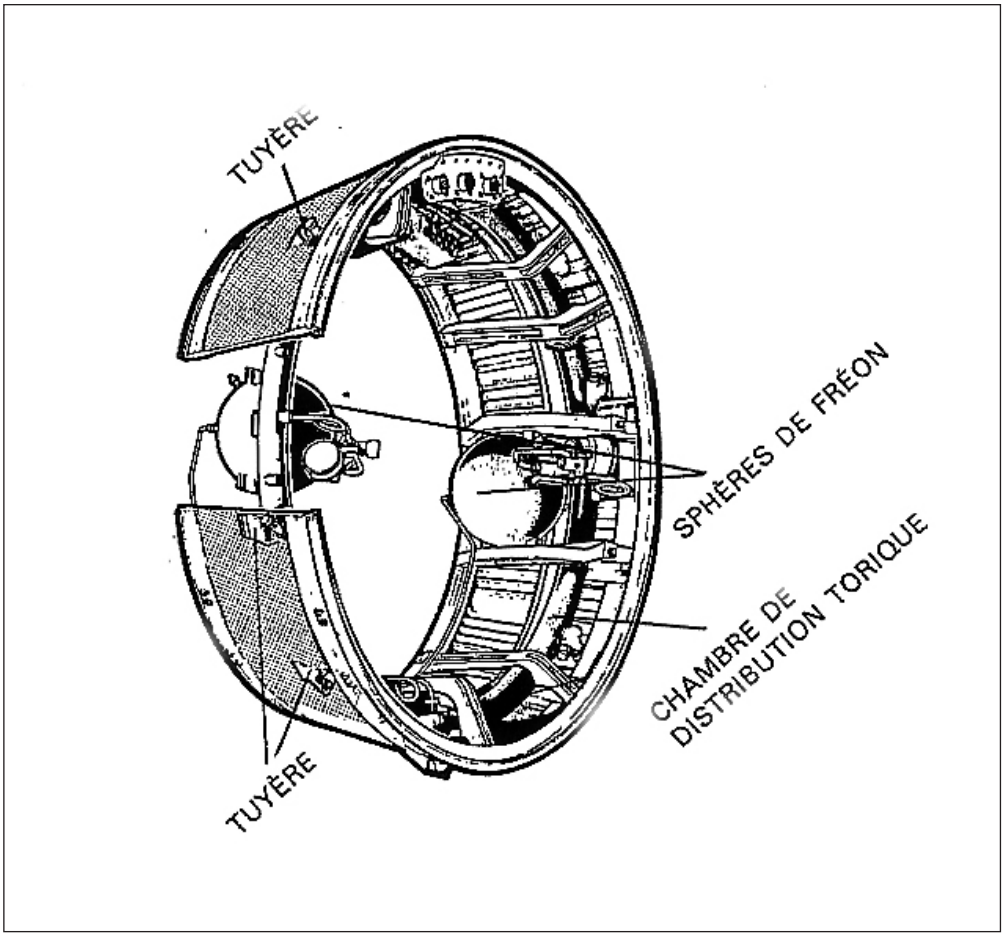


Schéma d'ensemble du lanceur Diamant B.



Case Equipements du lanceur Diamant B.



Dispositif de basculement du lanceur Diamant B (Source CNES).

ANNEXE B 6

MOYENS D'ESSAIS AU SOL POUR L'INDUSTRIE AÉROSPATIALE

Pour la mise au point, l'expérimentation, l'homologation, la certification des matériels aérospatiaux, il s'est avéré très tôt nécessaire de mettre en place des centres d'essais spécialement affectés à cet usage, équipés de moyens d'essais importants et très performants (caissons, chambres acoustiques, ensembles de vibrations, avions de servitude, matériels d'enregistrement…), tant pour les essais au sol que pour les essais en vol. Ces moyens furent mis à la disposition de tous les demandeurs, militaires ou civils, étatiques ou privés, ce qui contribua à en améliorer la rentabilité.

Certains de ces centres, bien que gérés directement par des organismes du ministère de la Défense, peuvent aussi être utilisés par les industriels, dans le cadre de relations contractuelles définissant les conditions de mise à disposition.

C'est le cas notamment du Centre d'essais en vol (CEV), du Centre d'essais des propulseurs (CEPr), du Centre d'essais aérospatiaux de Toulouse (CEAT), du Centre d'essais des Landes (CEL), du Centre d'essais de la Méditerranée (CEM), et du Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques (LRBA) de Vernon. Ces centres font l'objet de présentations spécifiques dans l'ouvrage COMAÉRO consacré aux centres d'essais.

D'autres centres spécialisés sont gérés directement par des sociétés de l'industrie aérospatiale, ils sont équipés de moyens lourds, très souvent, d'ailleurs, financés par l'État. Parmi eux, deux centres méritent une attention particulière :

– le laboratoire d'essais de Villacoublay ;
– le laboratoire d'essais spatiaux de Toulouse.

1. LE LABORATOIRE D'ESSAIS SOPEMEA DE VILLACOUBLAY

1.1. Historique

C'est en 1948 que la DTIA (Direction technique et industrielle de l'aéronautique) décida de mettre à la disposition des fabricants d'équipements aéronautiques un laboratoire d'essais doté des moyens nécessaires à l'expérimentation des matériels dans les conditions climatiques et mécaniques se rapprochant, dans la mesure du possible, des conditions d'utilisation.

D'abord installé sur le terrain d'Issy-les-Moulineaux, puis transféré à Villacoublay, ce laboratoire d'essais est mis en œuvre et géré par la SOPEMEA (Société pour le perfectionnement des matériels et équipements aérospatiaux). Il dispose de toute une gamme de moyens d'essais exceptionnels, tant sur le plan de la variété que sur le plan de la puissance et de la dimension. Leur financement a été couvert en grande partie par l'État (services de la DCAé,

DEn, DCE). Jusqu'en 2000, ce laboratoire était géré dans le cadre d'une convention passée entre la DGA et la SOPEMEA. Depuis le 1er janvier 2000, cette convention est remplacée par une convention d'occupation précaire, la SOPEMEA se portant acquéreur, à une exception près (l'installation d'analyse modale), de l'ensemble de ces moyens.

1.2. Les moyens

Les moyens installés dans ce laboratoire répondent aux conditions imposées par la plupart des normes françaises, européennes, étrangères définissant les conditions d'environnement et les procédures d'essais applicables aux matériels en fonction de leur nature et de leur utilisation, qu'elle soit civile ou militaire. Parmi les installations les plus remarquables, on peut citer :

- des générateurs électrodynamiques de vibration, de grande puissance, dotés de moyens de pilotage capables de réaliser tous types de vibrations (sinusoïdales, aléatoires, etc.), qu'elles soient imposées par des normes ou mesurées directement sur véhicules ;
- des générateurs électrohydrauliques de vibrations basse fréquence (tables monoaxiales et biaxiales) pouvant exercer des efforts jusqu'à 300 kN.

Mis en place initialement pour les essais des matériels de servitude de la Force nucléaire stratégique, ces moyens sont utilisés aujourd'hui pour des essais de matériels tant terrestres que navals, des essais de structures et de sous-ensembles d'engins spatiaux, des essais de matériels embarqués sur véhicules, tels que des shelters et des conteneurs, des essais de simulation sismique dans le domaine électronucléaire.

- des enceintes climatiques dont le volume atteint jusqu'à 200 m^3 avec simulation de l'échauffement solaire et de l'humidité ;
- des installations mobiles d'analyse modale de structures d'avions ou d'engins, dont la dernière, définie en coopération avec l'ONERA (logiciels de pilotage) a été mise en place en 2001 et continuera à faire l'objet d'une convention de mise en œuvre avec la DCE. Ces installations disposent, de façon autonome, de moyens de pilotage, d'acquisition et de traitement des signaux pilotés par ordinateur, ce qui leur permet d'effectuer les essais chez les constructeurs eux-mêmes. C'est avec de telles installations qu'ont été réalisés les essais de structures de Concorde, des Mirage, des Rafale, des Airbus (en coopération avec l'ONERA) ;
- des moyens d'essais de compatibilité électromagnétique, avec deux chambres semi-anéchoïques couvrant un domaine de fréquences de 5 Hz à 26,5 GHz, mis en place en 1995 ;
- enfin, toute une série de moyens d'essais divers, centrifugeuses, machines à chocs mécaniques, machines à choc vapeur… pour répondre aux multiples besoins des utilisateurs.

1.3. L'opérateur : la SOPEMEA

Comme indiqué précédemment, ce laboratoire est mis en œuvre par la SOPEMEA, société anonyme créée en 1948 par les équipementiers aéronautiques, mais dont l'actionnariat a quelque peu évolué depuis sa création :

- de 1948 à 1983, le principal actionnaire fut le SOREAS (Syndicat des fabricants d'organes et équipements aérospatiaux) ;
- de 1983 à 1987, entrée au capital du GIFAS (à hauteur de 30 % environ), ainsi que de quelques industriels ;

– de 1987 à 1999, prise de contrôle par Messier-Hispano-Bugatti (51 %), SOREAS conservant 49 % ;
– de 1999 à 2001, SOREAS, absorbé par le GIFAS, est remplacé par celui-ci, Messier-Hispano-Bugatti restant majoritaire ;
– depuis le 1er octobre 2001, la SOPEMEA est passée sous le contrôle du groupement des APAVE (Association des propriétaires de machines à vapeur) qui détient aujourd'hui la quasi-totalité des actions (le groupement des APAVE est une association créée pour la "maîtrise du risque industriel", comprenant environ 6 000 personnes en France et à l'étranger, réparties dans six organisations régionales).

En dehors de son activité essais, la SOPEMEA exerce également une activité maintenance des moyens d'essais d'environnement et une activité études ingénierie dans les domaines des méthodes d'essais, de la conception des moyens et des laboratoires d'essais.

Cette activité s'accomplit tant en France qu'à l'étranger (laboratoire d'essais nucléaires de l'ENEA en Italie, laboratoire d'essais spatiaux KARI en Corée du Sud).

Jusqu'en 1980, la SOPEMEA a géré également une équipe de techniciens au CEAT à Toulouse pour les essais de matériels d'avions civils. Elle se vit, par ailleurs, confier en 1962 la mise en place et la gestion du laboratoire spatial du CNES, d'abord installé à Brétigny, puis transféré en 1972 au Centre spatial de Toulouse et ce jusqu'en 1983, date à laquelle la gestion de ce laboratoire fut confiée à Intespace (filiale commune du CNES et de SOPEMEA).

Ces dernières années, deux autres filiales ont été créées :
– SOPAVIB, constituée en 1997, avec le groupe lyonnais des APAVE et VIBRATEC (SOPEMEA : 50 %). Elle réalise, dans son laboratoire de Lyon, des essais industriels (mécaniques et électriques) et offre ses services pour la maintenance des moyens d'essais des industriels dans cette région ;
– SOPAVAL, constituée en 2000 avec le groupe Nord-Ouest des APAVE (SOPEMEA : 50 %, APAVE : 50 %). Son laboratoire d'essais, en activité depuis le 1er janvier 2002, est installé à Valenciennes.

À partir de sa vocation initiale qui était la réalisation d'essais d'environnement pour les industriels de l'aéronautique, la SOPEMEA est ainsi devenue, au fil des années, le spécialiste français des techniques de simulation correspondantes et, plus généralement, des problèmes soulevés par la qualification des matériels dans les différents domaines de l'industrie.

2. LE LABORATOIRE INTESPACE D'ESSAIS SPATIAUX DE TOULOUSE

2.1. Historique

Dès sa création en 1962, le CNES décida de constituer un centre d'essais spatiaux pour étudier le comportement des satellites et autres éléments d'engins spatiaux, en simulant au sol les contraintes d'environnement auxquelles ils sont soumis.

D'abord installé sur le terrain du Centre d'essais en vol de Brétigny-sur-Orge, ce laboratoire fut transféré en 1972 au Centre spatial de Toulouse. Sa gestion et la mise en œuvre de

ses moyens furent confiées tout d'abord à la SOPEMEA, puis en 1985 à Intespace, filiale commune de la SOPEMEA et du CNES, dans le cadre d'une convention passée avec le CNES. Le financement des moyens d'essais a été assuré avec le concours du CNES, de la DGA, des industriels aérospatiaux et sur fonds propres de la société.

2.2 Les moyens

Les moyens mis en place au centre d'essais de Toulouse sont particulièrement impressionnants et en font un des centres d'essais spatiaux les plus performants en Europe. Ils permettent de tester les satellites pouvant atteindre une masse de 3,5 tonnes, soit de la classe 1/2 Ariane IV.

Des développements sont actuellement en cours pour permettre de tester les satellites de la classe 1/2 Ariane V, soit d'une masse de 5,5 tonnes. La gamme offerte couvre les essais mécaniques, thermiques, les essais en simulation solaire, les essais acoustiques, les essais de compatibilité électromagnétique et les essais d'antennes.

Moyens d'essais mécaniques

Ces moyens comportent principalement :

- des générateurs électrodynamiques de vibrations de grande puissance, dont un ensemble multivibration pouvant atteindre 4 x 160 kN, pour les essais de gros satellites d'une masse de l'ordre de 6,5 tonnes ;
- une grande chambre d'essais acoustiques réverbérante de 1 100 m3, dans laquelle est reproduit le bruit généré par les moteurs de la fusée porteuse lors du lancement.

Moyens d'essais thermiques

Ces moyens comportent en particulier deux installations remarquables :

- un ensemble caissons-plate-forme, permettant de simuler les conditions d'environnement spatial : vide, basses températures, radiations solaires auxquelles sont soumis les satellites au cours de leur trajectoire en orbite autour de la Terre. Cet ensemble, appelé SIMLES, dont le caisson atteint 6 mètres de diamètre, a été réalisé dès la mise en place du centre à Toulouse en 1972 ;
- un deuxième gros caisson de 10 mètres de diamètre et d'un volume de 600 m3, le SIMMER, pour les essais thermiques sous vide, inauguré en 1992.

Moyens d'essais électromagnétiques

Le Centre dispose de deux cages de Faraday anéchoïques de grandes dimensions (16 x 10 x 11 mètres et 11 x 8 x 4,4 mètres) qui permettent d'effectuer les essais dans une gamme de fréquences de 10 Hz à 40 GHz.

Base compacte de mesures d'antennes

Cette base , appelée MISTRAL, permet de faire les essais d'antennes dans une gamme de fréquences de 1,47 à 40 GHZ (extensible à 200 GHz). Elle comporte un système bi-réflecteur et est installée dans une chambre de grande dimension (30 x 20 x 15,5 mètres). Elle a été mise en place en 1997.

Outre ces gros ensembles, le centre dispose de toute une gamme de moyens permettant de tester et de vérifier les caractéristiques des satellites (machines à chocs, centrifugeuses, dispositifs de mesure des inerties, moyens d'analyse modale, etc.). Tous ces moyens sont groupés sous un seul toit, ce qui permet le transfert d'un satellite, d'un moyen d'essai à un autre dans les conditions de propreté voulues (classe 100 000).

2.3. L'opérateur Intespace

La gestion et la mise en œuvre de ce centre d'essais spatiaux furent confiées à la SOPEMEA, de 1968 à 1983, date à laquelle elles furent transférées à Intespace, filiale commune du CNES et de la SOPEMEA (35,25 % chacun), avec participation des principaux industriels de l'espace : MATRA Espace et Aérospatiale (8,66 % chacune), Alcatel Space (3,02 %). À tout cela s'ajoutait le Fonds commun de placement des salariés (9,1 %).

Une telle structure paraissait plus apte au développement du Centre, car elle impliquait directement les principaux acteurs intéressés.

Ces dernières années, la structure du capital a de nouveau évolué, il est aujourd'hui réparti comme suit :

– CNES : 39 % ;
– ASTRIUM : 38 % ;
– Alcatel Space : 13 % ;
– Fonds commun de placement : 10 %.

La SOPEMEA s'est en effet retirée du capital en 2000.

Pour développer son activité future, Intespace vient de lancer, avec l'appui de ses actionnaires, le projet ATLAS qui doit lui permettre d'adapter ses moyens aux grands satellites de télécommunication.

Par ailleurs, pour équilibrer cette activité soumise quelque peu aux aléas des programmes de satellites, Intespace propose également aujourd'hui toute une gamme de services :

– logiciels pour le pilotage des essais et l'analyse des mesures (DYNAWORKS) ;
– ingénierie de laboratoires d'essais, avec un certain nombre de succès à l'exportation : Centre spatial de KARI, Corée du Sud (élaboration du cahier des charges) ; Centre spatial de l'INPE, au Brésil ; Centre spatial de NSPA, en Chine ;
– maintenance des moyens d'essais.

Intespace a, par ailleurs, signé un accord avec le centre d'essais allemand IABG pour la mise en œuvre des moyens d'essais de l'Agence spatiale européenne implantés au centre de Noorwijk (Pays-Bas) ; cette mise en œuvre a été confiée à une filiale commune ETS (European Test Service).

En vingt années d'existence, Intespace est ainsi devenue l'acteur incontournable des essais spatiaux en Europe.

3. MOYENS D'ESSAIS D'ALCATEL SPACE

Certains industriels se sont également dotés, pour leur usage exclusif, dans la mesure où le volume de leurs essais le justifiait, de centres d'essais équipés de moyens très importants. C'est le cas, notamment, des moyens d'essais de l'usine de Cannes-la Bocca, gérés aujourd'hui par Alcatel Space.

3.1. Historique

Ces moyens sont implantés sur le site de Cannes-La Bocca, où fut construite en 1931 une première usine pour réaliser des hydravions et des avions de transport ainsi que des avions de chasse, dans le cadre des Chantiers aéronavals Étienne Romano (CAER). Ces chantiers

furent regroupés en 1937 avec la société Lioré et Olivier, pour former la Société nationale de constructions aéronautiques du Sud-Est (SNCASE).

En 1943 fut construite une soufflerie basses vitesses dans laquelle furent réalisés les essais des avions SO 30 et SO 6000 ainsi que, plus tard, les essais d'atterrissage et de décollage de Concorde. Transférée à l'ONERA en 1949, cette soufflerie ferma en 1978, après des essais préfigurant l'avion spatial Hermès.

À partir de 1948, l'usine proprement dite consacra l'essentiel de son activité à la réalisation d'engins spéciaux, dans le cadre du GTC (Groupe technique de Cannes). Ce GTC fut intégré en 1957 dans Sud-Aviation, après la réunion de la SNCASE et de la SNCASO, puis à la SEREB en 1959.

C'est à cette époque que, avec l'aide du Service technique aéronautique et sous la responsabilité de Roger Béteille, furent décidés les premiers gros investissements d'essais tels que pots vibrants, chambre acoustique, chambre à vide, moyens informatiques, permettant des simulations de vol pratiquement identiques à la réalité.

À partir de 1970, à la naissance d'Aérospatiale, l'établissement de Cannes oriente son activité vers les case d'équipements des missiles balistiques MSBS et SSBS et vers les satellites. Cette orientation va entraîner le développement de moyens d'essais importants pour permettre de créer, intra muros, des conditions semblables à celles de l'environnement dans lequel opèrent les équipements de missiles balistiques et les satellites, afin de les qualifier "bons pour lancement".

Mais, après plusieurs stades de développement, ce n'est qu'en 1990 que fut décidée la constitution d'un véritable ensemble d'intégration de satellites doté de tous les moyens d'assemblage et d'essais.

En 1998, la réunion des activités satellites de Aérospatiale, Alcatel, Thomson-CSF donne naissance à Alcatel-Space dont dépend aujourd'hui l'unité de Cannes-La Bocca.

3.2. Les moyens

Le complexe d'intégration et d'essais de satellites de Cannes est un vaste ensemble d'environ 4 000 mètres carrés, constitué d'une salle blanche (classe de propreté 100 000) et de moyens d'essais et d'assemblage :

- deux chambres de simulation vide spatial, l'une de 70 m3 et surtout l'autre de 550 m3, compatible avec la taille des gros satellites, réalisée en 1994 ;
- un générateur électrodynamique de vibrations de grande puissance ;
- une chambre acoustique réverbérante réalisée en 1980 ;
- des moyens de mesure de masses, d'inerties, de centrages… ;
- une chambre de compatibilité électromagnétique, dont le domaine de mesure courant va de 10 kHz à 40 GHz, pouvant être porté à 385 GHz ;
- enfin, une base compacte de mesures radioélectriques des antennes simulant le fonctionnement en orbite des charges utiles de télécommunications dans un domaine de fréquences de 1,4 GHz à 100 GHZ, extensible à 500 GHz. Cette base compacte a un volume de 6 000 m3 et une surface au sol de 500 m2. Elle a été réalisée et mise en service en 1994.

Avec ces installations, ce sont six à huit satellites par an qui peuvent être testés, ce qui permet de réduire considérablement la durée de réalisation et de mise au point des programmes commerciaux, durée qui est un facteur essentiel d'amélioration de la compétitivité de l'entreprise.

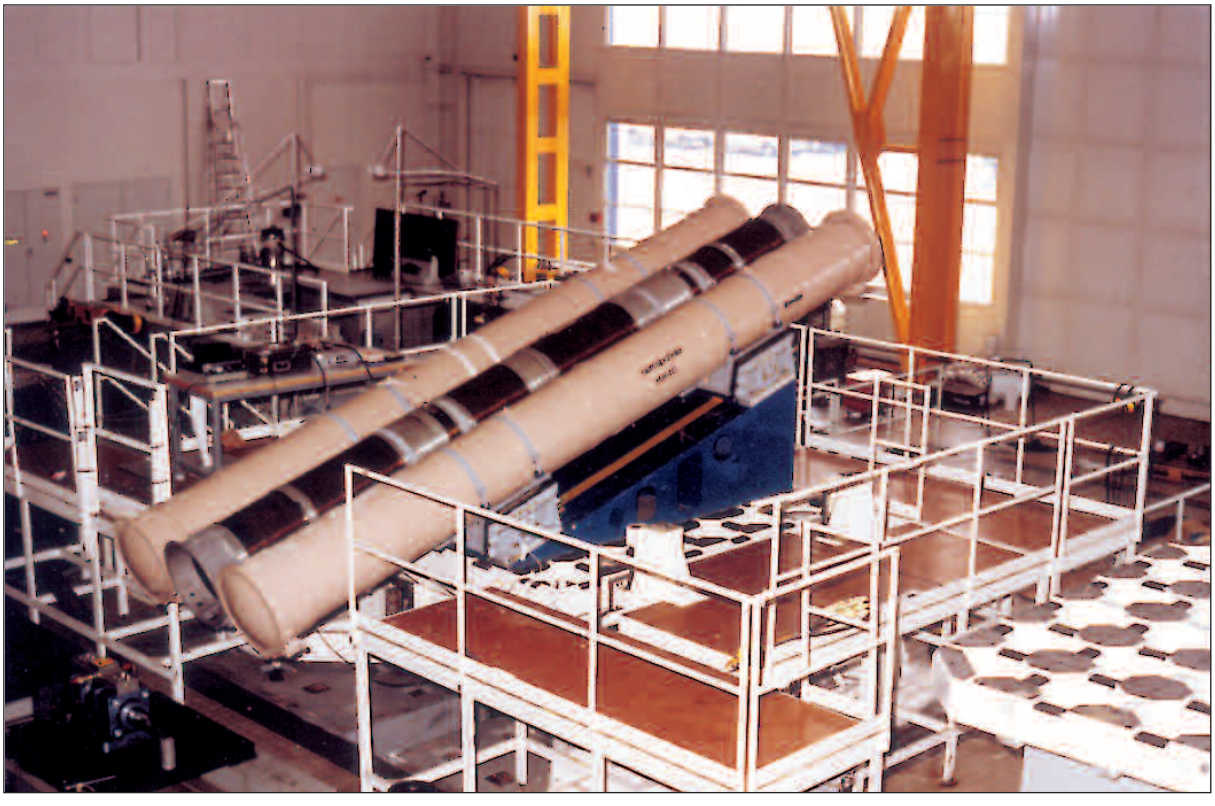
3.3. L'opérateur Alcatel Space

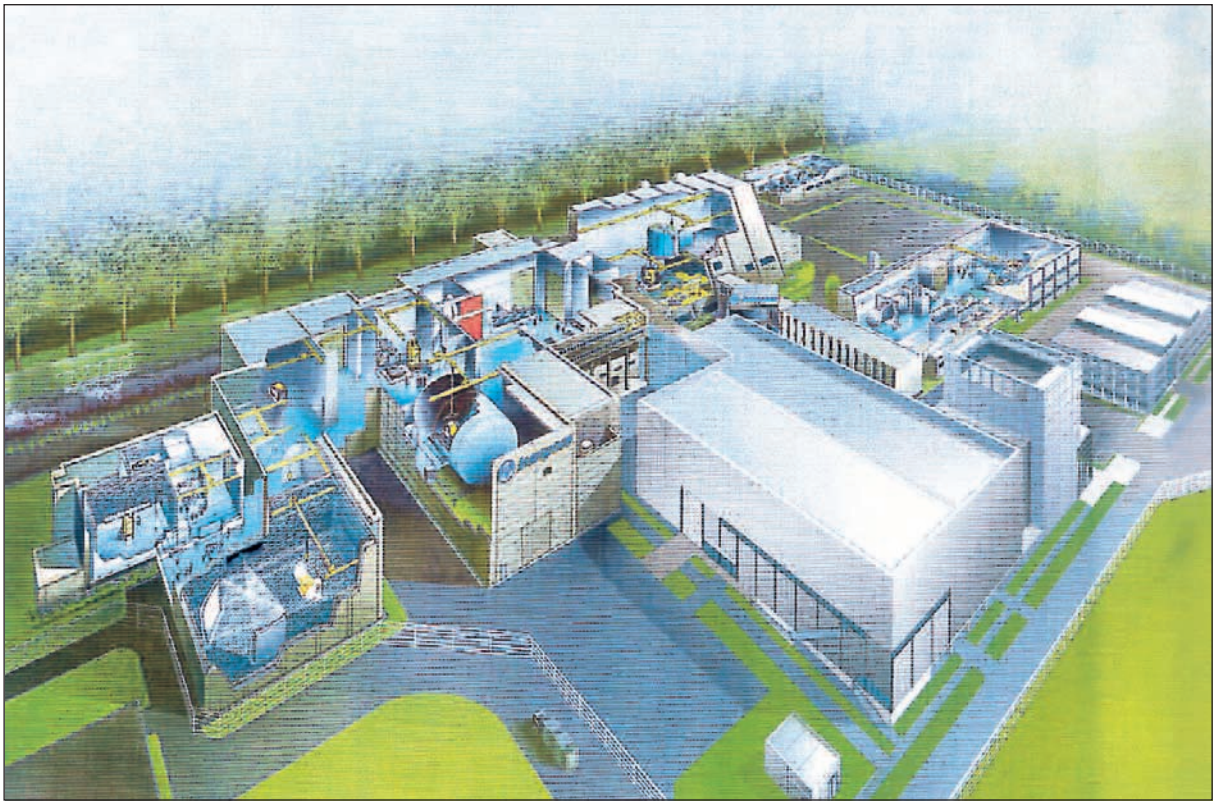
Depuis le 1er juillet 1998, le site de Cannes-La Bocca dépend d'Alcatel-Space, issue de la fusion des activités satellites d'Aérospatiale, Alcatel, Thomson-CSF, dont Alcatel détient 51 % des parts et Thomsom-CSF (devenue Thales) 49 %. Avec un chiffre d'affaires dépassant 15 milliards de francs en 2000, Alcatel-Space prend place parmi les grands réalisateurs mondiaux de systèmes spatiaux et assure ainsi la pérennité de l'activité du laboratoire spatial de Cannes-La Bocca.

Marcel CADO

SOPEMEA Villacoublay – Analyse modale du Mirage.

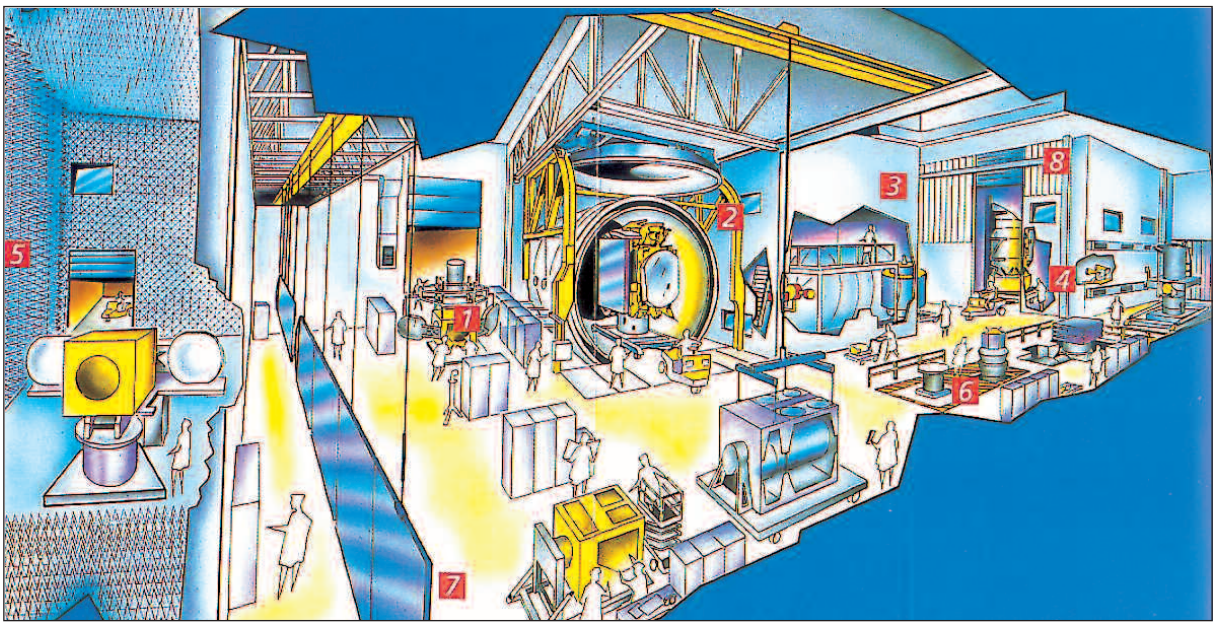
SOPEMEA Villacoublay – Essais d'un missile aux vibrations





Moyen d'essais d'Intespace à Toulouse. Vue des laboratoires.

Le complexe d'intégration et d'essais des satellites d'Alcatel Space à Cannes.
1- Salle d'intégration et d'essais en atmosphère ultra propre classe 100 000
2 et 3 - Chambres de simulation spatiale
4 - Vibreur électrodynamique
5 - Base compacte de mesure d'antennes
6 - Moyens de mesure des masses, des centrages et des axes d'inertie
7 - Rail de déplacement des générateurs solaires
8 - Chambre anéchoïde.



ANNEXE B 7

LE RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL DES ÉQUIPEMENTS AÉROSPATIAUX DE DÉCEMBRE 1975

Créé par décision du délégué ministériel pour l'armement en date du 13 avril 1970, le groupe de travail des équipements aérospatiaux avait pour mission "d'étudier le problème des évolutions souhaitables dans le secteur de l'industrie des équipements aéronautiques et, dans un stade ultérieur, de proposer les actions propres à réaliser les évolutions ainsi définies".

Ce groupe de travail, dont la présidence avait été confiée à la DPAI, était composé de représentants des directions ou services de la DMA intéressés ainsi que du Contrôle général des armées et du Secrétariat général à l'aviation civile. Il formula ses recommandations dans deux rapports :

– le premier, en date du 7 décembre 1970, portait sur les équipements de conduite et de gestion du vol ;
– le second, en date du 16 avril 1971, traitait des autres sous-secteurs.

En novembre 1974, le groupe fut réanimé pour :

– faire le point de la restructuration du secteur des équipements ;
– réviser certaines orientations pour tenir compte de l'évolution du contexte, tant international que national ;
– acquérir une unité de vue des services concernés face à une profession peu encline à évoluer ;
– élargir le champ de l'étude aux équipements pour engins.

Cette révision de l'étude devait aboutir avant la fin de 1975 pour permettre des mesures concrètes avant le lancement de l'éventuel nouveau programme d'avion de transport civil.

1. LE CHAMP DE L'ÉTUDE

Le champ de l'étude couvrait les équipements hydrauliques, mécaniques, électriques, informatiques, à usage civil ou militaire, montés à bord d'avions, d'hélicoptères ou de missiles. N'étaient pas compris des éléments liés à la structure du véhicule (pneumatiques, sièges, etc.), ni les matériels spécifiquement militaires tels que les radars ou les armes, ni enfin les équipements de radiocommunication.

Par "secteur des équipements aérospatiaux", le groupe entendait toutes les entreprises produisant, à titre principal ou non, ces équipements. Les constructeurs d'avions, d'hélicoptères de missiles, de moteurs qui produisaient eux-mêmes ces équipements, étaient donc concernés, pour cette partie de leur activité.

En 1974, ce secteur comprenait environ 60 entreprises, employant, au total, 20 000 personnes. Leur chiffre d'affaires global était de 2 200 MF, soit environ 5 % de celui du monde occidental. Les sociétés d'équipements, généralement de petite taille, étaient peu diversifiées. Plus de 90 % de leur production était destinée aux avions ou aux missiles de conception française, d'où une extrême dépendance à l'égard des maîtres d'œuvre, principalement SNIAS et AMD-Breguet. Environ 22 % de l'activité était à destination civile.

Cette activité était fortement exportatrice (55 % de la production de 1973 avait été exportée), grâce à l'exportation indirecte. En contrepartie, la pénétration étrangère sur le marché français était de 15 % sur les matériels militaires et de 90 % sur les matériels civils (principalement les avions de transport commercial).

Cependant ces succès à l'exportation ne devaient pas être considérés comme une preuve suffisante de la bonne compétitivité de l'industrie des équipements, notamment en matière de prix des équipements pour l'aviation commerciale.

Le groupe de travail considéra que l'industrie française des équipements était compétitive pour les pilotes automatiques et les instruments de bord, l'appareillage électrique embarqué et qu'elle pouvait le devenir pour les autres équipements, à l'exception des entraînements hydrauliques à vitesse constante, les pompes à carburant pour gros turboréacteurs, le conditionnement d'air pour avion gros porteur, les APU de grande puissance.

Le groupe de travail analysa la conjoncture politique mondiale qu'il caractérisa par :
– l'absence de progrès vers la constitution d'une industrie aéronautique européenne ;
– la faiblesse du dollar ;
– la crise durable du transport aérien ;
– la précarité de nos exportations militaires.

2. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Au plan national, le groupe constata :
– la diminution, depuis 1970, des commandes de l'État en matière d'études générales ;
– le faible nombre de programmes militaires nouveaux : au mieux l'ACF et le Breguet Atlantic Mk 2, l'hélicoptère d'attaque futur, le missile M 4, et éventuellement l'ASMP ;
– la possibilité de lancement d'un avion de transport civil en 1976, en dehors du Falcon 50.

Le contexte technique était, selon le groupe de travail, caractérisé par :
– la banalisation de l'utilisation de l'électronique et du calcul numérique ;
– le développement de l'activité systèmes qui devrait être prise en compte par les équipementiers.

En conséquence, le groupe recommanda :
– de rééquilibrer l'attribution des crédits d'études en faveur du secteur des équipements ;
– de procéder, par sous-secteur, à l'examen de la situation en ce qui concernait la concurrence et la dépendance vis-à-vis de l'étranger.

Les orientations essentielles répondaient aux nécessités de :
– -sauvegarder la capacité de concevoir et de produire ;
– élargir la pénétration du marché international ;

– réduire la dispersion ;
– promouvoir la compétence “systèmes” ;
– supprimer les duplications.

Il en résultait, selon le groupe de travail, que les services officiels devaient accroître les moyens d’action, et notamment :
– les crédits d’études générales et de développement ainsi que d’industrialisation, qui devaient être octroyés de manière sélective en fonction des objectifs précités ;
– les interventions au stade des capitaux propres et à celui des prêts ;
– les aides en nature, telles que les prestations d’essais ;
– les actions incitatives, notamment lors des difficultés financières des sociétés, des menaces de prise de contrôle par des groupes étrangers, etc.

Le rapport comporte des annexes qui analysent, de façon détaillée, la compétitivité dans les différents sous-secteurs. Il comprend également des monographies de 35 sociétés françaises et de six groupements d’intérêt économique relatifs aux équipements aéronautiques.