

COMAERO
COMITE POUR L'HISTOIRE DE L'AERONAUTIQUE

UN DEMI-SIÈCLE D'AÉRONAUTIQUE EN FRANCE

ÉTUDES ET RECHERCHES

Ouvrage coordonné par Jean-Marc Weber

TOME I

Ouvrage édité par le Centre des hautes études de l'armement
Division Histoire de l'armement
2008

La mise en forme de cet ouvrage a été assurée à la Division Histoire de l'armement
par Françoise Perrot, Jean-Sébastien Dewallers et Patrice Bret.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	3
---------------------------	----------

PARTIE I - LES SERVICES AÉRONAUTIQUES DE L'ÉTAT ET LA RECHERCHE .

CHAPITRE 1

LA DGA : ASPECT INSTITUTIONNEL ET FONCTIONNEL.....	13
1 - Les institutions aéronautiques ministérielles en 1945.....	13
2 - Les écoles aéronautiques d'État et l'ouverture vers la recherche, après 1945	14
3 - La recherche institutionnelle après 1945 et avant la création de la DMA.....	16
4 - La création en 1961 de la DMA et la recherche de Défense.....	18
4.1 - La DRME, ses missions, son organisation	18
4.2 - La création et les missions du Centre de prospective et d'évaluations	19
4.3 - La programmation des recherches de Défense	20
4.4 - De la DRME à la DRET (1977).....	20
4.5 - Le Conseil des recherches et études de Défense (CRED)	21
4.6 - Le Conseiller scientifique du ministre (1977-1986).....	22
4.7 - Le fonctionnement de la DRME-DRET (1981-1997).....	23
5 - Les directions techniques de la DMA/DGA et les études amont aéronautiques (1981-97)	24
5.1 - Les transferts et les développements exploratoires	25
5.2 - La fin des PPRE et PPDE	26
6 - Services ou établissements rattachés à la DRME, puis à la DRET	27
6.1 - Services centraux.....	27
6.2 - L'ETCA, Établissement technique central de l'armement.....	28
7 - Établissements publics sous tutelle de la DRME puis de la DRET	30
7.1 - L'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL).....	30
7.2 - L'ONERA, Office national d'études et de recherches aérospatiales.....	32
8 - Le Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques (LRBA)	41
9 - Remarques sur le dispositif de gouvernance	44

CHAPITRE 2

LES RELATIONS DE LA DGA AVEC LES AUTRES INSTITUTIONS.....	47
1 - Les relations avec la DGRST et la recherche civile	47
2 - Les instituts de mécanique des fluides et les souffleries (hors ONERA).....	49
3 - La coopération internationale en recherche.....	54

PARTIE II LES ÉTUDES ET RECHERCHES PAR DOMAINE

CHAPITRE 1

AVIONS	65
1 - Aérodynamique.....	65
1.1 - Aérodynamique des avions de transport.....	66
1.2 - Aérodynamique des avions de combat	66

2 - Mécanique du vol, commandes de vol électriques et contrôle automatique généralisé	69
3 - Structures : Conception générale	70
3.1 - Première phase : de 1945 à 1970	70
3.2 - Deuxième phase : à partir de 1970	71
4 - Structures : fatigue, fail safe et tolérance aux dommages	72
5 - Aeroélasticité et flottement.....	77
6 - Moyens de calcul	78
 CHAPITRE 2	
TURBOMACHINES AERONAUTIQUES	81
1 - La recherche à SNECMA.....	84
1.1 - Aérodynamique des compresseurs et des soufflantes.....	84
1.2 - Aeroélasticité des compresseurs.....	86
1.3 - Aerothermodynamique des turbines.....	89
1.4 - Combustion	90
1.5 - Entrée d'air et tuyère	92
1.6 - Technologie des compresseurs	95
1.7 - Technologie des turbines	95
1.8 - Discrétion	96
1.9 - Régulation	99
2 - La recherche à Turboméca.....	99
3 - Témoignages : Préparation du renouveau pour les moteurs de forte puissance (1950-1970)	105
3.1 - Les compresseurs : un domaine d'excellence SNECMA	105
3.2 - La combustion : Une tradition SNECMA	109
3.3 - La post-combustion ou réchauffe	113
3.4 - Une discipline nouvelle : L'acoustique.....	114
3.5 - La fondation des avant-projets et études générales.....	115
 CHAPITRE 3	
MISSILES TACTIQUES	119
1 - Les statoréacteurs	119
2 - Les thèmes de propulsion.....	120
3 - Le guidage et le pilotage.....	121
 CHAPITRE 4	
MATERIAUX ET PROCÉDÉS (CELLULES ET MOTEURS).....	123
1 - Matériaux.....	123
1.1 - Période 1945 – 1970.....	123
1.2 - Période 1970 – 1990/2000.....	127
2 - Procédés.....	142
2.1 - Techniques de mise en forme	142
2.2 - Assemblage	144
2.3 - Les traitements de surface	145
 CHAPITRE 5	
EQUIPEMENTS	147
1 - Composants optroniques et électroniques.....	147
1.1 - Les lasers.....	147

1.2 - Les composants pour la microélectronique et l'optronique.....	148
1.3 - Lutte anti-sous-marine.....	150
2 - Avionique générale et intégration (PNI, AVI)	150
2.1 - Microprocesseurs et calculateurs	151
2.2 - Les commandes de vol électriques	151
2.3 - Les capteurs.....	152
2.4 - Les systèmes inertiels	152
2.5 - Intégration	154
2.6 - Radiocommunication, Navigation et Identification	156
3 - Les développements systèmes dans les avions civils	157
3.1 - Caravelle	157
3.2 - Concorde.....	158
3.3 - Les CDVE.	159
3.4 - EPOPEE	159
4 - Les radars aéroportés de conduite de tir	162
4.1 - Historique	162
4.2 - Les premiers radars aéroportés	162
4.3 - Le radar Cyrano	163
4.4 - Radars doppler pour Mirage 2000.....	164
4.5 - Le radar RBE 2 pour Rafale	166
4.6 - Expérimentation des radars	167
5 - Ergonomie des postes d'équipage : interface homme-machine et facteurs humains	168
 CHAPITRE 6	
EFFETS ATMOSPHÉRIQUES ENVIRONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE....	171
1 - La foudre.....	171
2 - Le givrage des aéronefs	173
 CHAPITRE 7	
IMPACT DU TRAFIC AÉRIEN SUR L'ENVIRONNEMENT	177
1 - Historique de la réglementation	177
2 - Le bruit.....	177
3 - Le bang sonique	178
4 - L'impact sur l'atmosphère	180
4.1 - Évolution du trafic aérien.....	183
4.2 - Les effluents du trafic aérien et leurs effets.....	184
4.3 - Les effluents majoritaires (gaz carbonique et vapeur d'eau)	184
4.4 - Les effluents minoritaires	186
4.5 - Effets sur l'ozone.....	187
4.6 - Effets sur l'air aéroportuaire	188
4.7 - Contribution du trafic aérien à l'effet de serre anthropique.....	189
4.8 - Conclusion concernant l'impact sur l'environnement.....	191
 CHAPITRE 8	
L'ÉVOLUTION DES RECHERCHES.....	193
1 - L'évolution vers les systèmes	194
1.1 - Des équipements de bord aux systèmes	194
1.2 - L'aéronautique militaire	194
1.3 - L'aéronautique civile.....	196

2 - Les acquis dus au programme Concorde	198
3 - La dualité militaire/civile en recherche aéronautique	200
4 - Le tronc commun entre l'Aéronautique et le Naval	204
4.1 - Mécanique des fluides.....	204
4.2 - Télécommunications et Détection	205
5 - Les perspectives.....	206
 RAPPEL HISTORIQUE SUR LES DÉBUTS DE L'ESPACE EN FRANCE	 209
BIBLIOGRAPHIE.....	221

SOMMAIRE DU TOME II

PARTIE III - ONERA

CHAPITRE 1 - AVIONS

- 1 - Recherches duales
- 2 - Recherches appliquées aux avions militaires
- 3 - Recherches appliquées aux aéronefs civils
- 4 - Les moyens

CHAPITRE 2 - HELICOPTERES

- 1 - Historique sur les hélicoptères et leurs technologies
- 2 - Recherches sur les hélicoptères menées par l'ONERA
- 3 - Qualités de vol et pilotage des hélicoptères

CHAPITRE 3 - MISSILES ET SYSTÈMES MILITAIRES

- 1 - Études et recherches relatives aux missiles nucléaires
- 2 - La saga des statos à l'ONERA
- 3 - Études et recherches relatives aux missiles tactiques
- 4 - Études et recherches relatives aux systèmes de défense

CHAPITRE 4 - ESPACE

- 1 - Introduction
- 2 - Lanceurs
- 3 - Rentrée atmosphérique
- 4 - Satellites : technologies des plates-formes
- 5 - Charges utiles
- 6 - Surveillance de l'espace

BIOGRAPHIES DE PERSONNALITÉS ÉVOQUÉES

BIOGRAPHIES DES CONTRIBUTEURS

PRINCIPAUX SIGLES UTILISÉS

INDEX DES NOMS CITÉS

INTRODUCTION

Le présent ouvrage traite des études et recherches aéronautiques, des institutions chargées de les promouvoir et des organismes qui les exécutent.

La recherche de défense joue un rôle essentiel dans l'équipement de nos forces. Indépendamment de ses retombées multiples sur le secteur civil, elle a des effets déterminants sur l'efficacité de notre politique de défense. Sans les acquis de la recherche et sans les transferts à l'industrie, il n'y a pas de développement performant possible au niveau national, donc pas d'assurance que les matériels de défense les plus évolués puissent être approvisionnés en toute indépendance sans risque d'embargos. Par ailleurs, le levier de politique étrangère que constituent les exportations d'armement n'est manœuvrable que s'il existe des technologies nationales librement utilisables. Enfin dans une dynamique de coopération, les échanges techniques sont d'autant plus valorisés qu'ils sont à double sens, suivant la règle du donnant-donnant. En ce qui concerne l'aviation civile, une compétition sévère ne cesse de s'accroître tant au niveau des performances qu'à celui des prix, des délais et des services, exigeant toujours le recours à davantage de recherche.

Parmi les progrès accomplis par l'aviation dans les années précédant la seconde guerre mondiale, on peut citer, à titre d'exemples : pour la cellule, le train rentrant, les volets hypersustentateurs et l'alliage léger ; pour la propulsion, l'hélice à pas variable, le compresseur de suralimentation, le capotage des moteurs ; pour les équipements, l'instrumentation Badin (anémomètre et indicateurs de contrôle de vol), les débuts du pilotage sans visibilité et du pilote automatique. La période de guerre 1939-45 voit, à l'étranger, le développement de la navigation radioélectrique, du radar, de la propulsion par réaction, et des missiles.

L'évolution technique des matériels aéronautiques s'est longtemps appuyée sur les trois disciplines de base que sont l'aérodynamique, l'énergétique et la résistance des structures. À partir des années 1960, de nouvelles disciplines telles que l'automatique, l'électronique, l'informatique et l'optique se sont progressivement ajoutées aux précédentes, les valorisant et donnant à toute étude ou recherche aérospatiale un caractère pluridisciplinaire. À partir des années 1970, la puissance sans cesse croissante des calculateurs scientifiques et l'évolution des techniques de modélisation ont fourni, avec l'expérimentation, des outils indispensables à l'optimisation de tout matériel. Sur ces deux aspects, la pluridisciplinarité et la dualité calcul-essais, la recherche aérospatiale a fait œuvre de pionnier.

Grâce aux progrès de l'informatique et à ceux des techniques de simulation et d'instrumentation, des moyens d'analyse, de modélisation, de calcul et d'essais insoupçonnables à l'époque des premiers avions à réaction d'après-guerre sont aujourd'hui consacrés aux études et recherches aéronautiques. Ces moyens permettent d'avancer plus rapidement et avec davantage de probabilités de succès dans les voies nouvelles.

*
* *

La première partie de cet ouvrage est consacrée aux institutions ayant trait à la recherche aéronautique. Après un retour sur l'avant-1945 et l'origine de la création de l'ONERA en 1946, il est rappelé l'organisation mise en place à la Délégation ministérielle pour l'Armement dans les premières années suivant sa création en 1961. On donne les raisons ayant conduit à créer dans un climat de volonté politique le Centre de prospective et d'évaluations (CPE), ainsi que la Direction des recherches et moyens d'essais (DRME) destinée à jeter les bases d'un rapprochement avec la recherche civile et à accélérer les progrès scientifiques intéressant la Défense.

La DRME recrute pour sa direction, dès le début, d'éminentes personnalités scientifiques, et reçoit pour mission principale d'inciter les laboratoires universitaires et d'écoles d'ingénieurs, les centres de recherches publics ou privés, à travailler pour la Défense, en concertation avec l'industrie, l'ONERA et les services techniques de l'État. Ces actions concertées sont destinées à donner lieu à des résultats transférables dans les directions techniques : la Direction technique des constructions aéronautique (DTCA), qui, au début des années 1970, voit croître l'importance des travaux préparatoires nécessaires au lancement de ses prototypes en bénéficie particulièrement. Prend alors naissance, au sein des études amont, la notion de développement exploratoire (DE) dont l'intérêt va grandissant au point que le ratio financier DE/RE (RE=recherche) atteindra l'unité dans les années 1980 pour la DTCA. Dans la première partie, on décrit également le rôle joué par les établissements de recherche étatiques (LRBA) ou sous tutelle (ONERA, ISL) nés en 1946, ainsi que les instituts universitaires de mécanique des fluides fondés en 1930 à l'initiative d'Albert Caquot.

Dans une seconde partie, on dresse un panorama des progrès réalisés dans l'aéronautique, grâce à l'important effort de recherche consenti par l'État. On montre, dans le cas exemplaire du programme Rafale-M88, l'intérêt d'avoir lancé suffisamment tôt les études préparatoires. On décrit les études amont lancées par la DMA dans l'industrie en concertation avec les organismes de recherche, dont l'ONERA, dans les domaines suivants : avions (avec la participation de Daniel Chaumette et Pierre Lecomte), turbomachines (Alain Habrard, Alain Calemard, Georges Meauzé, suivi du témoignage de Jean Calmon), missiles tactiques (Bernard Laurent), matériaux (Michel Brun, coordinateur), équipements (Pierre Samson pour l'avionique, suivi du témoignage de Pierre Lecomte). Elle se termine par des synthèses de Jean Carpentier sur l'évolution des recherches (les systèmes, la dualité militaire/civile, le tronc commun entre l'aéronautique et le naval), sur l'environnement et sur les débuts de l'espace en France.

Dans la troisième partie, l'ONERA ayant été le principal exécutant des recherches aéronautiques depuis 1946, il a été jugé utile de présenter avec plus de détails son action dans les domaines principaux suivants où elle s'est exercée, et où son influence sur l'évolution de l'aéronautique et de l'espace en France a été prépondérante : avions (par Jean-Pierre Marec), hélicoptères (par Jean-Jacques Philippe), missiles et systèmes militaires (par Philippe Cazin) et espace (par Anne-Marie Mainguy). Il faut mentionner que, pour des raisons pratiques, l'activité de l'ONERA relative aux turbomachines, faite par Georges Meauzé, se trouve décrite avec celle de l'industrie en partie II, et que, par contre, l'activité détaillée de l'ONERA relative aux hélicoptères (par Jean-Jacques Philippe) en partie III comprend une contribution de l'industrie (avec la participation de deux anciens de la division

hélicoptères de l'Aérospatiale : René Mouille et Jean-Pierre Dubreuil, ainsi que de Marcel Kretz). Les contributions de l'ONERA ont été considérables et très en pointe en coopération avec celles d'autres organismes et surtout des industriels, ce qui rend concret et directement utilisable le travail des chercheurs. C'est un des éléments très positifs de l'action de la DGA.

Le présent volume présente évidemment une relation directe avec les volumes COMAERO déjà parus concernant les avions, moteurs, équipements et missiles tactiques, puisqu'il s'agit ici d'études amont ayant leur aboutissement dans ces principaux domaines techniques.

Le coordinateur tient à remercier chaleureusement les contributeurs cités ci-dessus, ainsi que les ingénieurs généraux Marcel Bénichou et Michel Lasserre qui ont bien voulu corriger et apporter des améliorations à son texte. Il tient à remercier tout spécialement, et avec beaucoup de reconnaissance, l'ingénieur général Jean Carpentier qui lui a apporté une aide précieuse.

Sur le plan des archives, il remercie Jean-Pierre Cornand et Marie-Hélène Fouché, du Service technique aéronautique, ainsi que Martine Destouches, Jacques Fauriel et Patrick Epinoux du Centre des archives de l'Armement de Châtellerault.

Nous tenons tous, contributeurs et coordinateur, à exprimer notre gratitude à l'ingénieur général Jean-Pierre Moreau, chef de la division Histoire de l'Armement, à Patrice Bret, responsable scientifique de ce département, à Françoise Perrot et à Jean-Sébastien Dewallers, qui ont assuré la mise en forme et l'édition de cet ouvrage.

PARTIE I

**LES SERVICES AÉRONAUTIQUES DE L'ÉTAT
ET LA RECHERCHE**

CHAPITRE 1

LA DGA : ASPECT INSTITUTIONNEL ET FONCTIONNEL

1 - LES INSTITUTIONS AERONAUTIQUES MINISTERIELLES EN 1945

Les origines de la direction de l'Aéronautique

La gestion au nom de l'État d'une activité de construction aéronautique se développant dans l'industrie a toujours relevé de *la direction chargée de l'aéronautique*¹. C'est *Albert Caquot*² qui en prend la direction en 1928 lors de la constitution du premier ministère de l'Air, dirigé par André Laurent-Eynac, et qui, le premier, donne une véritable impulsion à la recherche : il crée dès son arrivée, à côté de la Section technique aéronautique qui existe depuis 1916 et qu'il a dirigée en 1918, un Service des recherches qu'il anime directement. Il est le premier à donner une véritable impulsion à la recherche, provoque (avec Henri Villat et Joseph Pérès*) la fondation dans l'université des premiers instituts de mécanique des fluides, décide la construction de souffleries (dont la grande soufflerie de Chalais Meudon achevée en 1934) et lance l'étude de nombreux prototypes d'avions militaires. Il fait nationaliser en 1930 l'École supérieure d'aéronautique et l'implante dans l'enceinte de la Cité de l'Air. Après son départ en 1934, le Service des recherches (IG Seguin) fusionne avec le Service technique (IG Henri Robert) pour former le Service technique et des recherches scientifiques (dirigé de 1936 à 1939 par l'IG Etienne Joux puis par l'IG Paul Jouglard). Les établissements sur lesquels s'appuient ces services sont l'EETIM, Établissement d'expériences techniques d'Issy-les-Moulineaux, l'Établissement de Chalais-Meudon avec la station d'essais des moteurs (déménagée en 1937 à Orléans-Bricy), la Section des essais en vol de Villacoublay (devenant en 1934, avec le groupe des avions nouveaux de l'armée de l'Air, le CEMA, Centre d'essais des matériels aériens).

En 1944-1945, la *Direction technique et industrielle de l'aéronautique* (DTI), redéploie l'activité de ses établissements en vue d'aider à faire renaître notre industrie d'après guerre : c'est ainsi que sont implantés *trois nouveaux centres d'essais* : le Centre d'essais en vol à Brétigny sur Orge à partir de 1944, le Centre d'essais aéronautique de Toulouse à partir de 1949 pour les essais de cellules et d'équipements, le Centre d'essais des propulseurs à Saclay à partir de 1950 pour les essais en atmosphère simulée. Elle les dote de nouveaux moyens d'étude et d'essai, qui seront mis à la disposition de l'industrie française et joueront un rôle majeur dans son développement.

Par ailleurs, les pouvoirs publics décident en 1945 de « rassembler au sein d'un organisme public l'ensemble des moyens de recherche appartenant à l'État » :

¹ Direction créée en 1914 par le Ministre de la guerre sous le nom de Direction de l'aéronautique militaire ; devenue en 1938 Direction technique et industrielle de l'aéronautique, appelée « la DTI » (l'évolution des structures aéronautiques de l'État est décrite par Jean Soissons dans l'annexe à l'ouvrage introductif *Un demi-siècle d'aéronautique en France* de COMAERO (département d'histoire du CHEAr, 2003)

² Savant et bâtisseur, Albert Caquot* (1881-1976) fut un grand serviteur de l'État. L'astérisque (*) renvoie aux notices biographiques en fin de volume.

d'éminentes personnalités scientifiques³ en sont à l'origine, convaincus que « la France pouvait encore nourrir l'ambition de se constituer une aviation moderne ». La loi du 3 mai 1946 donne naissance à l'*Office national d'études et de recherches aéronautiques* (ONERA), placé sous l'autorité du ministre des Armées. On peut souligner, à ce propos, que l'aéronautique est un des rares domaines industriels où il a été jugé utile, en créant l'ONERA, de faire massivement une recherche d'État (cf. au paragraphe ONERA l'exposé des motifs du législateur)⁴.

2 - LES ECOLES AERONAUTIQUES D'ÉTAT ET L'OUVERTURE VERS LA RECHERCHE, APRES 1945

Les ingénieurs d'État de branche aéronautique ont été et sont toujours formés dans les deux grandes écoles que sont SUPAERO et l'ENSICA. Un bref historique est donné sur ces écoles d'ingénieurs à spécialités aéronautiques, d'origine privée.

SUPAERO - École nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace

Née législativement le 30 décembre 1928, l'École nationale supérieure de l'aéronautique voit son organisation fixée par décret du 21 mai 1930, et son enseignement, commencé le 20 octobre 1930. Elle succède à l'École supérieure d'aéronautique et de construction mécanique, fondée à Paris par le Colonel Jean-Baptiste Roche en 1909, qui assurait la formation des ingénieurs civils et, depuis 1924, celle du corps spécialisé des ingénieurs de direction de l'aéronautique⁵. Relevant du ministère de l'Air, elle est directement rattachée à la Direction chargée de l'Aéronautique depuis sa création en 1924.

Ses directeurs sont successivement, à leur date de prise de fonctions, les ingénieurs généraux Charles Grard (1930), Henri Robert (1934), Gaston Labussière (1937), Georges Harlaut (1941), Pierre de Valroger (1953), Gonzague Bosquillon de Jenlis (1966). Faisant l'objet avec l'ENAC et le CNES d'une opération combinée de décentralisation, elle est installée depuis 1968 sur le « complexe aérospatial » de Toulouse-Lespinet. Elle étend progressivement son domaine au spatial, devient en 1972 École nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace, et en 1994 prend le statut d'établissement public à caractère administratif, sous tutelle de la Défense, doté d'un conseil d'administration.

Chargé en 1965 du transfert de l'école, l'IG Marc Pélegrin a voulu, en s'inspirant du célèbre MIT et des campus américains, associer l'enseignement donné à l'école à de vastes laboratoires de recherche, voie que choisiront plus tard nos autres grandes écoles françaises. C'est ainsi qu'est né, près de l'école, le Centre d'études et de

³ réunies au sein d'un conseil constitué par le ministre de l'Air et composé, entre autres, de Louis de Broglie, du professeur Joseph Pérès, de Maurice Roy, des ingénieurs généraux de l'air Paul Dumanois et Maurice Suffrin-Hébert.

⁴ À la remarque d'une personnalité qui, récemment, demandait : « pourquoi l'ONERA ? Il n'y a pas d'ONERA en électronique », la réponse était parce qu'il y a une NASA et qu'il faut bien mettre notre industrie sur un pied d'égalité.

⁵ Le corps créé en 1924 est civil, puis, militarisé en 1945, devient celui des ingénieurs militaires de l'air (IMA), avant de fusionner en 1968 dans le corps des ingénieurs de l'armement.

recherches de Toulouse (CERT), qui sera progressivement formé de sept départements et rattaché, moyennant une coordination demandée par la DGA, à l'ONERA. L'IG Pélegrin dirige l'ensemble SUPAERO et CERT de 1970 à 1978⁶ et, sous son impulsion, SUPAERO, devient centre de formation à la recherche, qui sera habilité à partir de 1975 à délivrer de façon autonome un diplôme de doctorat.

Le premier des sept départements, créé en 1970, le DERA (département d'études et de recherches en automatique) a son origine dans le CERA (centre d'études et de recherches en automatique) créé en 1962 par deux jeunes brillants ingénieurs militaires de l'air Jean-Charles Gille⁷ et Marc Pélegrin qui se sont initiés aux États-Unis en complément de leur formation à SUPAERO en 1948 et 1950 dans les disciplines nouvelles et balbutiantes qu'étaient à l'époque l'automatique, les asservissements et l'informatique. Ils les enseignent dès leur rentrée en France et sont les premiers à coupler ainsi la recherche à l'enseignement. S'y illustrent des ingénieurs SUPAERO civils, tels André Fossard⁸ (promo 1958) et Jacques Richalet (promo 1960) qui créeront l'ADERSA/GERBIOS⁸. L'automatique débouche ensuite sur toutes sortes d'applications : robotique, ateliers flexibles, commandes de processus, transmissions de puissance, servocommandes etc et fera partie intégrante des études systèmes. Se créent ainsi bientôt des sociétés conseils et de services, type SSII, telles que la SESA⁹ (en 1964 par Jacques Stern, ingénieur de l'air), la SEMA¹⁰ (en 1958 par Jacques Lesourne, X Mines), la STERIA¹¹ (en 1969, avec Henri Cantegreil, X GM, et Jean Carteron, X Télécom) et la CISI¹² (filiale de CEA Industrie).

Le CERMO, Centre d'études et de recherches en micro-ondes, créé à Paris en 1965 comme le CERA grâce à la SAE, Société des amis de l'ENSAé, et à son président de l'époque Albert Caquot, devient le second département, le DERMO ; cinq autres départements d'études et de recherches sont mis sur pied : le DERAT (aérothermodynamique), le DERI (informatique), le DERMES (mécanique et énergétique des systèmes), le DERO (optique) et le DERTS (technologie spatiale). Ils s'adapteront tous à la conduite de travaux multidisciplinaires.

Sont directeurs de l'École, depuis l'IG Marc Pélegrin, les IG (Air) André Flourens (1978), Jackie Ferrandon (1985), Jean-Claude Ripoll (1991), l'IC (GM) Jacques Kerbrat (1995), les IG (Air) Pierre Bascary (1999), José d'Antin Tournier de Vaillac (2004) et l'IG (Elec Terre) Olivier Fourure (2006-2007). Sont nommés présidents du Conseil d'administration depuis que l'école est devenue établissement public : Jean Sollier (1995), Jean Pierson (1997), Philippe Couillard (2003-2007).

⁶ De 1968 à 1970, SUPAERO a eu la double localisation Paris-Toulouse. G. de Jenlis est resté directeur à Paris mais M. Pélegrin a assuré la direction de l'École à Toulouse, sans subordination.

⁷ André Fossard évoque, pages 169-172 du tome II de l'ouvrage COMAERO sur les Equipements, « l'extraordinaire figure que celle de Jean-Charles Gille » (cf. aussi à la page 155 de ce même tome).

⁸ Association pour le développement, l'enseignement et la recherche en systèmes appliqués / Groupe d'études et de recherches en biosystèmes.

⁹ Société d'études des systèmes d'automatisation.

¹⁰ Société d'économie et de mécanique appliquée.

¹¹ Société de réalisations en informatique et en automatisme.

¹² Compagnie internationale des services en informatique.

L'ENTA, École nationale des travaux aéronautiques, est créée en 1945 comme école d'application destinée à donner une spécialisation aéronautique aux ingénieurs militaires des travaux de l'air (auparavant ingénieurs des travaux de l'aéronautique ; corps créé en 1924, et formé de 1930 à 1945 à l'ESTA, École Spéciale des Travaux Aéronautiques¹⁴), qui deviendront en 1968 ingénieurs des études et techniques d'armement. Elle dépend au début de l'ENSA dont elle occupe des locaux Boulevard Victor. Elle appartient à la Direction de l'aéronautique, puis à la DMA lors de sa création en 1961. En 1957, elle s'ouvre aux élèves civils et prend le nom d'ENICA, École nationale d'ingénieurs des constructions aéronautiques. En 1961, elle est la première école transférée à Toulouse, et s'installe près du CEAT. En 1969, elle est rattachée aux concours des ENSI, au premier rang desquelles elle s'élève en 1986. Elle est baptisée ENSICA en 1979. Elle s'ouvre alors à la recherche, s'associant notamment à deux grands laboratoires toulousains, l'IMFT et le LAAS¹⁵, ainsi qu'à l'international (délivrance de mastères depuis 1986, liens avec l'université de Cranfield depuis 1988). En 1994, elle prend le statut d'établissement public à caractère administratif.

Son premier directeur (1945-49) est l'IG Georges Harlaut, en même temps directeur de SUPAERO. L'IG Emile Blouin, directeur (1959-68), assure le transfert de l'École à Toulouse. De 1968 à 1986, le directeur est le même que celui du CEAT (successivement les IG Marc Faury, Louis Pacaud, Michel Dumas). Depuis 1986, des anciens de l'École la dirigent : les ingénieurs généraux Pierre Sintès (1986), Fréson (1994), Bertrand Michaud (2000), Serge Darrenougue (2004-2007)

3 - LA RECHERCHE INSTITUTIONNELLE APRES 1945 ET AVANT LA CREATION DE LA DMA

Après 1945, au niveau national il est progressivement pris conscience de l'importance à donner à la recherche. On peut citer ci-dessous, avant d'aborder la Défense, les principales grandes structures institutionnelles qui en relèvent. Elles ont toutes été placées directement sous l'autorité du Président du conseil ou du Premier Ministre, à l'exception du CNRS, établissement public relevant du ministère de l'Éducation nationale et animant la recherche fondamentale, créé en 1939, régi par une ordonnance de 1945 et une loi de 1948, et atteignant en 1956 un potentiel de 2800 scientifiques. Elles avaient toutes des liens avec la Défense.

Le Comité d'action scientifique de la défense nationale (CASD) créé, par décret du 24 mai 1948, au lendemain d'une guerre qui a vu s'affirmer la suprématie de la technique dans tous les domaines, a pour mission « de coordonner, d'orienter et éventuellement de provoquer les recherches scientifiques intéressant la défense

¹³ Les deux écoles SUPAERO et ENSICA sont regroupées dans l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, créé le 1^{er} octobre 2007 (décret du 24 septembre 2007).

¹⁴ école privée destinée à spécialiser en aéronautique les ingénieurs des Arts et Métiers. Elle prend le nom d'École supérieure des techniques aérospatiales en 1978 et ferme en 1998.

¹⁵ respectivement Institut de mécanique des fluides de Toulouse, Laboratoire d'automatique et d'analyse des systèmes du CNRS dirigé par Alain Costes qui fut nommé en 2002 directeur de la technologie au ministère de la Recherche.

nationale sous l'autorité du Président du Conseil, et dans le cadre des directives générales formulées par le Comité de Défense nationale ». Il propose les éléments d'une politique, définit les besoins et moyens d'y pourvoir, et répartit les tâches entre les départements ministériels intéressés.

C'est ainsi qu'à défaut d'autres institutions, sous la présidence du Général Maurice Guérin, il soutient en 1954-55 auprès des acteurs DEFA, CIEES, CNRS un programme d'expériences scientifiques sur la haute atmosphère à bord de fusées sondes Véronique.

Par décret du 14 septembre 1954, il est constitué un *Conseil supérieur de la recherche scientifique et du progrès technique* mis en place par Henri Longchambon lorsqu'il est, dans un poste nouvellement créé, Secrétaire d'État à la recherche scientifique et au progrès technique. Ce conseil fait appel à des groupements d'experts et est pourvu d'un trop modeste fonds d'intervention. C'est sous l'inspiration de ce conseil qu'une loi du 18 mars 1957 crée une école d'ingénieurs et de techniciens originale par son mode de recrutement et sa pédagogie, l'INSA de Lyon, dont le premier directeur est le recteur J. Capelle. C'est dans un même esprit que l'on verra, dix ans plus tard, la création tout aussi originale de l'Université de technologie de Compiègne (UTC) par Pierre Aigrain*.

L'arrivée du général de Gaulle à la présidence de la République en mai 1958 donne un élan à la Recherche, à l'Espace, à la Défense, et prioritairement au nucléaire en vue de la réalisation de la force nucléaire stratégique (FNS).

Il est rappelé que c'est par une ordonnance du Général de Gaulle du 18 octobre 1945 qu'est créé le *Commissariat à l'énergie atomique*. Pierre Guillaumat, administrateur général du CEA depuis 1951, est nommé ministre des Armées dès l'arrivée du Général en 1958 : il « officialise » alors la *Direction des applications militaires* (DAM), constituée à partir des centres de Vaujours (qui dépendent du CEA et du Service des Poudres) et de B III à Bruyères-le-Châtel (établissement né en 1955) ; le centre de Limeil de la DEFA entre dans la DAM en 1960. Les équipes d'ingénieurs des Poudres à Vaujours et d'ingénieurs des fabrications d'armement à Limeil¹⁶ sont ainsi parmi les pionnières à travailler dans le domaine fondamental de la recherche nucléaire militaire. En 1965 sera mise en service la première arme sur Mirage IV. Suivront les autres composantes sol-sol et mer-sol de la FNS. En 1986 les Mirage IVP, puis en 1988 les Mirage 2000 N et Super-Étendard seront équipés du missile stratégique ASMP et formeront le nouveau type de composante aéroportée de notre force de dissuasion nucléaire. On mesure le chemin parcouru par la France depuis la fin de la guerre.

Par décret du 28 novembre 1958, il est créé un Comité interministériel (Éducation nationale, Industrie, Défense, Finances, Agriculture, Santé) de la recherche

¹⁶ Parmi eux, sont particulièrement à citer : l'IG (TéA) Paul Chanson qui dirige à partir de 1951 la Section atomique de la DEFA, et l'IG (P) Georges Fleury, directeur des Poudres de 1948 à 1958, qui soutient cette voie. Les ingénieurs généraux des Poudres André Cachin, Jean Viard et Jean Berger vont former le trio de base qui dirigera la DAM, auquel il y a lieu d'associer les IG (FA) Paul Bonnet et Michel Carayol. Les centres de Limeil et de Vaujours fermeront en 1995-97. L'Association de l'armement terrestre créera en 1972 le prix « Ingénieur général Chanson » perpétuant le souvenir de ce grand scientifique (X31, décédé le 2 janvier 1970 d'une maladie paralysante) et attribué tous les ans.

scientifique et technique (CIRST) auquel est associé un Comité consultatif de 12 membres que leur compétence et leurs personnalités désignent pour assister l'ensemble des ministres concernés. Ce *Comité consultatif de la recherche scientifique et technique* (CCRST)¹⁷, a besoin d'un secrétariat dont la direction est confiée à un *Délégué général à la recherche scientifique et technique*¹⁸ (DGRST) auprès du Chef du gouvernement puis du Premier ministre ; Pierre Piganiol (ENS 1934) est nommé fin 1958 le premier délégué général. Sous forme de conventions de recherche passées au titre d'un fonds de développement, des *actions concertées* vont pouvoir être lancées, entre recherches fondamentales et appliquées, entre laboratoires publics et privés, entre industriels et universitaires. La DGRST entretiendra des liens privilégiés avec la DRME, son homologue militaire à la DMA, dès sa création en 1961¹⁹.

Le 7 janvier 1959, il est créé un Comité de recherches spatiales ; composé de personnes nommées *ès qualité*, présidé par Pierre Auger, il est chargé d'établir un programme national et de conseiller le gouvernement en matière de politique spatiale. Il rend compte au Premier Ministre par l'intermédiaire du DGRST. Mais il lui est bientôt substitué une structure appropriée : le *Centre national d'études spatiales* (CNES), EPIC placé sous l'autorité du Premier Ministre, est créé par la loi constitutive votée par le Parlement et promulguée le 19 décembre 1961 et le décret d'application du 10 février 1962. Ses activités débutent en mars 1962. Un protocole d'accord est signé le 2 mai 1962 entre le CNES et la DMA pour le développement d'une première version de lanceurs de satellites, le Diamant A, sous maîtrise d'œuvre SEREB. Ceci permet à la France de lancer le 26 novembre 1965, depuis la base d'Hammaguir en Algérie, son premier satellite français Astérix par Diamant A et de devenir la troisième puissance spatiale mondiale (voir à la page 209).

C'est dans cet esprit que le ministre des Armées Pierre Messmer demande en 1960 à une commission présidée par Maurice Ponte, qui, alors président de CSF et président du CCRST, joue un rôle éminent dans l'orientation et les structures de la politique scientifique et technique nationale, de réfléchir au problème des recherches avancées à finalité de Défense.

4 - LA CREATION EN 1961 DE LA DMA ET LA RECHERCHE DE DEFENSE

4.1 - La DRME, ses missions, son organisation

Dans un contexte en pleines mutations techniques lié au développement du nucléaire, des missiles, de l'électronique et de l'espace, il est décidé de regrouper les

¹⁷ Le CCRST (appelé Comité des sages) passe en 1970 de 12 à 16 membres. En seront présidents le professeur Lucien Malavard* (1968-69) et l'IG (Poudres) Jacques Fréjacques (1975-77). En 1982, le CCRST est remplacé par le Conseil supérieur de la recherche et de la technologie (décret du 30 novembre), devenant une instance de grande concertation (cf. note n°53).

¹⁸ La DGRST est rattachée de 1959 à 1969 auprès du Premier ministre, de 1969 à 1976 au ministre chargé de l'industrie et de la recherche et de 1976 à 1981 au secrétaire d'État à la recherche auprès du Premier ministre. Elle est supprimée à la fin de 1981. Voir chapitre 2 s/s chap 1.

¹⁹ Cf. chapitre 2, paragraphe 1.

Directions chargées de la conception et de la réalisation des matériels d'armement en vue de mieux traiter les problèmes communs à l'ensemble des Armées : au sein de la nouvelle DMA, créée par décret du 5 avril 1961, la *Direction des recherches et moyens d'essais* a ainsi pour mission principale de « suivre et soutenir les recherches susceptibles d'orienter à long terme la politique de défense de la nation » (décret du 21 avril 1961 et arrêté du 7 août 1961) avec le souci de rapprocher la recherche civile – la DGRST, l'Université, le CNRS, les instituts ou centres de recherche publics ou privés – des services de la Défense.

Cette mission est confiée au professeur Lucien Malavard*, universellement connu pour ses travaux en mécanique des fluides, et au professeur *Pierre Aigrain*, pionnier de la physique des semi-conducteurs. Ils sont respectivement nommés directeur et directeur scientifique. La recherche technique est confiée à l'ingénieur en chef de l'Air Édouard Billion qui apporte sa compétence aéronautique. L'équipe de direction comprend aussi l'ingénieur en chef (GM) Maurice Natta, placé à la tête de la sous-direction des moyens d'essais, et l'ingénieur en chef de l'Air Hughes de L'Etoile* qui est chargé du bureau « prospective et orientations », le BPO, créé en octobre 1961.

Le professeur Lucien Malavard innove dans le recrutement des cadres de la sous-direction des recherches scientifiques et de la sous-direction des recherches techniques en introduisant avec souplesse le principe d'un tiers d'officiers, d'un tiers d'ingénieurs militaires et de médecins militaires, d'un tiers d'ingénieurs ou scientifiques civils. Ce « *melting-pot* » eut de nombreux effets bénéfiques, en créant des synergies internes et aussi en facilitant les contacts avec les états-majors, les directions techniques, l'ONERA, l'université, le CNRS, l'industrie. Il innove aussi en appelant de jeunes scientifiques du contingent à faire leur service militaire dans des laboratoires de recherches contractants civils ou militaires : parmi eux, certains eurent une carrière brillante car appréciés très tôt par leurs employeurs au cours de ce service.

4.2 - La création et les missions du Centre de prospective et d'évaluations

Le BPO est amené à préparer les travaux d'un Comité consultatif de prospective, présidé par le professeur Pierre Aigrain et qui rassemble des représentants des états-majors et d'éminentes personnalités scientifiques et techniques. Ce comité, créé en juin 1962 par le ministre des Armées Pierre Messmer, « est chargé d'étudier l'incidence des progrès scientifiques sur la pensée stratégique ». La qualité du travail accompli est telle que ce dernier décide, par arrêté du 27 février 1964, de créer le Centre de prospective et d'évaluations (CPE), de le rattacher directement à lui et d'en nommer directeur l'IC Hughes de L'Etoile. Ce centre est chargé « d'évaluer l'intérêt et les possibilités de procéder, compte tenu des facteurs scientifique, technique, opérationnel, économique, aux recherches visant à la réalisation de nouveaux systèmes d'armes ». Il anime les recherches méthodologiques de RCB (Rationalisation des choix budgétaires) et plus généralement d'aide à la décision. Il s'implique dans le 3PB (Planification programmation préparation du budget). Il conduit les études prospectives de concepts stratégiques ou tactiques. Il est chargé de préparer, en collaboration avec la DRME, la directive ministérielle d'orientation (DMO) des recherches et études à long terme. Il participe aux travaux d'élaboration de la programmation des études et recherches, dont la DRME a pour mission d'assurer la coordination d'ensemble, et prépare les décisions qui portent sur cette programmation. Il joue un rôle de premier plan dans l'orientation des recherches de

Défense ainsi que dans la définition de la méthodologie en matière d'études amont. Ayant formalisé la doctrine de défense française et le rôle de la dissuasion nucléaire²⁰ dans celle-ci, il est l'auteur du premier livre blanc sur la Défense. Le CPE, à la direction duquel se succèdent en 1970 l'IG (FA) François Di Pace, puis en 1975 l'IG Paul-Ivan Le Febvre de St Germain, fait place en 1982, sous le ministre Charles Hernu, au GROUPÉS (Groupe de planification et d'études stratégiques), avec l'IG (TéA) Michel Delaye. Le ministre André Giraud en change les attributions pour en faire le 1^{er} octobre 1987 une Délégation aux études générales (DEG), dirigée par l'IG (FA) Henri Conze. Le 1^{er} octobre 1988, le ministre Jean-Pierre Chevènement y nomme le Général Paris. Début 1992, le ministre Pierre Joxe en fait une Direction des affaires stratégiques (DAS) pour souligner l'importance de la réflexion stratégique dans la programmation du Ministère, et y nomme un maître des requêtes au Conseil d'État, Jean-Claude Mallet (ENS76), qui deviendra ensuite Secrétaire général de la Défense nationale (1992-98). Malgré ces changements d'attributions, cet organisme continuera à exercer jusqu'en 1997 un rôle significatif dans l'orientation et la programmation des recherches de Défense, analogue au rôle joué auparavant par le CPE.

4.3 - La programmation des recherches de Défense

En relation étroite avec son ancienne équipe transférée au CPE, la DRME, sous l'impulsion du professeur Jacques-Émile Dubois qui en 1965 succède au professeur Malavard, met au point un système complet de programmation des recherches. Celui-ci s'appuie sur la planification établie par le CPE et, en particulier, sur l'élaboration de la *Directive ministérielle d'orientation (DMO)*. Une procédure informatisée établie par la sous-direction des programmes études et recherches (SDPRE) de la DRME (dirigée par l'ICA René Yerle) permet une information sélective, soit par secteur scientifique et technique, soit par catégorie de recherche (RODM, REST, RAMT, ECDS²¹...), soit par finalité militaire (s'il s'agit de RODM), soit par organisme gestionnaire. C'est ainsi que, dès 1969, le *Programme pluriannuel de recherches et d'études à long terme (PPRE)* constitue un tableau complet des recherches à entreprendre sous l'égide du ministère de la Défense, avec un exposé des objectifs et axes d'efforts par direction. Ce programme à trois ans est réexaminé chaque année à partir des propositions des directions techniques de la DMA, de la Direction centrale du Service de santé des armées (DCSSA), de la DRME, en tenant compte des avis des états-majors et du Centre de prospective et d'évaluations.

4.4 - De la DRME à la DRET (1977)

Le 1^{er} mars 1977, la DMA devient la DGA, et l'IG Henri Martre devient le nouveau Délégué général pour l'Armement. Par décret du 17 mai 1977, la DRME devient le 1^{er} juin la Direction des recherches études et techniques d'armement (DRET) avec des activités élargies à des missions interdirections et de coordination technique : l'Établissement central de l'armement, héritier du LCA en 1975 et qui prend le nom

²⁰ Le général Lucien Poirier, au CPE de 1965 à 1970, a été reconnu avoir alors apporté un soutien conceptuel important en matière de modélisation stratégique.

²¹ respectivement, recherche orientée par la directive ministérielle, recherche exploratoire scientifique et technique, recherche par amélioration de moyens technologiques, étude de conception et de développement de systèmes...

d'Établissement technique central de l'armement (ETCA), lui est rattaché, ainsi que la mission « défense NBC » au détriment de la DTAT. Les moyens d'essais, principalement le CEL et le CEM, sont remis à la Direction technique des engins. L'IG Jean Carpentier est nommé directeur de la DRET et le restera jusqu'à sa nomination en juillet 1984²² à la présidence de l'ONERA. Il est créé une Sous-direction des évaluations et de la coordination technique (SECT), qui est chargée d'animer des groupes de coordination technique (GCT) dont le fonctionnement est voisin de celui des groupes de coordination (GC) qu'anime le Service central des télécommunications et de l'informatique (le SCTI, qui devient en août 1984 la DEI, Direction de l'électronique et de l'informatique). Chaque GCT traite d'un domaine technique intéressant l'armement et dont la particularité est d'avoir un intérêt commun à plusieurs directions : têtes militaires et vulnérabilité, automatisation et conception de la production d'armements, études de conception de futurs systèmes d'armes, mesures et moyens d'essais, matériaux, défense NBC, facteurs humains. Il est composé de représentants des directions et des services de la DGA et présidé par l'un d'eux, le SECT assurant le secrétariat et menant ou faisant mener les actions qu'il a été décidé d'entreprendre.

4.5 - Le Conseil des recherches et études de Défense (CRED)

La politique générale à suivre en matière « d'études amont » - ressources, orientations et organisation - devient du ressort du *Conseil des recherches et études de Défense* (CRED), créé par arrêté du 25 juin 1976 du ministre de la Défense Yvon Bourges (1975-80). Réuni sous la présidence effective du ministre de la Défense, le CRED rassemble les chefs d'état-major, le délégué ministériel pour l'armement et les autres autorités concernées par la recherche de Défense, le Secrétaire général pour l'administration, le chef du Contrôle général des armées, le directeur des applications militaires du CEA, le directeur central du Service de santé des armées, le conseiller scientifique du ministre et, bien entendu, le directeur du CPE qui en est, avec le directeur de la DRME, la cheville ouvrière.

Le CRED fixe le montant global des moyens financiers à affecter aux *études amont*²³, non pas en valeur absolue, mais par son rapport au montant total des crédits d'équipement de la Défense (titre V et titre VI du budget de la Défense). L'objectif retenu pour ce ratio, devenu *mythique* depuis, est de 6% : afin de maintenir un niveau de crédits de recherche suffisant, le ministre peut être amené à rendre des arbitrages au niveau de ses gouverneurs de crédit que sont les chefs d'état-major et le Délégué, et à peser sur ce levier politique.

Le CRED donne aussi des directives quant à la répartition de l'effort :

- répartition entre recherches et études d'une part, et développements exploratoires d'autre part, ces derniers devant rester globalement dans la limite de 25 % des études amont,
- répartition entre les sections budgétaires : section commune et sections d'armes.

²² Lui succéderont alors l'IG (GM) Victor Marçais (1984), l'IG Paul-Yvan Le Febvre de St-Germain (1990), l'IG Gérard La Rosa (1994-97).

²³ Sont considérées comme relevant des études amont au sens du CRED les opérations inscrites sur un certain nombre de chapitres et d'articles études nommément désignés (définition budgétaire). Le ratio CRED, évalué à 6 % en 1973, est passé par un minimum en 1977 pour remonter à 6 % en 1982.

La DPAI (puis à partir de 1986 DPA/PPB), gouverneur de crédits pour la section commune, est au centre du dispositif d'arbitrages au sein de la DGA, en liaison avec l'EMA : elle joue, avec l'EMA en particulier, un rôle déterminant au moment où est arrêtée la liste des DE nouveaux qui seront lancés et financés au titre du PPDE.

4.6 - Le Conseiller scientifique du ministre (1977-1986)

Par arrêté du 1^{er} juin 1977, le ministre de la Défense Yvon Bourges crée auprès de lui un poste de conseiller scientifique, qui sera également chargé de mission « Recherche » auprès du Délégué général pour l'armement (les attributions auprès de ce dernier seront fixées par décision du Ministre en date du 28 juillet 1978 et préciseront notamment les relations avec la DRET). Il est attribué par le ministre sur proposition du DGA. Sont nommés successivement le professeur Jacques Ducuing (arrêté du 21 juin 1977), le professeur André Roussel (arrêté du 7 juillet 1980). Le poste est supprimé le 1^{er} octobre 1986, peu après l'arrivée du ministre André Giraud (20 mars 1986). Aidé d'un ou deux ingénieurs de l'Armement, chacun de ces conseillers va faire aboutir un certain nombre de mesures ayant pour but de rapprocher davantage la Défense de la communauté scientifique civile, mesures qui continueront à être appliquées par la DRET après la suppression dudit poste :

- reconversion vers la recherche des activités de l'ETCA à partir de 1980, en créant des pôles d'excellence en traitement d'images, détonique, applications des lasers, matériaux et blindages, défense NBC,
- organisation de stages de formation à l'étranger, principalement aux États-Unis, ouverte au personnel DGA ou non (1980),
- création de bourses pour des thèses de doctorat dans le cas d'exécution de contrats passés par la Défense à une unité de recherche relevant du CNRS ou de l'Éducation nationale, au titre d'un protocole signé le 27 août 1986 par la Défense (Directeur de la DRET) et le ministère de l'Éducation nationale chargé de l'enseignement supérieur (Directeur de la recherche universitaire),
- formation par la recherche des ingénieurs de l'armement, mise au point du statut de l'option recherche (à partir d'X 76) ou technique recherche (à partir d'X 85). L'IC (FA) Alain Quenzer restera chargé à la DRET de la gestion de ces IA, dont aucun n'ira à la DCAé, mais dont certains seront affectés à l'ONERA.
- instauration de manifestations visant à faire se rencontrer les mondes de l'industrie, de la recherche et de la Défense : les premières Journées nationales Science et Défense ont lieu à l'X à Palaiseau les 26 et 27 avril 1983, la seconde le 5 décembre 1985. Organisées par la DRET sous l'égide du ministre de la défense et du délégué général pour l'armement, ces Journées Science et Défense, devenues par la suite entretiens Science et Défense, constituaient encore il n'y a pas très longtemps un carrefour d'échanges périodiques entre chercheurs, ingénieurs, opérationnels et décideurs très apprécié de la communauté scientifique française. L'IC Patrick Kleinknecht de la mission Recherche et l'IG Paul-Ivan de Saint-Germain de la DRET en ont été les premiers animateurs. On peut rappeler à ce sujet que Jean-Pierre Chevènement, ministre en 1981 de la Recherche et de la Technologie, avait organisé en 1982 un grand colloque national sur la recherche.

- instauration fin 1983 d'un prix Science et Défense décerné annuellement²⁴ par un jury présidé par le professeur Louis Néel²⁵ (1984-1991) puis le professeur René Pellat²⁶ (1992-2003).
- création en 1979 de groupes de réflexion scientifique animés par des experts de la mission Recherche, les professeurs Allais, Philibert et Jacques-Louis Lions, respectivement en acoustique, matériaux et calcul scientifique. Ce dernier groupe a été à l'origine du programme de grand ordinateur scientifique lancé en 1981 par la DRET, sous la conduite de l'IGA Gérard La Rosa.
- création d'un Conseil scientifique de défense présidé par le chargé de mission recherche auprès du DGA (arrêté du 1^{er} septembre 1983), composé de 16 membres choisis en raison de leur compétence scientifique (nommés par décision du DGA du 12 janvier 1984). Ce Conseil est remplacé par un *Conseil scientifique de la Défense* que crée André Giraud par arrêté du 13 octobre 1986 : il comprend, outre son président, 16 membres choisis en raison de leur compétence scientifique (mais pas tout à fait les mêmes que précédemment) nommés par décision du ministre pour un mandat de trois ans renouvelable une fois. Il est présidé par Hubert Curien* pour les deux premiers mandats (1987-93) et par André Giraud pour le mandat suivant (1994-97, car il décède le 27 juillet 1997). Il fonctionne depuis sous une forme rénovée (arrêté du 18 juin 1998) sous la présidence de Francis Gutmann, ambassadeur de France, et sa composition a été portée à vingt-deux membres.

4.7 - Le fonctionnement de la DRME-DRET (1981-1997)

De sa création en 1961 jusqu'à 1968, la DRME organise la conduite de ses recherches en distinguant les recherches scientifiques et les recherches techniques qu'elle confie à deux sous-directions distinctes. Le regroupement s'opère en 1968 avec la création du Service des recherches, dont la direction est attribuée à l'IG Jean Carpentier qui l'organise en neuf groupes :

- 1 informatique, automatique ;
- 2 télécommunications, détection ;
- 3 physique et environnement ;
- 4 optique et optronique ;
- 5 composants électroniques ;
- 6 mécanique et physique des fluides ;
- 7 chimie, énergie, propulsion ;
- 8 matériaux structuraux ;
- 9 biologie et sciences humaines.

Chaque groupe a la responsabilité d'orienter, animer et suivre les recherches à moyen et long terme dans le secteur qui lui est confié. Pratiquement toutes les disciplines scientifiques et techniques pouvant intéresser la Défense sont couvertes.

Le directeur scientifique de la DRME, le professeur Jean-Loup Delcroix (ENS 1944) qui remplace en 1965 le Professeur Pierre Aigrain, n'a plus en 1968 son rôle

²⁴ Le prix a été décerné pour la première fois en 1984 et attribué à Pierre Faurre, directeur général de SAGEM, sur le filtrage de Kalman et ses applications (ses travaux sont relatés pages 155 et 168 de l'annexe D « Exemples de pionniers » du tome II de l'ouvrage COMAERO sur les équipements).

²⁵ Cf. sa courte biographie en note n°117.

²⁶ Cf. sa courte biographie en note n°49.

opérationnel de sous-directeur des recherches scientifiques ; il gagne néanmoins en influence, présidant un conseil des recherches interne à la DRME devant lequel sont présentées par secteurs, sous forme de « sous-ensemble de recherches » (SER), les actions de recherche avant d'être lancées. Ces SER, d'un bon niveau de synthèse technique, sont portés par les chefs de groupes à la connaissance de leurs correspondants des états-majors et des directions techniques.

En 1977, le passage de la DRME à la DRET ne change pas le processus de conduite des recherches. En 1981, il est nommé un nouveau directeur scientifique, le professeur Pierre Lallemand (ENS 1959) qui élargit le collège des experts scientifiques²⁷ et lance en 1984 l'organisation de journées thématiques destinées à présenter périodiquement les résultats et les perspectives de recherches d'un secteur déterminé (type SER) à un large auditoire de correspondants spécialisés. Lui succède de 1992 à 1997 le professeur Claude Weisbuch (ENS 1966).

La DRET ainsi que les directions de milieu disparaissent à la suite de la réforme qui est menée par le nouveau délégué général pour l'armement Jean-Yves Helmer (28 mars 1996-31 mars 2001) et qui aboutit par décret du 19 janvier 1997 à une organisation modernisée de la DGA. La préparation du futur relève alors de la responsabilité d'une direction des systèmes de forces et de la prospective (DSP). Cette direction dispose d'un service d'architecture des systèmes de forces, chargé de la prospective à long terme, et de deux services dérivés de la DRET : un Service de la recherche et des études amont (SREA) chargé de la programmation des études à court et à moyen termes, et un Service des stratégies techniques et des technologies communes (STTC), regroupant les spécialistes des différents domaines techniques concernés.

Un poste de conseiller scientifique est alors créé auprès du Délégué : il remplace celui de conseiller scientifique du ministre de la Défense qui a existé de 1977 à 1986, et supprime celui de directeur scientifique de la DRME/DRET qui a existé de 1981 à 1997. Il est attribué au professeur Claude Weisbuch; lui succèdent en 1999 le professeur Jean-Jacques Gagnepain (qui devient en 2003 directeur de la technologie au ministère chargé de la recherche), puis le professeur Pierre Guillon.

En 2006, le nouveau délégué François Lureau supprime les services de programmes (dont le SPAé) crée la D4S (Direction des systèmes de forces et des stratégies industrielles, technologiques et de la coopération) qui dispose, pour la préparation du futur, du SRTS (Service des recherches et technologies de défense et de sécurité), ainsi que de la MRIS (Mission pour la recherche et l'innovation scientifique)

5 - LES DIRECTIONS TECHNIQUES DE LA DMA/DGA ET LES ETUDES AMONT AERONAUTIQUES (1981-97)

Il faut revenir à l'origine de la DMA et à son organisation de 1961 à 1997 avec des directions de milieu et une direction des recherches. L'ensemble des études menées par la DTCA pour les aéronaves, par la DTEN pour les missiles, et exceptionnellement par la DEI, représente les études amont aéronautiques de la DGA : les crédits proviennent pour les hélicoptères, des chapitres études air, terre, marine, pour les

²⁷ Dont disposait ce dernier et auprès duquel les ingénieurs et officiers de la DRME avaient un accès facile. Ce collège d'experts est au départ une idée de Pierre Aigrain.

avions des chapitres études air, marine, pour les missiles des chapitres précédents et des crédits de la section commune. En ce qui concerne la DTCA, ils sont utilisés par les services STAé et STTA, puis à partir de 1980 à la suite d'un changement d'organisation interne, par les services STPA et STTE. La DRME/DRET, la DEI, la DTEN (engin balistique, espace) fonctionnent généralement sur crédits de la section commune. La Direction de l'Aéronautique (DTI, DTCA, DCAé), et ses services techniques ont toujours été chargés de l'animation et du suivi des programmes aéronautiques, qu'ils soient civils ou militaires. C'est ainsi que la Direction chargée de l'Aviation civile (Secrétariat général à l'aviation civile et commerciale, devenu en 1976 Direction générale de l'aviation civile²⁸) délègue à cette dernière le soin de gérer ses crédits d'études et de recherches (étendus, depuis 1974, à la notion de développement technologique probatoire, cf. ci-dessous celle de développement exploratoire). Ces crédits sont progressivement mis en place, à la suite des lois budgétaires de 1959.

L'ONERA reçoit ses ressources principalement des directions de la DMA par contrats soit passés directement, soit passés par l'industrie. Il reçoit également une subvention de crédits d'études et d'investissements (ressources propres) au moyen d'une convention de la DMA.

5.1 - Les transferts et les développements exploratoires

D'une manière générale, les résultats de recherches DRME-DRET qui sont repris par la direction chargée de l'aéronautique (DTIA, DTCA, puis DCAé) ou par celle chargée des engins (DTEN, DEN, puis DME) pour leurs applications font l'objet de transferts effectués soit de façon continue soit au moyen de *développements exploratoires*²⁹ dits DE. Ces derniers font l'objet d'une procédure particulière du type programme pluriannuel de développements exploratoires (PPDE), introduite dans le cadre des études amont de la DMA à partir de l'année 1972³⁰ : le CPE est gardien de la méthode, la DPAI est maître d'œuvre de la procédure, le CRED approuve après examen en groupe de concertation DGA-état-majors. Ils sont menés généralement dans l'industrie au titre de contrats passés par les services techniques des Directions. Lorsque les études initiales débutent dans le milieu universitaire ou CNRS, la DRME s'efforce d'y associer suffisamment tôt l'industriel sous forme d'actions concertées de façon à faciliter le transfert des résultats. De nombreuses innovations techniques sont passées par le stade de projets de DE en provenance directe d'études des services techniques des Directions ; un avantage vu par ces

²⁸ Est créée également en 1976, au sein de la DGAC, une direction des programmes aéronautiques civils, dirigée par l'IG Bernard Guibé.

²⁹ Mini-programme démonstrateur de faisabilité d'une technologie, avec des objectifs de coût, de délai et de spécifications techniques.

³⁰ C'est en 1969 que l'on voit apparaître pour la 1^{ère} fois la notion de développement exploratoire dans un document de programmation de la DRME sur la préparation du PPRE 70 (Fonds 022/CAB, INV 325, carton 47) : à la page 6 : « dès que la structure budgétaire le facilitera par une délimitation mieux fragmentée, la DMA établira des projets de Développement exploratoire », à la page 12 : « de plus on a défini un stade qui peut s'imposer comme préalable à toute décision de développement proprement dit. C'est ce qu'on appelle le développement exploratoire ». D'après de nombreux témoignages dont celui de l'IG (GM) Alain Guigue qui était à l'époque à la DPAI, l'IG (GM) René Yerle (qui dirigeait à la DRME la Sous-direction des programmes études et recherches) a joué un rôle prépondérant avec la DPAI dans la mise en place de cette procédure.

dernières était d'obtenir une imputation des crédits décidée, non pas sur les sections d'armes mais sur la section commune (cas des technologies à finalités multiples, telles que celles relatives aux missiles, hélicoptères, équipements optroniques, à l'électroniques, aux centrales à inertie...).

La DGAC a suivi la DGA dans cette procédure en créant en 1974 les DTP, développements (appelés démonstrateurs dans les années 1990) technologiques probatoires, de définition analogue aux développements exploratoires ; quelques DE ont même été financés en commun (par exemple, ceux relatifs à la régulation numérique des moteurs et à la première voilure V10F du Falcon X réalisée en composites, en 1977).

Ces études préparatoires sous forme de développements exploratoires se sont avérées très utiles. Elles se sont imposées comme valorisant les résultats de la recherche. Elles ont permis de pouvoir lancer un programme avec moins d'incertitude que par le passé, diminuant le nombre de prototypes. Les programmes ayant davantage bénéficié de cette procédure ont été les derniers (Rafale, Tigre, NH90....), compte tenu du temps de mise en régime de la procédure (on constate pour les années 1980 une augmentation en 10 ans de 50% en valeur de l'annuité DTCA consacrée au PPDE)

La procédure PPDE a été bien accueillie par les directions techniques (contrairement à celle du PPRE). Incitative et motivante pour l'ingénieur de base de la DTCA, elle était appréciée des industriels qui voyaient là un élément de soutien officiel des services, allant jusqu'à utiliser le terme de DE comme un nom commun courant. Elle a été remarquablement gérée par la DPAI puis à partir de 1986 par le DPA (lors de la scission en deux – SCAI et DPA – de la DPAI à l'arrivée d'André Giraud) : instruction des dossiers, motivations et attendus techniques, suivi technique et financier. On reconnaissait la méthode de travail inculquée à la DPAI par son premier directeur l'IGA (GM Aéro) René Ravaut.

5.2 - La fin des PPRE et PPDE

La méthode d'orientation des recherches de Défense menée par la DAS héritière du CPE et la programmation des études amont menée par la DRET prennent fin lors de la réforme engagée en 1997 par le nouveau Délégué Jean-Yves Helmer. Cette réforme donne alors lieu à une nouvelle organisation centrée sur³¹ :

- des objectifs fixés sous forme de 40 « capacités technologiques 2015 » qui rassemblent des avancées à réaliser dans un ensemble de domaines pour être en mesure de réaliser les programmes futurs dont le besoin a été identifié ;
- un cycle annuel comportant des travaux d'orientation (concrétisés par une directive d'orientation), de programmation (plans d'engagement sur trois ans de quelques centaines de PEA, programmes d'études amont) et d'évaluation ;
- une place importante donnée aux démonstrateurs technologiques, qu'on peut sans doute considérer comme un avatar des DE, dont l'exemple le plus remarquable est le Neuron (UCAV) auquel participent six pays (en comptant la France).

³¹ Jacques Bongrand « Les nouveaux enjeux des études amont de défense », *L'Armement*, n°85, mars 2004. IGA Bongrand, directeur du Service de la recherche et des études amont (DGA/Direction des systèmes de forces et de la prospective).

Il n'en reste pas moins qu'un certain nombre de laboratoires de recherches, issus de l'université, des grandes écoles ou du CNRS, ont ressenti, à l'occasion de cette réforme, une baisse de soutien de la DGA à leur égard, et qu'ils ont regretté cette attitude alors qu'ils avaient appris à travailler depuis le début des années 1960 avec elle dans un esprit étroit de coopération. Car ce sont dans ces années-là que les ingénieurs d'État ont amené l'industrie à coopérer avec ces centres, comme cela sera démontré tout le long de cet ouvrage.

6 - SERVICES OU ETABLISSEMENTS RATTACHES A LA DRME, PUIS A LA DRET³²

6.1 - Services centraux

Le *CETHEDEC*, Centre d'études théoriques de la détection et des communications, créé en 1959, est rattaché en 1961 à la DRME. Dirigé par le Professeur Maurice Bouix, le *CETHEDEC* suscite des recherches dans les domaines de la théorie du signal et de l'information, de l'automatique théorique et des phénomènes physiques utilisés pour le transport du signal (électromagnétisme et acoustique) ; il forme aussi de jeunes chercheurs à ces techniques.

Le *CIRO*, Centre interarmées de la recherche opérationnelle, créé en 1956 et rattaché au CASD, assure la formation des chercheurs analystes opérationnels militaires. Dirigé par le professeur Jacques Lestel, il est rattaché à la DRME par décret du 19 septembre 1962 : il fusionne en 1979 avec le département études théoriques de l'ETCA (créé en 1960) pour former le CAD, Centre d'analyse de Défense.

Le *BIS*, Bureau d'information scientifique : utilisant la documentation, ce service de la DRME est chargé de la veille scientifique, et donc de détecter les événements susceptibles de faire naître les innovations. Créé en 1963, il a été dirigé successivement par les professeurs Laurent Citti, Henri Viellard et Loïc Viet. Il est rattaché en 1981 à la Direction scientifique de la DRET.

Le *CEDOCAR*, Centre de documentation de l'Armement : le Service de documentation scientifique et technique de l'armement, SEDOCAR, est créé par arrêté du 20 février 1963 à partir du Service de documentation et d'information technique (SDIT) de la DTIA dirigé à l'époque par l'IG Air Maurice Giqueaux. Il est rattaché au département administration générale (devenu en 1965 DPAG) de Marc Robert. Par arrêté du 13 octobre 1967, il devient Centre de documentation de l'armement, CEDOCAR, et relève de la DRME. Depuis 1963, ont été successivement directeurs : les IG Air Gaston Fournier (1963), Louis-P. Genevey (1965), Ivan-G. Renaud (1967), les IG (GM) René Yerle (1977), Henri Boucher (1982), François Chevalier (1987) et l'ICT Édouard Valensi (1992-97). Centre de documentation le plus important en France après celui du CNRS, il permet aux ingénieurs et chercheurs de la Défense ou travaillant pour la Défense d'assurer une veille scientifique et technique dans tous les domaines intéressant l'armement. Néanmoins, le domaine aéronautique restera prédominant, compte tenu de son passé.

³² On évoque également pour ces établissements, ainsi que pour l'ISL, au paragraphe 7.1 et le LRBA au paragraphe 8, leurs activités, n'y revenant pas par la suite.

6.2 - L'ETCA, Établissement technique central de l'armement

Établissement de la Direction technique des armements terrestres (DTAT), le Laboratoire central de l'Armement (LCA) se voit attribuer en 1975 les missions interdirections qui justifient son rattachement le 1^{er} juin 1977³³ à la DRET sous le vocable d'Établissement technique central de l'armement. Sont successivement directeurs de l'ETCA : 1975 IG (FA) Yves Caumartin, 1979 IG (FA) Jacques Mercier, 1983 IG (FA) Pierre Givaudon, 1986 IG (FA) Pierre Capion, 1993 IG (GM) Michel Bénicourt. Ses missions sont réparties entre les centres suivants :

- Centre d'analyse de défense (CAD) : études de systèmes, recherche opérationnelle, défense NBC (évaluation de la menace nucléaire),
- Centre d'études du Bouchet (CEB), défense NBC (protection NBC des personnels, évaluation de la menace chimique et biologique),
- Centre d'études de Gramat (CEG) : détonique, défense NBC (protection nucléaire des matériels),
- Centre mécanique-chimie-matériaux (CMCM) : études matériaux, lasers, robotique ; prend le 1^{er} janvier 1988 le nom de Centre de recherches et d'études d'Arcueil (CREA), reprenant les activités optique et physique du CTME,
- Centre technique des moyens de mesures et d'essais (CTME), qui prend le 1^{er} janvier 1988 le nom de Centre technique des moyens d'essais (CTME) : a repris en 1975 les activités du Service des équipements des champs de tir (SECT) créé en 1961 pour équiper les centres d'essais CEL, CEM et CIEES, de la DRME.

Ces centres, chacun dans leur domaine, jouent un rôle d'expert et d'assistance technique au profit des directions de la DGA, de la mission Atome, et plus généralement des organismes du ministère de la Défense. Pour ce qui concerne la DTCA et la DTEN, on peut citer les études suivantes sur :

La détonique : détonation d'un explosif ou d'un propergol ; formation des projectiles (charge creuse, charge génératrice de noyau, charge à éclats), perforants cinétiques ; leur interaction avec les cibles et les blindages (inertes, réactifs). S'appuyant sur sa compétence, acquise à ses débuts dans le nucléaire, en physique des explosifs et en dynamique des matériaux aux pressions et vitesses élevées de déformation, le CEG étudie la vulnérabilité des cibles aux charges antiaériennes par le calcul et l'expérimentation (essais de tir d'éclats sur moteur d'avion, essai d'explosifs dans une carlingue d'avion...) en vue d'améliorer aussi bien l'efficacité des charges que la protection des avions.

Le durcissement des matériels à l'EM nucléaire : outre les effets de souffle (étudiés au tunnel SNCF désaffecté de Sauclères, situé entre Nîmes et Millau), de choc, de rayonnement thermique (étudiés sur simulateur de grand gabarit) et de radiations (X, γ et neutrons), provoqués par les armes nucléaires, le CEG consacre aux effets vulnérants de l'impulsion électromagnétique d'origine nucléaire de gros moyens de simulation, tels les deux grands simulateurs émettant l'un une onde de polarisation horizontale (DPH), l'autre verticale (SSR). Les autres sources

³³ La DRET reçoit, à sa création à cette même date, la responsabilité des activités de Défense NBC incombant à la DGA : cette charge est assurée par sa sous-direction Défense nucléaire, biologique et chimique, qui, avec l'appui de l'ETCA, oriente et coordonne les recherches, études, expérimentations, développements et fabrications relatifs à ces activités.

potentielles d'IEM vulnérante sont les armes micro-ondes de forte puissance (au stade du concept), « les champs-forts » (environnement généré par les émetteurs radio ou radar de forte puissance) et la foudre : ces sources non nucléaires ont pris de l'importance dans les travaux du CEG en raison de l'emploi grandissant dans les systèmes d'armes des matériaux composites et de l'électronique à bas niveau de courant (circuits intégrés...).

L'analyse système : études technico-opérationnelles (simulations de combat aérien, efficacité comparée d'armements air-air ou air-sol, ...), études de coûts d'acquisition de matériels et de soutien logistique, travaux d'expertise (évaluation de la menace, survie des systèmes d'armes et de leurs servants aux effets des explosions nucléaires...). A titre d'exemples d'études menées par le CAD : une évaluation de la vulnérabilité à une explosion nucléaire d'un satellite géostationnaire ; des travaux de modélisation, effectués dans le cadre du programme Rafale, sur les moyens de soutien nécessaires suivant les hypothèses de déploiement et sur le gain résultant d'une communauté logistique Air-Marine sur les rechanges ; une étude comparative des scénarios de projection et du coût global de possession suivant la composition des flottes possibles (A400M, An 70, C17 et C130J) dans le cadre du programme « Avion de transport futur ».

L'ingénierie en moyens d'essais : mission exercée par le SECT dès 1961 au profit des centres d'essais de la DTEN, reprise par le CTME et étendue au profit de l'ensemble de la DGA ; ce centre apporte son concours, sous diverses formes, à la plupart des centres d'essais (DEN, DCAé, DAT, DCN, DRET) en matière de trajectographie, de télémessures, d'acquisition et de traitement de données, de systèmes de conduite d'essais, de transmissions, de mécanique, de génie civil et d'énergie, d'optronique et d'imagerie. Il a également réalisé le dispositif de mesures du bâtiment naval d'essais et de mesures (BEM) Monge qui a succédé en 1992 au BEM Henri Poincaré.

Le traitement d'images spatiales : il est créé en 1972 au LCA/CTME, à la demande de la DTEN, un laboratoire de traitement d'images satellitaires, sur lequel cette direction va s'appuyer pour préparer la définition des satellites militaires d'observation SAMRO puis HELIOS I et II ³⁴. Ce laboratoire donne naissance en 1983 au Centre expérimental de photo-interprétation des armées (CEPIA), qui assure le traitement opérationnel des images du satellite SPOT (Satellite probatoire d'observation terrestre) à des fins de renseignement militaire avant la création de la Direction du renseignement militaire (DRM). Lors de l'installation de la DRM à Creil en 1993, avec le Centre de Formation interarmées d'interprétation d'images (DRM/CF3I), l'expérience acquise au CEPIA permet la mise en place par le CTME du système PASIPHAE (en mythologie, fille d'Hélios) au bénéfice du Centre d'exploitation d'images de l'armée de l'Air (CEIAA, l'une des composantes du CF3I). En 1990, il est également créé au CTME la Cellule d'étude en géographie numérique (CEGN), pour permettre aux armées de disposer des données géographiques numériques devenues indispensables à tous les systèmes d'armes. La CEGN a été l'expert initial de la DGA dans ce domaine et a fourni son assistance technique au Centre géographique interarmées (CGI) pour la mise en place de l'Établissement de production de données géographique créé en 1993; elle a aussi assuré la mise en

³⁴ le programme HELIOS I débute en 1986 avec SPOT 4 ; le 1^{er} satellite HELIOS I A est réalisé à partir de 1993, et lancé sur orbite héliosynchrone le 7 juillet 1995 (programme FR, IT, ESP) ; le deuxième satellite HELIOS II A est lancé le 18 décembre 2004 (programme FR, ESP).

place des moyens de la Section de numérisation de l'armée de Terre (SENATER) à Joigny.

Les recherches, provenant d'une mesure ministérielle de reconversion vers la recherche à partir de 1980 des activités traditionnelles de l'établissement d'Arcueil de la DEFA : elles portent sur les matériaux (blindages, signatures, composites...), les sources lasers et ses applications (Lidars, guidage, métrologie des fréquences ; vulnérabilité de l'observation et protections), les lasers de puissance (en liaison avec le CNRS, applications à la découpe, au soudage, aux traitements de surface...), la robotique militaire.

La protection NBC des personnels : protection individuelle et collective contre les agents de guerre chimiques (masques, filtres...), protection contre l'irradiation par des rayonnements nucléaires, contre les effets thermiques (four solaire d'Odeillo) et luminothermiques (certaines protections sont en service dans l'armée de l'Air). Le CEB a notamment réalisé le radiamètre de bord de l'HAP-HAC Tigre pour le contrôle du *rayonnement gamma*, ainsi qu'un dispositif de contrôle de radioactivité étendu au chimique pour la surveillance des bases aériennes ; il utilise aussi depuis plus de vingt ans un centre de décontamination chimique en vraie grandeur sur la base aérienne de Cazaux.

7 - ÉTABLISSEMENTS PUBLICS SOUS TUTELLE DE LA DRME PUIS DE LA DRET

L'ISL, établissement sous tutelle de la DEFA, et l'ONERA, établissement sous tutelle de la DTIA, passent à la création de la DMA en 1961 sous tutelle de la DRME puis de la DRET (et y restent jusqu'à la réforme de la DGA du 19 janvier 1997). Établissements à vocation recherche, leurs missions n'ont pas fondamentalement évolué à cette occasion.

7.1 - L'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL)

L'ISL est issu du Laboratoire de recherches de Saint-Louis (LRSL), établissement de la DEFA, créé en 1945 à partir d'une équipe de chercheurs allemands en balistique de l'Académie technique de l'Armée de l'air de Berlin-Gatow animée par le professeur Hubert Schardin. Le LRSL devient, par un traité franco-allemand ratifié le 22 juin 1959, l'ISL, établissement public binational, géré suivant les principes du droit privé français. Il est doté d'un conseil d'administration, à présidence française ou allemande alternée, composé de six hauts fonctionnaires des deux ministères de la Défense. Le conseil d'administration s'appuie sur un Conseil consultatif des recherches et études (CCRE), composé de 18 membres, appartenant, pour la plupart, aux services de l'Armement des deux pays. Ses activités, relevant à la fois de la recherche fondamentale et de la recherche appliquée, s'exercent dans des domaines variés. A partir d'une origine balistique (intérieure, extérieure et terminale), se sont développés, sous l'impulsion de l'IG (FA) André Auriol, les études et moyens en aérodynamique. En métrologie, les techniques optiques interférométriques et holographiques, développées par Paul Smigielski et son équipe depuis les années 1970, et devenues domaine d'excellence de l'ISL, sont appliquées à l'étude des écoulements aérodynamiques (méthodes de visualisation globale, ou méthodes ponctuelles de vélocimétrie laser³⁵, de diffusion Raman). En aéroacoustique,

³⁵ Les premiers essais en vol d'anémométrie laser ISL ont été effectués sur un avion Nord 260 du CEV de Brétigny en janvier 1977. Un anémomètre laser ALEV a été développé par

l'analyse de l'interaction pale-tourbillon faite au banc rotor de Baldersheim et le calcul du bruit aérodynamique rayonné par un rotor d'hélicoptère ont été menés dans les années 1980 par Jacques Haertig et Bernard Jaeggy ; la propagation des bruits a également été étudiée en vue de la détection, de l'identification (signature acoustique) et de la localisation des hélicoptères. Bien qu'à finalités multiples, l'activité demeure orientée majoritairement par les applications armements : balistique et détonique, projectiles flèches ou cinétiques, charges creuses ou formées, blindages, ondes de choc fortes et faibles, physioacoustique. Pour la DTEN, des études sur les sillages des corps de rentrée et les effets de souffles ont été menées dans les années 1960. Pour le compte de la DTCA et de la DRME, dans le cadre de son activité sur les ondes aériennes, l'ISL a été amené, dans les années 1960 et jusqu'en 1975, à coopérer aux études sur le bang sonique menées par ces directions (exposées au chapitre 7).

Dans l'histoire de l'ISL, à partir de sa création en 1959, on peut distinguer plusieurs phases :

- Les années 1960 : c'est la phase de montée en puissance : on passe des 320 personnes du LRSL à un effectif d'environ 450. Le nombre des chercheurs augmente, surtout en ce qui concerne les chercheurs français. C'est aussi la période où naissent les projectiles flèches, secteur de l'armement terrestre où l'ISL va approfondir les connaissances scientifiques et techniques
- la période 1971-1985 : de nouvelles orientations s'affirment, les études amont préparent l'avenir, l'ISL réalise des « premières » : blindage réactif, charge tandem, anémométrie laser
- à partir de 1985, dans le cadre des accords de coopération franco-allemande dans le domaine des technologies de Défense, l'ISL organise des colloques en vue de dégager des orientations communes. Les pôles de compétence de l'ISL : balistique, détonique, analyse des ondes aériennes et des turbulences, utilisation des lasers en métrologie, s'affermissent encore, tandis que de nouveaux axes (approche intelligente des objectifs, accélération électrique, hypervélocité, armes non létales) sont introduits pour répondre aux demandes des services de la DGA et des états-majors. Ceux-ci font appel à l'ISL pour des expertises dans ces nouveaux domaines.

L'ISL, après une cinquantaine d'années d'existence, est devenu un artisan majeur de la coopération franco-allemande en recherche de Défense. Il utilise des équipes pluridisciplinaires de chercheurs français et allemands dont la formation et la culture sont différentes, mais, étant souvent complémentaires, sont facteurs d'efficacité. Celle-ci est reconnue aussi bien dans les deux pays fondateurs que dans les autres pays impliqués dans la coopération internationale.

L'ISL est dirigé par deux co-directeurs, un Français et un Allemand, qui ont également la responsabilité de l'activité scientifique et technique. Les co-directeurs français ont été successivement : 1959 IG (FA) Robert Cassagnou, 1965 IG (FA) André Auriol, 1978 IG (GM) Pierre Thévenin, 1984 IG (FA) Raymond Meunier, 1995 IG (GM) Jean-Yves Chaumeton, 1998 IGA (Terre) Yves de Longueville, 2002-06 IGA (Mer) Dominique Litaie.

Sextant Avionique en liaison avec l'ISL et a servi à la calibration des Airbus A330/A340 aux essais en vol (soutien DTCA et DRET, 1979).

7.2 - L'ONERA, Office national d'études et de recherches aérospatiales³⁶

L'origine du CEAT et de l'ONERA

L'EETIM et le Centre d'essais de Chalais-Meudon, devenus début 1940 l'ERARP, Établissement de recherche aéronautique de la région parisienne, se replient à Toulouse courant 1940 dans des bâtiments destinés à recevoir l'École vétérinaire, 23 chemin de la Juncasse (future rue Guillaumet). Le centre est baptisé à la fin 1941 ERAé, Établissement de recherche aéronautique. Par décret du 11 septembre 1944, il repasse sous la tutelle du ministère de l'Air et une bonne partie du personnel de l'EETIM regagne ses murs. Par décision ministérielle du 31 juillet 1946, l'ERAé intègre le 1^{er} septembre 1946 l'ONERA qui vient d'être créé : il prend le nom d'Établissement de recherche aéronautique de Toulouse (ERAT). Puis l'ONERA, décidant d'installer à Modane ses souffleries, abandonne Toulouse et le 1^{er} janvier 1949 l'ERAT repasse sous la coupe de la DTIA avec l'appellation d'Établissement aéronautique de Toulouse (EAT). Il est renommé Centre d'essais et en 1965 Centre d'essais aéronautique de Toulouse (CEAT).

Création et statut de l'ONERA

Pour aider l'industrie aéronautique à renaître après 1945, les pouvoirs publics décident de « rassembler au sein d'un organisme public l'ensemble des moyens de recherche appartenant à l'État ». L'exposé des motifs de la loi du 3 mai 1946 présenté à l'Assemblée nationale constituante fait apparaître de façon claire les intentions du gouvernement de l'époque. Il s'agit de donner à la France « longtemps à la tête du progrès en aviation » les moyens de rattraper le retard dû aux circonstances de la guerre et de l'occupation de manière à « redonner à notre pays cette place de premier plan ». La loi, votée à l'unanimité, donne naissance à l'Office national d'études et de recherches aéronautiques, « établissement public scientifique et technique à caractère industriel et commercial, doté de l'autonomie financière, placé sous l'autorité du ministre des Armées », et dont la mission est de « développer, orienter, coordonner les recherches scientifiques et techniques dans le domaine de l'aéronautique ». Parmi les personnalités qui, au sein du « conseil supérieur provisoire scientifique de l'Air », se penchent sur son berceau, il faut citer Louis de Broglie, Frédéric Joliot-Curie, Joseph Pérès, Maurice Roy*, les ingénieurs généraux de l'Air Paul Dumanois, Maurice Suffrin-Hébert (directeur de la DTI, 1944-48), Léon Poincaré (alors directeur du GRA), et Louis Bonte (alors adjoint au directeur de la DTI).

Un règlement d'administration publique du 12 juin 1946 précise les modalités d'application de la loi et une décision ministérielle du 31 juillet 1946 fixe au 1^{er} septembre la date à laquelle les services et établissements de la DTI suivants seront intégrés à l'ONERA :

- le service des recherches aéronautiques (SRA) du ministère de l'Air,
- l'annexe du SRA à Meudon, alors appelée « Parc aéronautique de Chalais-Meudon »,
- l'établissement de recherches aéronautiques de Toulouse, l'ERAé, qui devient alors l'ERAT,

³⁶ Les recherches menées à l'ONERA font l'objet de la partie III du présent ouvrage. De même, ses grands moyens d'essais sont présentés dans le fascicule COMAERO sur les Centres et moyens d'essais. L'ONERA est un établissement public sous tutelle de la DTIA avant la date de création de la DRME (1961).

- la soufflerie de Cannes de la SNCASO,
- le laboratoire d'essais aérodynamiques d'Alger-Maison Blanche qui avait été créé en 1943 par le gouvernement provisoire d'Alger (à effet du 1^{er} janvier 1947),
- enfin d'autres établissements. En effet le 11 juillet 1946, le conseil du Groupement français pour le développement des recherches aéronautiques (GRA, constitué début 1938 sous forme de fondation d'utilité publique, l'émule à l'échelle de la France du NACA américain), approuve le principe de la mutation à l'ONERA, qui sera effective également au 1^{er} septembre, du personnel et des installations qu'il gérât, soit : l'Institut de mécanique des fluides de Lille³⁷, le Laboratoire d'études de carburants de remplacement d'Arles, la station d'essais de givrage du Mont-Lachat en Savoie et le Centre de recherches aérodynamiques de Toulouse.

L'ONERA dispose ainsi d'un millier de personnes venus d'horizons divers qu'il faut rassembler dans une pénurie de locaux et de moyens qui ne prend fin qu'à l'achèvement en 1953 des investissements engagés à Châtillon, Palaiseau et Modane. Sa direction est initialement répartie dans les hôtels du 3 rue Léon Bonnat (XVI^e) et du 21 Boulevard Richard Wallace à Neuilly avant de rejoindre à partir de 1948 le grand bâtiment « sanatorium » de Châtillon qui était resté inachevé en 1936 à la suite d'un scandale financier.

Évolution du statut

Tenant compte d'une part de la loi du 19 décembre 1961 créant le CNES, et d'autre part du décret du 5 avril 1961 créant la DRME, un décret de 1963 étend la mission de l'ONERA au domaine spatial³⁸ « en vue notamment des applications intéressant la Défense » et incite à mettre l'accent, dans la mission de l'Office, plus sur l'aspect des recherches propres que sur celui de la coordination des recherches à l'échelon national, que la DRME avait vocation d'exercer sur un plan plus large d'ailleurs que l'aéronautique. Un autre décret d'application de la même époque précise les modalités d'approbation des programmes, les attributions d'un Conseil scientifique et technique composé de personnalités du monde de l'industrie de la recherche et des autorités de tutelle, élargissant la concertation. En 1970, trois représentants de l'industrie aéronautique³⁹ entrent au conseil d'administration jusqu'ici uniquement composé de fonctionnaires.

Jusqu'en 1984, les directeurs de l'ONERA sont assistés d'un conseil d'administration, ainsi que d'un comité scientifique et technique. A cette date, le nouveau statut instaure une structure avec un président du conseil d'administration exerçant la direction de l'Office et crée un haut conseil scientifique où siègeront d'éminentes personnalités. Les dirigeants sont successivement à la date de leur prise de fonctions :

³⁷ Le GRA avait passé en 1939 avec l'Université une convention pour gérer cet « établissement de recherches ».

³⁸ Le A « aéronautiques » de l'ONERA devient « aérospatiales ».

³⁹ Marcel Chassagny, Jacques-Édouard Lamy et Benno-Claude Vallières, respectivement président de l'USIAS, de SNECMA et des Avions Marcel Dassault, mesure prise à la demande de Jean Blancard* alors qu'il est délégué ministériel pour l'armement et qu'il quitte la présidence du Conseil d'administration de l'ONERA pour la donner à Michel Vaillaud (décret du 9 octobre 1970).

- pour les présidents du Conseil d'administration (jusqu'en 1984) : 1946- Paul Dumanois, 1949- Paul Bergeron, 1955- Maurice Guérin, 1963- Gaston Lavaud**, 1966- Michel Fourquet**, 1968- Jean Blancard**, 1970- Michel Vaillaud, 1974- Lucien Malavard, 1975- Henri Lavail, 1978- André Jouffret (** en tant que Délégué ministériel pour l'Armement) ;
- pour les *directeurs généraux* (jusqu'en 1984) : 1946- René Jugeau, 1948- IG Eugène Vellay, 1949- IG (Mines) Maurice Roy, 1962- Professeur Lucien Malavard 1963- Professeur Paul Germain*, 1968- Professeur Raimond Castaing, 1973- IG Pierre Contensou*, 1979- IG André Auriol ;
- pour les *présidents directeurs généraux* (après 1984) : 1984 IG Jean Carpentier, 1991 IG Marcel Bénichou, 1995 IG Michel Scheller, 1999 IG Jean-Pierre Rabault, 2003 IC (Mines) Denis Maugars.

L'effectif est composé d'un millier de personnes à l'origine. Il atteint 1800 personnes dont 450 ingénieurs et cadres en 1960. Il s'élève, fin 1991, à 2300 personnes (dont plus de 1000 ingénieurs et chercheurs), auxquelles s'ajoutent 235 doctorants, soit 2535 personnes réparties géographiquement ainsi : 1200 à Châtillon, 285 à Chalais Meudon, 250 à Palaiseau, 235 à Modane, 360 au CERT, 110 à l'IMFL, 85 au Fauga, 10 à Salon. Il est de 2183 au 1^{er} janvier 1998. La qualité du personnel et des moyens mis en place en fait un établissement de tout premier ordre, d'un niveau comparable à celui de ses homologues européens ou américains.

Au plan des activités, la répartition en 1994 était la suivante : 30% à finalité militaire, 15% à finalité civile, 55% à finalité duale ; les ressources étaient à 80% d'origine militaire.

Les sites de l'ONERA

- Le Centre de *Châtillon* (siège),
- le Centre de *Chalais-Meudon* avec ses souffleries de recherches,
- le Fort de *Palaiseau* créé en 1958, avec ses installations d'essais de composants pour la propulsion aérobique et anaérobique,
- le Centre de *Modane-Avrieux*, créé en 1946, avec notamment la grande soufflerie sonique S1MA construite (1946-50) à partir d'éléments récupérés en Allemagne (destinés à la soufflerie d'Ötztal, dans le Tyrol autrichien), et mise en service en 1952 (Mach 1,02 atteint en 1955),
- le Centre du *Fauga-Mauzac*, créé en 1973 dans le cadre de la politique de décentralisation de l'époque, avec la grande soufflerie subsonique pressurisée F1 mise en service en 1977 et la soufflerie hypersonique à haute enthalpie F4 (1992),
- le Centre d'études et de recherches (CERT) de *Toulouse* constitué lors du transfert dans cette ville des centres de recherches CERA et CERMO de SUPAERO et incorporé à l'ONERA en 1968,
- l'Institut de mécanique des fluides de *Lille*, créé en 1930, rattaché en 1938 au GRA, en 1946 à l'ONERA, en 1950 à l'Université, en 1983 à l'ONERA, et qui prend en 1997 le nom de Centre de Lille de l'ONERA,
- Un détachement à *Salon-de-Provence*, dans les locaux de l'École de l'Air, de la direction études de synthèse, créé en 1992 en vue de mieux traiter les études systèmes au contact des futurs utilisateurs.



Fig. 1
Centre de Châtillon (Siège)



Fig. 2
Centre de Chalais-Meudon



Fig. 3
Centre de Modane-Avrieux



Fig. 4
Centre du Fauga-Mauzac



Fig. 5
Centre de Toulouse



Fig. 6
Centre de Palaiseau

Les souffleries, moyens expérimentaux essentiels de l'ONERA

La soufflerie S1ch de Chalais-Meudon, envisagée par Albert Caquot dès 1929, construite de 1932 à 1934 sous la direction de l'IC Antonin Lapresle (la plus grande soufflerie au monde à l'époque), engendre un écoulement à 50 m/s dans une veine elliptique de 16 m x 8 m. Elle est utilisée après guerre (et jusque dans les années 1970) pour des essais d'hypersustentation par contrôle de la couche limite et à des études de pilotage sur des maquettes motorisées, éventuellement « libres » dans la veine, ou de petits avions réels. Y font l'objet d'essais, entre autres, le Deltaviex (petit avion de recherche conçu par l'ONERA et qui fait l'objet de vols très brefs à Brétigny en 1953-55) et les volets hypersustentateurs du Breguet 941, notamment en vol libre, dans les années 1960.

Les grandes souffleries⁴⁰ :

- à Modane-Avrieux, après S1MA (D=8 m), sont mis en service : en 1961 la soufflerie S2MA avec une veine transsonique 1,75 m x 1,77 m jusqu'à Mach 1,3 et une veine supersonique 1,75 m x 1,93 m jusqu'à Mach 3⁴¹ ; en 1959, S3MA à rafales veine 0,56 m x 0,78 m, transsonique (Mach 0,1 à 1,3) et veine 0,76 m x 0,80 m supersonique (jusqu'à Mach 5,5) ; en 1974, S4MA hypersonique Mach 6 à 12, à rafales.
- Au Fauga-Mauzac, la soufflerie F1 continue, pressurisée à 4 bars (pour obtenir un Reynolds élevé), mise en service en 1977, permet des essais de maquettes industrielles jusqu'à 125 m/s (Mach 0,36) dans une veine de section de 4,5 m x 3,5 m.

Toutes ces souffleries, très utilisées par l'industrie, ne cessent d'être perfectionnées en ce qui concerne l'automatisation, l'instrumentation, et la mise en œuvre des maquettes.

Les essais en hypersonique sont effectués dans les souffleries de recherches R1 à R4 à rafales longues (de 10 à 60 s pour un domaine de Mach respectivement de 2 à 5, de 5 à 7, de 8 à 10, de 14) réalisées à Chalais-Meudon de 1959 à 1966, et dans R5 (Mach 7, basse densité, depuis 1989). Ces installations sont complétées par la soufflerie F4 à arc bref, soufflerie hypersonique à haute enthalpie, mise en service au Fauga-Mauzac en 1992 pour l'étude de la rentrée atmosphérique dans le cadre du programme Hermès.

Autres souffleries :

- au Fauga-Mauzac, la soufflerie de recherche F2 continue subsonique, jusqu'à 100 m/s, équipée en vélocimétrie laser 3D à grande course, veine de 1,4 m x 1,8 m, mise en service en 1983,
- à Chalais-Meudon, la soufflerie S2Ch subsonique jusqu'à 120 m/s, veine de diamètre 3 m, déménagée en 1962 d'Issy-les-Moulineaux (où elle avait été construite en 1919 sur des plans établis par Eiffel lui-même, pour l'EETIM et le STAé), mise en service en 1964, fermée en 1998 ; S3Ch transsonique, Mach

⁴⁰ Voir le fascicule Centres et moyens d'essais.

⁴¹ S2MA (depuis 1976) et S1MA (depuis 1994) sont équipés d'un système de trajectographie captive (STC) à 6 degrés de liberté, permettant les essais de séparation de charges tirées ou larguées depuis un avion porteur (tir de missiles Apache ou MICA sous Mirage 2000). S1MA permet l'essai de grandes maquettes d'avions motorisées avec des turbines alimentées à l'air comprimé (dispositif TPS, *Turbo powered simulation*, avec ou sans reverse).

0,2 à 1,3, veine de 0,80 m x 0,76 m, construite en 1948 (maquette au 1/8 de S1MA) ; S5Ch transsonique et supersonique (Mach jusqu'à 3,2), veine de 0,3 m x 0,3 m, mise en service en 1953, pour les essais de prises d'air,

- à Modane-Avrieux, la soufflerie R 4-3 pour les essais de grilles d'aubes de turbomachines (1977), le caisson d'essais S4B (séparation d'étages de lanceurs ou de missiles), les bancs de dynalpie à gaz froid BD1 et à gaz chaud BD2 (essais de tuyères et d'arrière-corps de réacteur),
- au CEPr de *Saclay*, soufflerie anéchoïque, ou « chambre sourde », CEPRA 19 ; inaugurée en mai 1977, exploitée en commun par l'ONERA et le CEPr (d'où son nom) pour étudier les effets acoustiques de l'écoulement d'air à des vitesses allant jusqu'à 60 m/s ou 130 m/s (dans une veine ouverte de diamètres respectifs 3 m ou 2 m) sur des maquettes actives (effets du vol sur le bruit de jet, tuyères, rotors...) ou passives (ailes),
- la soufflerie S1Ca de *Cannes*, construite par la SNCASO en 1942-44 pour le compte du ministère de l'Air (DM du 11 novembre 1941), subsonique jusqu'à 50 m/s, veine de diamètre 3 m, est exploitée à partir de fin 1944 ; affectée à l'ONERA (Direction de l'aérodynamique) le 1^{er} novembre 1946, elle est dirigée par Amédée Bévert et fermée en 1978⁴².

Le Centre d'essais de Modane doit beaucoup à Marcel Pierre* qui fut le principal artisan de sa création et le premier directeur des grandes souffleries de Modane-Avrieux (GSMA) en 1953. C'est en 1977 que la direction GSMA devient, avec la mise en service de la soufflerie F1 au Fauga-Mauzac, la direction des grands moyens d'essais (GME) ; seront successivement directeurs de GME devenu en 1997 GMT (Grands moyens techniques) : IG (FA) Gérard Dorey (1977), IG (Air) Xavier Bouis (1994), Maurice Bazin (2003)

La création d'un parc de souffleries constamment améliorées tant sur le plan des performances et de la qualité des mesures que sur celui de l'exploitation, et atteignant ainsi le meilleur niveau international, est une part importante de l'œuvre de l'Office. Confier à un organisme à vocation essentiellement scientifique la création et l'exploitation de moyens d'essais qui, à partir d'une certaine taille, ont le caractère industriel s'est révélé une solution féconde. Elle assure d'une part la meilleure qualité scientifique aux mesures intéressant les projets industriels. Elle met d'autre part à la disposition des chercheurs des moyens plus puissants que les souffleries de recherche.

Au Centre d'études et de recherches de Toulouse, le département d'aérothermodynamique construit en 1975 la soufflerie à induction T2, transsonique, pressurisée, qui est transformée en 1981 pour fonctionner en mode cryogénique, dont certains concepts seront directement transposés à la réalisation de la soufflerie européenne ETW, décrite en fin de texte. Combinant haute pression (3,5 bars), et basse température (injection d'azote liquide à 100 K), T2 permet ainsi d'atteindre un nombre de Reynolds très élevé de 30 millions, à un nombre de Mach de 0,8, pour un profil de 20 cm de corde dans la veine de 38 cm x 40 cm, ce qui en faisait à l'époque un moyen d'essai unique au monde, très moderne et largement utilisé par les constructeurs.

⁴² Cf. l'origine de S1Ca au paragraphe 2.2 IMF et souffleries.

L'activité de recherches de l'ONERA⁴³ est organisée, depuis l'origine jusqu'en 1997, par disciplines scientifiques : aérodynamique, énergétique, matériaux, résistance des structures et physique générale. Un département « études de synthèse » est créée en 1964 par l'IG (GM) Pierre Contensou qui l'animera remarquablement avant de devenir directeur scientifique central en 1971. L'évolution des importants moyens en mesures, calcul et simulation, utilisés par l'ONERA en matière de recherches et d'essais, nécessite une informatique toujours à la pointe du progrès et dont les moyens sont gérés à partir de 1977 au sein d'une direction particulière « Moyens d'informatique » que l'IG (FA) Claude Lecomte est le premier à diriger. Cette organisation subsiste jusqu'en 1997, année à laquelle le nouveau directeur de l'ONERA, l'IG Michel Scheller, la modifie, et également année qui voit la réforme de la DGA.

L'organisation change souvent : si les directions scientifiques opérationnelles sont restées stables de 1945 à 1997 : OA Aérodynamique, OE Énergétique OR Résistance des structures, OM Matériaux, OP Physique générale, DES Études de synthèse, CERT, IMFL, les postes de direction fonctionnelle ont varié dans le temps. Par exemple : DSC (directeur scientifique central) : Jean Ricq (1946), Robert Legendre⁴⁴ (1950), Pierre Contensou (1971), Pierre Carrière (1973), André Auriol (1978), puis DRE (directeur pour les recherches) : Marcel Barrère* (1979), puis DSG (directeur scientifique général) : Georges Duvaut (1985)⁴⁵ ; DT (directeur technique) : Jean-Claude Wanner (1971-78), puis DTG (directeur technique général) : Maurice El Gammal (1984), Gérard Dorey (1994)⁴⁶

On peut signaler les rapports qui ont été faits sur les missions et les activités de l'ONERA. Les premiers sont d'André Giraud (sorti en mai 1960), de Michel Vaillaud (demandé par le DMA, Jean Blancard* en décembre 1970, alors qu'il quitte la présidence du C.A. de l'ONERA pour le nommer à sa place ; rapport sorti en août 1972) et de Robert Dautray du CEA/DAM (mission d'évaluation de l'ONERA, rapport du 16 juillet 1982 sorti sous timbres MRI/DST et Ministère de la Défense/DRET). Ils fournissent des réflexions sur l'évolution de l'Office ainsi qu'un jugement sur l'orientation de ses activités. A ce propos, l'on peut s'interroger sur le type de processus décisionnel qui a conduit à ce que les études sur les turbomachines connaissent une éclipse de 10 ans (1957-67), « motivée par une attention prioritaire portée à d'autres sujets »⁴⁷... que sont les techniques spatiales. Le revirement se fera à l'initiative de Jean Blancard, alors PDG de SNECMA (1964-68), avant qu'il ne devienne délégué ministériel pour l'armement (5 avril 1968)⁴⁸.

⁴³ Voir la partie III.

⁴⁴ Avec le titre de directeur technique.

⁴⁵ Plus tard, Jean-Pierre Marec (1997), Michel de Gliniasty (2000).

⁴⁶ Plus tard, Daniel Bahurel (1997), Xavier Bouis (2003), avec un rôle opérationnel vis-à-vis des départements.

⁴⁷ IGA Pierre Contensou, *l'Armement*, n°65, avril 1981, sur la DRET, et Marcel Pierre*, dans son histoire du Centre de Modane (3^{ème} tome, 1996), mentionnent que ces études « sont arrêtées, à la demande des autorités de tutelle, au profit de recherches liées à l'exploration de l'espace ».

⁴⁸ Par une note 11493/DMA/D du 7 juillet 1969, il constate que les recherches sur les compresseurs font l'objet d'un financement DRME à l'ONERA « loin d'être négligeable », mais s'étonne « de la modicité des sommes qui leur sont consacrées par la DTCA et la DRME » eu égard à l'ensemble des crédits alloués à l'aéronautique.

En juillet 1993, le DGA Henri Conze, devant les difficultés budgétaires de l'époque, demande à l'ancien DGA Henri Martre de réfléchir sur le rôle à préconiser et le format à prévoir pour l'ONERA dans le nouveau contexte aérospatial européen : ce dernier fait une analyse approfondie de l'activité de l'ONERA, tant au sein de la communauté aérospatiale qu'en symbiose avec la recherche universitaire, considère qu'il faut la maintenir malgré un contexte budgétaire peu favorable, et propose divers ajustements, mais pas de bouleversements (rapport de décembre 1993 : *Les perspectives de l'ONERA*). En 1997 sort également un rapport, plus technique, du GIFAS sur l'aide que l'industrie aérospatiale française attend de l'ONERA et souhaite lui voir apporter toujours dans ce nouveau contexte international (cf. le rapport GIFAS/groupe de travail ONERA 7544 JM/RL du 19 mars 1997).

En novembre 1997, les ministres Claude Allègre (Recherche) et Alain Richard (Défense) confient à René Pellat⁴⁹ et à l'ancien DGA, l'IG Yves Sillard, la mission de réfléchir aux modalités d'un éventuel rapprochement entre l'ONERA et le CNES. A la suite des conclusions de leurs rapports, les deux ministres ont demandé en mars 1998 aux présidents des deux organismes de mettre en oeuvre les mesures préconisées à court terme pour resserrer les liens et améliorer la synergie, en précisant par ailleurs qu'en l'état actuel une fusion n'apparaissait pas souhaitable. On peut rappeler à cet égard qu'un tel rapprochement avait auparavant été évoqué par le député Arthur Paecht dans un rapport intitulé « une nouvelle donne pour l'espace militaire », dont la presse s'était fait l'écho fin janvier 1995. (cf. à la page 45)

Les problèmes liés à la propriété et au secret industriel seraient à évoquer, le principe étant que les résultats des recherches ONERA servent au plus grand nombre, mais la position de l'industriel peut varier suivant la société.

On peut conclure sur ce descriptif ONERA en déclarant que la compétence qu'il a acquise depuis 1946 lui a permis de remplir pleinement sa mission auprès des services officiels et de figurer dans le groupe restreint des experts internationaux du domaine. Il occupe encore aujourd'hui une place éminente au sein de la communauté internationale, mais il ne la maintiendra qu'au prix d'un effort financier suffisant.

8 - LE LABORATOIRE DE RECHERCHES BALISTIQUES ET AERODYNAMIQUES (LRBA)

Créé le 17 mai 1946, comme organisme de recherche relevant de la Direction des études et fabrications d'armement (DEFA), le LRBA est implanté à Vernon, avec la participation de 75 ingénieurs et techniciens allemands en provenance de Peenemünde (engins autopropulsés) et de 80 autres qui travaillaient au groupe Maybach de Friedrichshafen sur un nouveau moteur de char. Le LRBA se dote des moyens nécessaires à l'étude des missiles et des lanceurs, en matière d'aérodynamique, de propulsion, de pilotage et de guidage. Après avoir travaillé sur le V2, le LRBA s'oriente vers le programme de missile sol-air PARCA (Projectile

⁴⁹ X56 Ponts, président du CNRS (1989-92) puis du CNES (1992-95), haut-commissaire à l'énergie atomique (depuis 1998), président du Haut Conseil scientifique de l'ONERA depuis 1996, président du jury du prix Science et Défense depuis 1992 (cf. note n°26), décédé brutalement le 4 août 2003.

autopropulsé radioguidé contre avion) qui est conçu pour être l'élément essentiel du premier système d'armes de défense antiaérienne français. Plus de 200 tirs satisfaisants sont effectués, mais, en 1958, le système PARCA est abandonné, au profit du système américain Hawk retenu par l'OTAN. Parallèlement, le LRBA entreprend la réalisation de fusées-sondes. C'est ainsi que débute le programme Véronique destiné à propulser à 300 kilomètres d'altitude une charge de 300 kilogrammes. Ce programme intéresse rapidement les scientifiques qui étudient la haute atmosphère : près d'une centaine d'exemplaires de Véronique sont fabriqués. Au cours des dix premières années de son existence, le LRBA acquiert la maîtrise des techniques complexes, telles que celle de la propulsion liquide, des dispositifs de pilotage et de guidage par autodirecteur, ainsi que celles relatives à l'étude des écoulements en supersonique.

En 1958, le ministre des Armées attribue au LRBA une mission interarmées pour :

« effectuer toutes recherches nécessaires dans les domaines, non couverts par ailleurs, relatifs aux systèmes d'armes comprenant des engins téléguidés, servir de support technique aux services techniques parisiens et leur fournir des évaluations et des expertises sur des projets sur lesquels ils seraient consultés ».

Parallèlement à cette mission à caractère militaire, le LRBA participe activement à l'effort spatial français qui prend son départ officiel, avec la loi de création du CNES le 19 décembre 1961. Le 9 mai 1962 est signé l'accord CNES / DMA organisant la réalisation du lanceur Diamant-A, pour laquelle le LRBA joue un rôle essentiel, en complément de la SEREB. La compétence acquise avec le programme Véronique permet la réalisation d'un ensemble propulsif puissant à ergols liquides, le moteur Vexin de 28 tonnes de poussée, pour le premier étage de la fusée Diamant. Celle-ci met en orbite le premier satellite français Astérix le 26 novembre 1965. Le lanceur Diamant marque l'aboutissement des véhicules expérimentaux de la série des « Pierres précieuses », Agate, Topaze, Émeraude et Saphir. Le LRBA se voit alors confier la responsabilité du développement et de la mise au point du deuxième étage Coralie du lanceur spatial de l'ELDO. Pour le programme Ariane, le LRBA effectue les premières études et les essais du moteur Viking qui sera ensuite utilisé avec un grand succès par Arianespace.

Dans cette même période, le LRBA se dote d'un laboratoire d'évaluation des composants inertiels. Il acquiert ainsi une grande expérience dans le domaine du guidage, ce qui conduit le Délégué ministériel pour l'Armement à lui confier, en 1968, une mission inter-directions sur les techniques inertielles.

L'année 1967 voit le rattachement du LRBA à la Direction technique des engins (DTEN) créée deux ans auparavant. Ce rattachement manifeste la vocation interarmées du LRBA, ainsi que son rôle étatique d'expert technique pour la FNS. La SEREB se voit, de son côté, confier la maîtrise d'œuvre des missiles stratégiques. Celle relative aux engins scientifiques et expérimentaux incombe au CNES. D'autre part, le secteur industriel de la propulsion est restructuré avec la création de la SNPE (1971) et de la SEP (1969). Cette situation nouvelle conduit le ministre des Armées à décider, en 1971, de transférer les activités du LRBA sur la propulsion à liquide à la SEP. Le 1^{er} octobre 1971, la coupure est réalisée et l'effectif du LRBA passe d'environ 1 000 personnes à 460 personnes dont les missions sont strictement étatiques.

Les années 1970 voient se développer ces missions, avec l'élargissement des activités inertielles, le développement des études et des essais de fiabilité,

l'accroissement de l'assistance aux directions de programme, incluant la participation à la mise en service des systèmes opérationnels.

En 1986, le LRBA se voit confier une mission interarmées sur l'environnement concernant les contraintes que le milieu extérieur fait subir aux matériels militaires. A la fin des années 1980, le LRBA se dote d'un laboratoire d'évaluation de viseurs d'étoiles et de systèmes astro-inertiels. D'autre part, le LRBA mène, depuis 1985, des travaux sur le système GPS (*Global positioning system*) qui est déclaré opérationnel par les Américains le 8 décembre 1993. La compétence acquise par le LRBA dans ce domaine lui vaut, en février 1993, d'être nommé, par le Délégué général pour l'Armement, centre technique pilote inter directions pour les systèmes de navigation par satellites. En 1997, le LRBA est rattaché à la Direction des centres d'expertise et d'essais de la DGA

Il convient aussi de rappeler quel fut le rôle du LRBA en aérodynamique supersonique et hypersonique. En 1945, la France ne dispose d'aucune installation d'essais, à caractère quelque peu industriel, pour étudier l'aérodynamique des engins volant en supersonique. Il faut donc se doter rapidement d'une soufflerie couvrant la gamme de Mach 1,35 à 4,4, en prévision des développements à venir dans le domaine des obus, des roquettes et des missiles. Le choix se porte sur un projet étudié par des aérodynamiciens allemands recrutés par le LRBA. Il vise à réaliser une soufflerie de taille intermédiaire, mais pressurisée, et à fonctionnement continu, de façon à pouvoir utiliser les procédés de mesure disponibles à l'époque. La réalisation en est confiée à l'IC (FA) Pierre Carrière qui, au préalable, fait une étude approfondie du circuit aérodynamique, notamment de la tuyère d'admission à la veine d'essais où l'écoulement doit être aussi uniforme que possible. La soufflerie doit pouvoir fonctionner en circuit fermé, la température de l'air étant maintenue à l'ambiante grâce à un échangeur, ou en circuit ouvert vers l'extérieur (cette possibilité était requise pour les essais de missiles propulsés). Grâce à la compétence de Pierre Carrière et de son équipe, les caractéristiques obtenues sont conformes aux spécifications : Mach 1,35 à 4,4, selon les différentes tuyères utilisées, veine de 40 cm x 40 cm, pressurisée entre 1,1 bar et 8 bars, selon le nombre de Mach. Ces caractéristiques sont obtenues grâce à deux compresseurs entraînés chacun par un moteur électrique de 6 500 kW. La soufflerie C 4 est équipée d'un dard avec balance pour la mesure des efforts sur les maquettes et de capteurs de pression et de dispositifs de visualisation qui en font, dès 1952, un moyen parfaitement adapté pour la mise au point des missiles tactiques, des missiles stratégiques, des corps de rentrée, ainsi que des fusées-sondes et des lanceurs spatiaux. Il faut aussi mentionner l'apport décisif de C 4 pour la réalisation des entrées d'air des différents Mirage et de Concorde. En outre, les essais en jet libre furent effectués pour obus, roquettes et missiles dotés d'impulseurs à poudre et pour les statoréacteurs.

En plus de C 4 (aujourd'hui démantelée malgré ses caractéristiques uniques en France), le site aérodynamique de Vernon dispose d'une soufflerie à rafales C 2 et d'un tunnel hyperbalistique équipé d'un canon à gaz léger (mis au point par l'IC FA Alain Journeau, ancien de l'établissement de la DEFA de Bourges) permettant de propulser des maquettes de 300 grammes à des vitesses de 5 à 6 km/s. Ce tunnel, de 120 m de long, est doté de dispositifs de mesure du sillage de rentrée. Ce moyen d'essais au sol, unique en Europe, permet de comprendre les phénomènes électromagnétiques qui se produisent à la rentrée, dans l'atmosphère, des ogives de missiles balistiques stratégiques et des capsules spatiales.

Après avoir joué un rôle essentiel auprès des Services officiels et des industriels pendant près de 50 ans, le site aérodynamique de Vernon est fermé en 2 000. Ses installations étaient complémentaires de celles de l'ONERA qui bénéficie de la compétence de Pierre Carrière, appelé en 1956, par Maurice Roy, pour y diriger les équipes d'aérodynamique. Cet expert, de renommée mondiale, fait venir à l'ONERA plusieurs ingénieurs militaires des fabrications d'armement qu'il a particulièrement appréciés au LRBA :

- André Auriol, qui y fut son adjoint, avant d'être nommé, en 1965, co-directeur français de l'ISL, puis, en 1979, directeur général de l'ONERA,
- Roger Marguet, qui a notamment été chargé au LRBA des essais de statoréacteurs, domaine où il excelle ensuite à l'ONERA,
- Claude Capelier, qui sera un éminent directeur de l'aérodynamique, à la suite de Pierre Carrière lorsque celui-ci devient directeur scientifique central de l'ONERA,
- Gérard Dorey, qui est en charge des grands moyens d'essais de l'ONERA, avant d'en devenir le directeur technique général.

Ainsi, tant en aérodynamique que dans le domaine de la propulsion et du guidage, aussi bien pour l'aéronautique que pour le spatial, le LRBA a été un acteur essentiel dans le renouveau français de la grande période 1945-1995. Il a participé activement à la grande majorité des programmes aéronautiques français et a fortement contribué à faire de la France, dès 1965, la troisième puissance spatiale. Sa vaste compétence en a fait l'expert officiel de la DGA dans un très large domaine essentiel pour la Défense.

Les Directeurs du LRBA, ingénieurs des fabrications d'armement jusqu'en 1980, furent à la date de leur prise de fonctions : 1946 IG Paul Libessart ; 1949 IC Jean Sorlet ; 1953 IC Pierre Girardin ; 1962 IC Jacques Marchal ; 1971 IG (FA) Damien Bagaria ; 1980 IC (GM) François Simon ; 1985 IC (Tél. A) Bernard Laurent ; 1989 IC (Air) Jacques Darricau ; 1994-97 IC (Télé. A.) Lyonel Guedard.

9 - REMARQUES SUR LE DISPOSITIF DE GOUVERNANCE

À la fin années 1980, la DGA a considéré qu'il était utile d'assurer, en partie, le financement des établissements publics dont elle avait la tutelle, par des contrats obtenus auprès des administrations ou des industriels. En ce qui concerne l'ONERA, ceci s'est traduit par une diminution du pourcentage du budget de fonctionnement provenant de la subvention et, par conséquent, par la nécessité de présenter aux services officiels et aux industriels des propositions de nombreux contrats dont la négociation demanda un gros effort, aussi bien des chercheurs et des ingénieurs de l'Office que des services administratifs. En outre, les délais de passation de ces contrats étaient peu favorables à la bonne gestion budgétaire de l'Office. Cette politique a effectivement entraîné la mobilisation souhaitée pour les relations avec les futurs utilisateurs des résultats des études et recherches, mais elle a tiré vers l'aval, c'est à dire vers une recherche de plus en plus appliquée, l'activité des organismes de recherche, tels que l'ONERA. Il appartenait à la DRET, responsable de la tutelle scientifique et technique de l'ONERA, de veiller au maintien d'une activité de recherche de base, à un niveau convenable pour assurer l'avenir.

On sera peut-être surpris par le foisonnement⁵⁰ des instances impliquées dans l'activité de recherche, qu'il s'agisse des centres de recherche, publics ou privés, des administrations dispensant les contrats et les crédits, ou des organismes étatiques de supervision ou de coordination.

Si la dispersion au niveau industriel était due en partie au manque de concentration résiduel du secteur, surtout dans le domaine des équipements, il est certain que la concentration sur l'hexagone qui résultait des blocages pour une coopération européenne sans réticences, pouvait inciter les donneurs d'ordre à favoriser une certaine forme de concurrence. L'évolution des structures de l'industrie européenne n'a pas été dans un sens qui aurait pu simplifier la structure de la recherche. Pour les établissements publics, le rattachement de la plupart des établissements de recherche à un ministère civil, alors que l'ONERA en particulier relevait du ministère de la Défense, était un frein puissant à des regroupements. Le regroupement du CNES et de l'ONERA, envisagé dans un rapport parlementaire (voir à la page 41), n'a eu ainsi aucune suite. Pour ce qui est des organismes de l'État administrant la recherche aérospatiale, les réunions de grands savants, chacun spécialisé dans une discipline particulière, semblent avoir été peu productives ; à l'inverse, celles associant chercheurs et ingénieurs travaillant dans des domaines scientifiques et techniques voisins ont été beaucoup plus efficaces.

D'ailleurs ce souci de ne pas partager la connaissance avec des concurrents potentiels est illustré par d'innombrables exemples. On peut citer le cas du moteur de l'avion de combat européen : au premier semestre 1985, le directeur de la DCAé propose à l'état-major technique de Rolls-Royce, à Bristol, de créer un bureau d'étude commun pour le développement de la turbine haute pression qui était revendiqué par SNECMA et Rolls-Royce ; la réponse de l'industriel britannique a été très claire : « nous refusons car nous estimons être plus avancés que SNECMA en recherche sur le sujet et il n'est pas question de partager. » Cet état d'esprit, d'ailleurs compréhensible et réciproque, se retrouvait aussi sur un plan national : Au salon du Bourget 1977, le premier ministre Raymond Barre avait annoncé la rationalisation de l'industrie aérospatiale française et la création de la SOGEPA détenant la participation de l'État dans l'Aérospatiale et une participation minoritaire dans AMD-BA. La société fut effectivement constituée et l'on essaya de lui donner un rôle d'harmonisation des activités des deux constructeurs, notamment dans le domaine de la recherche. Le résultat fut minime : même entre deux industriels non présentement concurrents, l'incertitude sur les créneaux futurs interdisait tout transfert de savoir.⁵¹

⁵⁰ La présente méthode de gouvernance succinctement décrite, et de caractère interarmes, pourrait éventuellement, dans le futur, faire l'objet d'une voie de recherche historique.

⁵¹ Une entente Dassault/SNIAS se fit sur la technologie des matériaux composites et donna lieu à un financement État pour la réalisation d'un atelier composite pilote commun aux deux sociétés à Suresnes. Ce financement provint en partie des dividendes perçus la première année par la SOGEPA, la direction du Budget (Finances) le refusant à partir de la deuxième année.

CHAPITRE 2

LES RELATIONS DE LA DGA AVEC LES AUTRES INSTITUTIONS

1 - LES RELATIONS AVEC LA DGRST ET LA RECHERCHE CIVILE

Au moment où se sont créées les grandes institutions de recherche que sont la DRME et la DGRST, Délégation à la recherche scientifique et technique, des liens se sont créés entre ingénieurs et scientifiques de même discipline au cours d'échanges se faisant dans les comités de la DGRST ou les actions concertées de la DRME. En tant que personnalité de la recherche passant du militaire au civil, il faut citer Pierre Aigrain, qui, provenant de la DRME (1961-65), est devenu délégué à la recherche scientifique et technique (1968-73) puis secrétaire d'État à la recherche (1978-81).

Les ministres en charge de la recherche civile et les secrétaires d'État à la recherche sont, de 1960 à 1982, les suivants :

5 février 1960-avril 1962 – Pierre *Guillaumat*, ministre délégué auprès du Premier Ministre, chargé de la recherche scientifique et des questions atomiques et spatiales.

Création en décembre 1958 de la DGRST.

1962-65 – Gaston *Palewski*, ministre d'État chargé de la recherche scientifique et des questions atomiques et spatiales.

1965-66 – Yvon *Bourges*, ministre de la recherche scientifique et des questions atomiques et spatiales.

1966-67 – Alain *Peyrefitte*, ministre de la recherche scientifique et des questions atomiques et spatiales.

1967-68 – Maurice *Schumann*, ministre d'État chargé de la recherche scientifique et des questions atomiques et spatiales.

1968-69 – Robert *Galley*, ministre délégué auprès du Premier ministre chargé de la recherche scientifique et des questions atomiques et spatiales.

1969-72 – François-Xavier *Ortoli*, ministre du développement industriel et scientifique.

1972-74 – Jean *Charbonnel*, ministre du développement industriel et scientifique.

1974-76 – Michel *d'Ornano*, ministre de l'industrie et de la recherche, DGRST.

1976-78 – Jacques *Sourdille*, secrétaire d'État à la recherche auprès du Premier Ministre.

1978-81 – Pierre *Aigrain*, secrétaire d'État à la recherche auprès du Premier Ministre.

1981-82 – Jean-Pierre *Chevènement*, ministre d'État, ministre de la recherche et de la technologie.

Création d'un « grand » ministère de la recherche entraînant la suppression fin 1981 de la DGRST.

1982-83 – Jean-Pierre *Chevènement*, ministre d'État, ministre de la recherche et de l'industrie

La Délégation générale à la recherche scientifique et technique est rattachée de 1960 à 1969 au Premier Ministre, de 1969 à 1976 au ministre chargé de l'industrie et

de la recherche et de 1976 à 1981 au secrétaire d'État à la recherche auprès du Premier Ministre. Elle est supprimée à la fin de 1981.

Les délégués sont successivement Pierre Piganiol (décembre 1958), André Maréchal (1961), Pierre Aigrain (1968), Hubert Curien⁵² (1973), Bernard Grégory (1976-décède le 25 décembre 1977), auxquels succèdent les directeurs de la DGRST Roland Morin (1978) et Claude Fréjacques (1980 à fin 1981)

Créée fin 1958, placée sous l'autorité du Premier Ministre, la DGRST est chargée de coordonner l'activité des ministères civils dans le domaine de la recherche, de gérer le fonds d'aide à la recherche scientifique et technique, et, jusqu'à la fin des années 1970, le fonds d'aide au développement.

En 1975, un décret du 20 octobre rappelle que la politique de la recherche scientifique et technique est préparée par la DGRST, soumise à l'avis du CCRST⁵³ et délibérée en comité interministériel, et que le CCRST constitue l'instance consultative du gouvernement pour tous les problèmes généraux de la politique nationale de la recherche.

Les actions menées au titre du fonds de la recherche le sont sous forme d'« actions concertées » pilotées par des comités scientifiques dont les membres sont nommés *intuitu personae* en fonction de leur compétence. C'est ainsi que deux ingénieurs de la DRET sont nommés en 1981 présidents de comités (en électrotechnique et en composants électroniques). Un comité de liaison DGA-MRT, officialisant les relations entre recherche militaire et recherche civile, voit le jour cette année-là. Il perdurera par la suite sous différentes formes.

Par décret du 1^{er} décembre 1981, le nouveau MRT met fin à la DGRST et crée : une mission scientifique et technique (MST), une direction du développement scientifique et technologique et de l'innovation (DESTI), une direction de la politique générale de la recherche (DPGR), organisation qui durera jusqu'en 1985. En décembre 1985, la DPGR et la DESTI sont remplacées par la direction de l'organisation et de la promotion de la recherche (DOPR), qui reprend en partie les attributions de la DESTI disparue, et par la direction de l'administration et du financement de la recherche (DAFR), organisation qui sera remodelée après le changement de gouvernement de 1986

Selon les organisations gouvernementales, le rattachement ministériel de la recherche est variable : placée auprès du Premier Ministre, ou ministère de plein exercice ou liée à d'autres ministères, tels que ceux en charge de l'Industrie, de l'Enseignement supérieur (lui-même étant rattaché ou non à l'Éducation nationale...).

L'instruction de la recherche et développement « aéronautique civile » est conduite dans le BCRD (Budget civil de la recherche et développement) au sein d'un département technologique du ministère qui au gré des réorganisations verra ses attributions s'étendre à d'autres technologies avancées, tels l'énergie nucléaire, les

⁵² Hubert Curien sera ministre de la recherche et de la technologie à deux reprises (1984-86 et 1988-92), puis ministre de la recherche et de l'espace (1992-93).

⁵³ Le Comité consultatif de la recherche scientifique et technique, créé en 1958, est remplacé en 1982 par le Conseil supérieur de la recherche et de la technologie (décret du 30 novembre 1982), d'audience plus large (cf. note n°17).

transports ou la construction navale, pour les abandonner puis pour en acquérir de nouvelles. Suite à l'initiative en 1987 de la Commission européenne (cf. plus loin) de soutenir la recherche et le développement technologique aéronautique dans le PCRDT, c'est l'ingénieur qui instruisait l'aéronautique dans le BCRD qui en sera tout naturellement chargé (Michel de Vriès de 1987 à 1997 ; puis Michel Garcia jusqu'en 2004, conjointement avec l'IC Christophe Mathieu de 1998 à 2000) En 1995, le département du ministère de la recherche en charge de l'aéronautique reprend l'Espace et sera dirigé par l'IC Arnaud Salomon (1998-2000) puis l'IC Christophe Mathieu (2000-2003).

2 - LES INSTITUTS DE MECANIQUE DES FLUIDES ET LES SOUFFLERIES (HORS ONERA)

On rappelle ci-après les établissements qui ont joué un rôle majeur dans les recherches aérodynamiques depuis le début de l'aéronautique. A la création en 1928 du ministère de l'Air, *Albert Caquot*, qui prend la direction générale technique de l'aéronautique, lance la construction à Chalais-Meudon de la grande soufflerie S1, la plus grande du monde à l'époque. C'est l'IC Antonin Lapresle, chef de la section aérodynamique du nouveau Service des recherches aéronautiques qui en est responsable (il débute en 1909 avec Gustave *Eiffel* à la soufflerie du Champ de Mars qui est transférée en 1912 à Auteuil, au 17 rue Boileau, et dont il prend la direction en 1921). En même temps A. Caquot provoque dans l'université, dont il attend la coopération scientifique, la fondation des premiers instituts de mécanique des fluides. Voici un bref historique sur le développement de ce potentiel français en souffleries (hors ONERA) et en instituts⁵⁴.

L'Institut aérotechnique (IAT) de St-Cyr-l'École

L'IAT est créé en 1910 par l'Université de Paris grâce à un don généreux d'Henry Deutsch de la Meurthe. Il est en 1920 mis à la disposition du STAé. En 1933, il est rattaché administrativement au Conservatoire des Arts et Métiers (CNAM). Il y est construit jusqu'à une dizaine de souffleries (dont certaines pour l'industrie automobile et la SNCF). Parmi celles subventionnées par le STAé, il faut citer S2 (1936, veine : 1,8 m x 2,2 m, 55 m/s) et surtout *Sigma 4* (1960, veine : 0,85 m x 0,85 m, mach 0,4 à 2,7 à variation continue). Cette dernière soufflerie, supersonique, a été conçue (1950-60) par Jean Brocard et a été largement utilisée par les Avions Marcel Dassault. Les directeurs de l'IAT ont été successivement : les professeurs à la Sorbonne (chaire d'aviation) Charles Maurain (ENS 1890, 1910-20) et Albert Toussaint (1920-52), Frédéric Gruson (SUPAERO 28, 1952-71), Maurice Maynard (1971-92).

En liaison avec l'IAT de St-Cyr, il faut mentionner la création, sous l'impulsion de l'AICMA (Association internationale des constructeurs de matériel aérospatial), de la SESSIA, « Société d'études de constructions de souffleries, simulateurs et instrumentation aérodynamique » (appelée à l'origine centre de formation en aérodynamique expérimentale), dont le cofondateur et premier directeur général (1960-75) est Jean Brocard (sont directeurs après lui : Louis Girerd de 1975 à 1983,

⁵⁴ Avec la participation des professeurs Christan Maresca (IMFM), Michel Coantic (IMST) et Thierry Alziary de Roquefort (CEAT Poitiers), anciens directeurs de ces instituts universitaires, que le coordinateur remercie de leur contribution.

puis Clément Dousset de 1983 à 93). La SESSIA fera partie du consortium architecte industriel qui construira (1988-95) la soufflerie transsonique européenne ETW (cf. paragraphe 3 coopération internationale)

Les autres souffleries

Le STAé fait installer trois souffleries dans ses laboratoires d'Issy-les-Moulineaux : la plus grande (veine de 3m) est transférée en 1962 à l'ONERA à Chalais-Meudon pour devenir S2Ch.

*La soufflerie de Cannes S1 Ca*⁵⁵ : sa construction est décidée par le STAé en 1941 pour fournir un moyen d'essai (veine de 3 m de diamètre, 50 m/s) au groupe d'ingénieurs des sociétés nationales replié « en zone libre », le « Groupe technique de Cannes »⁵⁶. Elle est dirigée par Marcel Pierre et supervisée par Henry Girerd⁵⁷ (qui a conçu la balance GS d'un type nouveau à dynamomètres, avec Jacques Seince, SUPAERO 37). En mars 1945, on y essaye la première maquette (motorisée) du transport SO 30 R (préfigurant le bimoteur SO 30 P) ; en avril 1946, celle du premier avion à réaction français le SO 6000 Triton. En novembre 1946, la soufflerie est affectée à l'ONERA / direction aérodynamique pour différentes recherches sur les ailes à grande flèche, à flèche variable, l'hypersustentation, le décollage vertical... Elle est dirigée par Amédée Bévert jusqu'à sa fermeture en 1978.

Le Laboratoire d'aérothermique du CNRS Meudon Bellevue est créé en 1958 par Edmond Brun, initiateur de l'aérodynamique spatiale avec les premières souffleries hypersoniques à gaz raréfiés et à plasmas. Il est transféré (1995-2000) sur le campus d'Orléans.

Les instituts de mécanique des fluides

A l'incitation du sous-secrétaire d'État à l'Air, André Laurent-Eynac, une première chaire de mécanique des fluides est créée en 1924 à la faculté des sciences de Paris, et attribuée à Paul Painlevé qui laisse la place en 1927 à Henri Villat (ENS 99). A partir de l'expérience parisienne, le ministère de l'Air et l'université décident de créer en 1929-1930 quatre instituts de mécanique des fluides (Paris, Lille, Marseille et Toulouse) et cinq enseignements annexes (Caen, Lyon, Nantes, Poitiers, Strasbourg). L'IMF de Paris est le plus grand ensemble par le budget et le nombre de chaires attribuées (Adrien Foch, Henri Béghin ENS94 et H.Villat).

L'Institut de mécanique des fluides de Marseille

L'IMFM est créé le 16 mai 1930. Joseph Pérès⁵⁸, professeur à la faculté des sciences de Marseille, est nommé directeur. Il est assisté de Lucien Malavard⁵⁹, alors maître-assistant, qui développe dans les locaux de l'IMFM, situés alors allées Léon Gambetta, les méthodes de calcul expérimental utilisant l'analogie rhéoelectrique

⁵⁵ Philippe Poisson-Quinton*, « La soufflerie de Cannes », *Nouvelle revue Aéronautique et Astronautique*, n°1, mars 1994, p.88.

⁵⁶ Philippe Jung, « l'industrie aéronautique française repliée à Cannes durant la guerre », *Revue Pégase*, n°115, janvier 2005, pages 17 et 18.

⁵⁷ Chargé des études aérodynamiques au G.T. de Cannes (1941-45), il sera directeur scientifique « aérodynamique » de l'ONERA (1946-56) et professeur au CNAM (1949-73).

⁵⁸ « Joseph Pérès et le renouveau de la mécanique en France », par Paul Germain, Secrétaire Perpétuel, séance du 12 décembre 1977 de l'Académie des sciences, 15 pages.

⁵⁹ *Hommage au professeur Lucien Malavard*, 13 mars 1991 au ministère de la recherche et de la technologie, plaquette ONERA de 72 pages.

appliquée aux profils d'aile. En 1932, L. Malavard suit J. Pérès à Paris : ils installent leur laboratoire dans les locaux du STAé, avenue de la Porte d'Issy, que le ministère de l'Air a attribués à *l'Institut de mécanique des fluides de Paris*. En 1945, ce laboratoire est rattaché au CNRS et devient, sous la direction de L. Malavard, le Laboratoire de calcul expérimental analogique, LCEA, qui en 1950 est transféré à l'ONERA Châtillon, puis deviendra en 1972 le LIMS, Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur, à l'Université d'Orsay.

Sont successivement directeurs de l'IMFM : André Marchaud (1932), René Thiry (1939, ENS 1907, professeur à la Sorbonne), Jacques Valensi (1948, ECP27, professeur à la Faculté des sciences de Marseille), Jacques Chauvin (1977, professeur à l'Institut von Karman). C'est après la guerre que l'Institut s'installe dans des locaux cédés par le Rectorat d'Aix-Marseille, place Victor Hugo, près de la gare St. Charles, et qu'est construite la soufflerie « elliptique » (veine elliptique 3,2 m x 2,4 m, 40 m/s) qui abrite jusqu'à fin 1980 de nombreux essais d'avions (*Caravelle*,...) et d'hélicoptères. L'IMFM est reconnu par le CNRS comme l'un de ses premiers « laboratoires associés » ; il reçoit en 1965 le label LA03 sous le nom de : « Laboratoire de recherches aérospatiales ». On y construit une soufflerie à grille d'aubes (veine verticale : 0,4 m X 0,3 m ; jusqu'à mach 4) pour des essais de compresseur Hispano-Suiza, puis SNECMA. Le professeur Jacques Chauvin, spécialiste de turbomachines, renforce cette activité jusqu'à son départ en 1985 pour le Laboratoire d'énergétique et de mécanique des fluides interne (LEMFI) qu'il va créer à la faculté d'Orsay. Christian Maresca, directeur de recherches au CNRS, lui succède alors et fonde en 1991 l'Institut de mécanique de Marseille, qui regroupe l'IMFM et l'IMST devenus entre temps UER de l'Université d'Aix-Marseille II.

En 1991 est construite sur le site de Luminy la soufflerie subsonique S1L (deux veines d'essais de 3 m et 4 m de diamètre, vitesses respectives : 100 m/s et 65 m/s), en remplacement de la soufflerie elliptique de l'IMFM devenue vétuste. S1L donne lieu depuis à une activité de recherche soutenue en aérodynamique instationnaire appliquée aux rotors d'hélicoptères

Au départ de Christian Maresca en 1993 pour la Direction de l'Institut méditerranéen de technologie, Bernard Forestier, Directeur de recherche au CNRS, prend la direction de l'IMFM, et Daniel Dufresne, Professeur des universités, celle de l'Institut de mécanique de Marseille.

Le bâtiment IMFM de la place Victor Hugo est détruit lors de l'aménagement de la gare TGV de Marseille. Seuls subsistent actuellement à Luminy les locaux de la soufflerie subsonique S1L rattachés à la Faculté des sciences du sport (Université de la Méditerranée) en qualité d'Unité mixte du CNRS sous le nom de Laboratoire d'aérodynamique et de biomécanique du mouvement (LABM). Ce laboratoire dirigé par Daniel Favier, Directeur de recherche CNRS, s'est spécialisé pour sa partie aérodynamique dans le domaine des hélicoptères. Le laboratoire des Lasers également implanté sur Luminy est, quant à lui, rattaché au département de Physique de la Faculté des Sciences.

A partir de 1995, les entités CNRS, IMFM et IMST sont regroupées avec une quatrième, le LRC (Laboratoire de recherche en combustion), dans l'Unité mixte CNRS IRPHE (Institut de recherche sur les phénomènes hors d'équilibre), dirigée par le Professeur P. Clavin, et située au parc scientifique et technologique de Château-Gombert.

L'Institut de mécanique statistique de la turbulence

L'IMST est créé en 1960 par Alexandre Favre*, professeur (1951-1980) de mécanique de l'atmosphère et météorologie à la Faculté des sciences de Marseille. Il est issu du Laboratoire de mécanique de l'atmosphère et météorologie, créé en 1947 et rattaché administrativement à l'IMFM. Il répond à la demande de recherches à caractère fondamental sur la turbulence faite par la DTI (IG Pierre Vernotte) et l'ONERA (M. Roy, R. Legendre, P. Carrière et P. Rebuffet*). Il s'est d'abord doté d'un parc de souffleries et autres installations subsoniques précises et hypoturbulentes. Deux équipements lourds sans équivalent ont ensuite été conçus et réalisés : la soufflerie supersonique à faible niveau de turbulence et de bruit (1960), et la grande soufflerie air-eau pour la simulation des échanges à l'interface atmosphère-océan (1970). L'IMST a été durablement le laboratoire le mieux équipé au monde pour l'étude expérimentale de la turbulence. Les travaux de son directeur fondateur (1960-80), membre (1977) de l'Académie des sciences, ont connu de nombreuses applications et les « moyennes de Favre » sont aujourd'hui couramment utilisées. Les directeurs lui succédant sont : Régis Dumas (1980-84), Michel Coantic (1985-92), Louis Fulachier (1993-95).

Entre 1960 et 1995, l'IMST poursuit, dans le cadre de contrats avec l'ONERA et la DRME/DRET, de multiples recherches fondamentales en aérodynamique subsonique et supersonique, principalement sur les problèmes de couches limites, jets et sillages. Après le regroupement en 1995 avec l'IMFM et le LRC (voir plus haut), la plupart des installations subsoniques sont modernisées et déplacées dans les nouveaux locaux de l'IRPHE à Château-Gombert. Elles y sont notamment utilisées pour des études sur les sillages des avions gros porteurs, les écoulements inter-étages des réacteurs (et l'aérodynamique automobile). Également rattachée à l'IRPHE, la grande soufflerie air-eau de Luminy poursuit des recherches sur les transferts air-mer et leur télédétection par voie satellitaire. Maintenu jusqu'ici à Saint-Charles, la soufflerie supersonique hypoturbulente est désormais rattachée à l'Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels qui la déplace en 2008 à Château-Gombert. On y étudie le mélange supersonique et les instationnarités des interactions onde de choc/couche limite, problèmes importants pour l'aérodynamique des prises d'air et des tuyères.

L'Institut de mécanique des fluides de Lille (IMFL), 1930-1946, 1950-1983

Créé le 1^{er} novembre 1930 au sein de l'université, dans le cadre des mesures prises par Albert Caquot sur la recherche, et dirigé jusqu'en 1945 par le Professeur Joseph Kampé de Fériet, qui oriente les études vers l'analyse de la turbulence et la mécanique du vol, l'IMFL se dote en 1934 d'une soufflerie basse vitesse de 2 m de diamètre et en 1938 d'une soufflerie verticale de 2 m de diamètre, au profit d'industriels de l'aéronautique, notamment de la société Henry Potez à Méaulte. L'IMFL possède un service de météorologie, faisant partie du réseau ONM, qui assure la couverture météorologique des lignes commerciales ; il en développe un anémoclinomètre pour la mesure du vecteur vitesse vent, et aussi avion. L'établissement est rattaché de 1938 à 1946 au GRA dirigé par l'IG Léon Poincaré ; il se replie à Toulouse en 1940-44, accueilli dans les locaux de l'Institut de mécanique des fluides du Professeur Léopold Escande. L'ONERA reprend le 1^{er} septembre 1946 le contrat de gestion de l'IMFL liant le GRA à l'Université de Lille, tout en mutant une partie des ingénieurs dans la région parisienne, puis résilie ce contrat le 21 septembre 1950 ; durant cette période de rattachement, l'IMFL devient un centre de formation de techniciens de l'ONERA pour les essais en soufflerie. Le nouveau

directeur André Martinot-Lagarde (1945-1968) oriente l'Institut vers les problèmes liés à la sécurité des vols : ainsi, avec le soutien du STAé, il développe la technique des maquettes de vol libre tout d'abord dans la nouvelle soufflerie verticale de vrille SV4 (qui a été ensuite équipée d'un montage « tourne-broche » à balance rotative), de 4 m de diamètre, remplaçant, en 1966, l'ancienne de 2 m, puis, dans la station de catapultage, pour les études d'atterrissage, de crash et de réponse à la rafale. Certaines de ces installations sont uniques en Europe, et utilisées par l'industrie même non européenne. Ces essais en vol libre nécessitent la mise au point de méthodes de construction de maquettes légères qui soient représentatives en similitude géométrique, massique et inertielle. De 1968 à 1983, sous les directions successives du professeur G. Gontier et de Jean Gobeltz, se poursuivent les études de conception de maquettes dynamiquement semblables destinées aux essais de flottement ainsi que de maquettes adaptées aux essais en souffleries cryogéniques, ce dont l'IMFL s'est fait une spécialité. En 1983, l'Institut est rattaché pour la seconde fois à l'ONERA ; il conserve son originalité et sa spécificité dans le domaine de la sécurité des vols, avec un effort particulier sur la tenue structurale des cellules d'avions et des rotors d'hélicoptères. Ses nouveaux directeurs, anciens de l'ONERA à une exception près, l'IG Marc Pianko en 1983, l'IG (FA) Daniel Bahurel en 1988, Francis Dupriez en 1995, Anne-Marie Mainguy en 2001, s'attachent à resserrer les liens avec la maison mère ainsi qu'avec les universités locales et la région, tout en continuant à investir, y compris avec les fonds européens. L'IMFL prend en 1997 le nom de centre de Lille de l'ONERA.

L'Institut de mécanique des fluides de Toulouse

L'IMFT est créé en 1930 comme institut d'université. Il est lié à l'institut d'électrotechnique et de mécanique appliquée (IET), tourné vers l'hydraulique. Tous deux sont dirigés successivement par les professeurs Charles Camichel puis Léopold Escande. Une grande soufflerie à circuit ouvert type Eiffel, (veine d'essais de diamètre 2,4 m, vitesse de 40 m/s) est construite en 1936 sur le site de Banlève dans l'île du Ramier, sur la Garonne : elle fonctionne de 1938 à 1952, et sera notamment utilisée par le personnel des établissements parisiens (DTI, IAT St-Cyr), l'IMFL, ainsi que par le bureau d'études du « groupe technique de Cannes »⁶⁰ repliés en zone libre à partir de 1940.

Le Centre d'études aérodynamiques et thermiques de Poitiers (CEAT⁶¹)

Institut d'université, il est créé en 1963, sous l'impulsion d'Henri Poncin⁶² et de Raymond Goethals. Sont successivement directeurs, les professeurs Raymond Goethals (1966-77), Thierry Alziary de Roquefort (1977-89), et Michel Guilbaud

⁶⁰ Essais de maquettes SO 30 et SO 80, cf. Philippe Jung, « l'industrie aéronautique française repliée à Cannes durant la guerre », *revue Pégase*, n° 115, janvier 2005, p. 9-15.

⁶¹ Ne pas confondre avec l'établissement de la DGA à Toulouse.

⁶² ENS24, élève d'Henri Villat, Henri Poncin est aussi à l'origine de la création à Poitiers, à la Libération, suite à une convention entre la DTI et les universités de Paris et Poitiers, de l'Institut de mécanique et d'aérotechnique, qui devient en 1948 l'une des six premières écoles élues ENSI et prend le nom d'École nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique (ENSMA). « L'enseignement d'aérodynamique y est assuré au début par les professeurs Lucien Malavard, Edmond Brun, Paul Germain et Raymond Siesstrunck, les meilleurs de France » (R. Goethals). Par ailleurs le CEAT, au départ, bénéficie de l'appui de Lucien Malavard ainsi que, grâce à lui dans le cadre de l'AGARD, d'apports de professeurs américains (MM Ferri, Korkegi, Bogdonoff...).

(1989-2005) Parmi ses installations : une grande soufflerie supersonique S400 (veine 0,4 m x 0,4 m, Mach 1,5 à 4) pour les engins spéciaux de la Marine, qui n'a jamais été achevée, en raison de la construction de S3MA mise en service en 1959 à Modane ; la soufflerie hypersonique à rafales H630 (veine circulaire de diamètre 630 mm, Mach 8), construite par la SESSIA, qui la fait tourner, et est utilisée jusqu'à la fin des années 1970 pour divers essais, dont des essais de corps de rentrée ; un canal hydrodynamique rapide pour des études de profils supercavitants pour les navires à effet de sol à quilles latérales (NES/AQL). Une soufflerie H210 à échelle 1/3 de la précédente, à Mach 8, a servi aux premiers essais du projet d'avion spatial Hermès arrêté en 1993. Les laboratoires du CEAT ont traité, suivant les années 1960, 1970 et 1980, dans des structures évolutives et dans de petites souffleries à rafales Mach 1 à 4, un ensemble de recherches relevant de disciplines scientifiques variées : aérodynamique, énergétique, thermique, combustion, détonique, aéroacoustique. Cela va du démarrage des missiles sous l'eau à la manipulation de la turbulence en couche limite transsonique pour Airbus.

Tous ces organismes, nés avec le soutien des services de l'État (DTI/STAé, DRME/DRET, DGAC,...) qui les ont aidés au moyen de contrats ou de subventions, avaient dans leurs conseils, comités scientifiques ou de direction, des représentants de ces services et aussi de l'industrie aérospatiale et de l'ONERA.

Pour mémoire, ces instituts d'universités sont transformés à partir de la loi d'orientation de l'enseignement supérieur du 12 novembre 1968 en Unités, suivant les cas : UER unité d'enseignement et de recherche, UFR unité de formation et de recherche, URA unité de recherche associée au CNRS, UMR unité mixte de recherche (CNRS, école d'ingénieurs), LA (Laboratoire associé) au CNRS, PRES, pôle recherche et enseignement supérieur.

Le Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique de l'École centrale de Lyon (créé dès 1959, unité associée au CNRS en 1971), ainsi que le Laboratoire EM2C (énergétique moléculaire et macroscopique, combustion) de l'École centrale de Paris (unité propre du CNRS créée en 1975), sont évoqués à plusieurs reprises dans cet ouvrage. Ce sont des modèles de laboratoires d'écoles d'ingénieurs travaillant depuis leur début pour l'aéronautique, et dans le cadre de ces unités de recherche.

3 - LA COOPERATION INTERNATIONALE EN RECHERCHE

L'aéronautique a été un précurseur en matière de coopérations. Parmi celles relevant de la recherche, on cite les plus importantes, celles dans lesquelles la DGA, la DGAC, l'ONERA et également les centres de recherche publics et l'industrie sont impliqués. Dans la plupart des cas, l'ONERA y joue un rôle de premier plan.

Auparavant, il faut mentionner une initiative des ministres européens de la Défense prise dans le cadre du Groupe européen indépendant de programmes (GEIP), à la suite d'un rapport EDIS (*European Defence Industrial Study*), commandé à une commission de dix sages⁶³ présidée par M. Vredeling (ancien ministre de la Défense des Pays-Bas), et publié en novembre 1986, « Vers une Europe plus forte », où il propose de relancer la coopération au niveau de la recherche et

⁶³ Dont Monsieur l'ambassadeur de France Vernier Palliez.

technologie (R&T). Le GEIP, forum informel créé en 1976 par les ministres de la Défense et les DNA de treize pays OTAN, dont dix CEE, est ainsi à l'origine du programme⁶⁴ de R&T Défense EUCLID (*European Cooperation for the long Term in Defence*), qui est lancé à Lisbonne le 28 juin 1989 (MOU cadre en novembre 1990 ; une structure « *top-down* » avec onze CEPA⁶⁵ dont sept intéressent l'aéronautique). Une structure image EDIG (*European Defence Industries Group*) est mise en place par l'industrie. En décembre 1992, le GEIP est intégré à l'UEO et devient le GAEO, Groupe armement de l'Europe occidentale : au sein de ce groupe, il est créé, en novembre 1996, l'OAEO, *Organisation de l'armement de l'Europe occidentale*, qui jouit de la personnalité juridique et peut donc passer des contrats.

L'AGARD (*Advisory Group for Aeronautical Research and Development*) est créé en 1952, dans le cadre de l'OTAN, par le Dr Théodore Von Karman⁶⁶, alors président du Conseil scientifique consultatif de l'armée de l'Air des États-Unis, et devient en 1966 agence du Comité militaire de l'Atlantique nord. Ses bureaux sont en France, d'abord à Paris puis, à partir de 1968, 7 rue Ancelle à Neuilly sur Seine (aujourd'hui siège de la RTA, *Research and Technology Agency* qui a succédé à l'AGARD en 1997). Il s'agit d'un forum d'échanges entre experts civils et militaires du monde occidental auquel participent très positivement chercheurs et ingénieurs américains, ainsi que d'éminents professeurs français, parmi lesquels Joseph Pérès, Edmond Brun, Lucien Malavard, Maurice Roy et Paul Germain. L'AGARD fusionne en 1997, au sein de l'OTAN, avec le Groupe de recherches de Défense (DRG), pour former une nouvelle entité, la RTO, *Research and Technology Organization*. De 1952 à 1997, au Conseil des délégués nationaux, la France a été représentée par l'IG (Air) inspecteur technique pour l'aéronautique (successivement les IG Jean Gérardin, André Vialatte, Raymond Boscher, Jean Gay, Pierre-Henri Chevalier, Michel Lamy, Gérard Bonnevalle et François Gonin) qui disposait du droit de vote national, par un directeur de l'ONERA (le DG jusqu'en 1984, les IG André Auriol, Maurice El Gammal, Jean-Pierre Marec ensuite), et par une personnalité scientifique (c'est à ce titre que le Professeur Lucien Malavard y siégea de 1962 à 1981). L'activité des panels techniques de l'AGARD⁶⁷ (500 membres, dont 64 français dont un quart de l'ONERA, en 1990 ; 1300 contributeurs annuels) se traduit par l'organisation de symposium, conférences, groupes de travail, et donne lieu en 45 ans à plus de 3 000 publications (AG=AGARDograph, AR=Advisory Reports, CP=Conference Proceedings, LS=Lecture Series...) classifiées ou non. On cite ci-après le nom des panels et des Français qui les ont présidés (l'année est celle du début de la période de présidence de deux ans) : mécanique du vol (Pierre Lecomte 1969, Jean F. Renaudie 1978, Jean-Michel Duc 1990), médecine aérospatiale (Perdriel 1976, Santucci 1992), avionique (Daniel Coulmy 1965), mécanique des fluides (Maurice Roy 1954, Robert Legendre 1965, Christian Dujarric

⁶⁴ Préparé par la commission recherche du GEIP, alors présidée par l'IG Alain Crémieux, directeur adjoint de la DRET (auteur de « une coopération à géométrie variable : EUCLID », *L'Armement*, NS n°20, décembre 1989, p.90-100).

⁶⁵ CEPA, *Common European Priority Area*, domaines dans lesquels sont définis des RTP, *Research and Technology Projects*. Quelques DE aéronautiques seront lancés en coopération dans le cadre de cette procédure.

⁶⁶ Né à Budapest en 1881, naturalisé américain en 1936, éminent homme de science, le Dr Theodore Von Karman préside l'AGARD à sa création et jusqu'à son décès en 1963.

⁶⁷ Cf. « AGARD, the History 1952-1997 », Jan van der Blik Editor 1999 (ouvrage au siège de la RTA).

1993), propulsion et énergétique (Jean Surugue 1952, Jean Fabri 1961, Marc Pianko 1975, Philippe Ramette 1989), matériaux et structures (Gabriel Coupry 1980, Roger Labourdette 1992 ; groupe structures 1962-65 : Hughes de L'Estoile). Un comité des études à applications aérospatiales (AASC) est créé en 1971 (France, Allemagne, États-Unis, puis Royaume Uni et Italie), aidé par une division des études du Comité militaire (MCS Division), en vue d'études systèmes ; les présidents français de l'AASC ont été les IC Jean-Claude Wanner (1976-78), Roger Marguet (1978-79) et Daniel Vaffier (1990-91) ; dans le cadre de l'AASC, il a été mené (1976-79) une étude d'évaluation prospective « *Project 2000* » (dont l'IG Jean Carpentier dirigea la première phase) de l'impact des avancées technologiques sur les systèmes militaires futurs (rapports AR-161 à AR-163 sortis en 1980).

Le Docteur Th. Von Karman crée en 1958 à Rhode-St-Genèse, près de Bruxelles, un institut de mécanique des fluides relevant de l'AGARD, qui porte aujourd'hui son nom et a formé de nombreux jeunes chercheurs européens (l'IVK était financé par 60% de subventions⁶⁸ et 40% de contrats industriels). Ont reçu, côté français, la médaille Von Karman (attribuée à trente-quatre personnalités de 1972 à 1997) : Rolland A. Willaume (directeur des plans programmes de l'AGARD de 1952 1980), Lucien Malavard (1976), Jean Fabri (1977), Philippe Poisson-Quinton* (1981), Gabriel Coupry (1988) et Jean F. Renaudie (1991).

Parmi les grandes institutions internationales non étatiques, auxquelles ont participé les ingénieurs et scientifiques français, jusque parfois à des rôles de président, on peut citer l'*International Astronautical Federation* (IAF), l'*International Academy of Astronautics* (IAA), l'*International Council of the Aeronautical Sciences* (ICAS, fondé en 1952 par Von Karman avec Maurice Roy). Côté États-Unis, l'AIAA, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, analogue de notre association l'AAAF, comporte des membres français de notoriété.

L'ONERA et ses homologues européens⁶⁹ ont le rôle menant dans les processus de coopération suivants, auxquels sont associées les administrations des pays (DGA et DGAC côté français).

L'AFARP, *Anglo-French Aeronautical Research Programme*, a été créé en 1954 de façon informelle entre la DMA (DTCA, DRME), l'ONERA et le MOD (RAE, *Royal Aircraft Establishment*, intégré dans les années 1980 dans la DRA (*Defence Research Agency*). L'AFARP devient à la fin des années 1980 le WG1 du nouvel AFDRG, *Anglo-french defence research Group*, qui est mené par la DRET et le *Deputy Chief Advisor* britannique (MOD/PE). Parmi les sujets traités, les techniques d'essais en soufflerie et l'aérodynamique (AFARP 1) firent l'objet d'échanges fructueux entre les spécialistes de l'ONERA et ceux du RAE de Farnborough. A cette époque, l'ONERA et le RAE envisageaient, chacun de leur côté, la réalisation d'une

⁶⁸ Co-financé 35% par la Belgique, 65% par les autres pays membres de l'OTAN.

⁶⁹ Le *Royal Aerospace Establishment* (RAE) devenu la DRA (GB), le DFVLR devenu le *Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt* DLR (All), le *National Lucht-en Ruimtevaart Laboratorium* NLR (Pays-Bas), l'*Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial* INTA (Esp.), le *Centro Italiano di Ricerche Aerospaziali* CIRA (Italie), le *Flygtekniska FörsöksAnstalten* FFA (Suède). Ce sont ces 6 pays (Pays-Bas exceptés) avec la France qui ont signé le 27 juillet 2000 l'accord-cadre Lol (*Letter of Intent*) dont l'arrangement de mise en œuvre dans le domaine R&T a été mis en vigueur en 2004, instaurant un groupe des directeurs de recherche de la Défense.

soufflerie pressurisée, de façon à simuler le plus exactement possible les effets de viscosité (similitude de Reynolds) dans les phases basse vitesse. Les projets aboutirent, l'un à la soufflerie F 1 de l'ONERA au Centre du Fauga-Mauzac, l'autre à la soufflerie RAE 5 m à Farnborough. La comparaison de ces deux projets fut à l'avantage de l'ONERA qui avait voulu créer une soufflerie satisfaisant les besoins des industriels, tant du point de vue des performances que de la discrétion des essais et des résultats.

Le GARTEUR, *Group for Aeronautical Research and Technology in Europe*, est créé de façon informelle en 1973 par les établissements de recherche nationaux en France (ONERA), en Allemagne (DFVLR) et en Grande Bretagne (RAE), auxquels se joint en 1977 celui des Pays-Bas (NLR). En 1981, les administrations responsables de la recherche aéronautique des quatre États officialisent cette structure en signant un MoU. La Suède (FFA) rejoint le groupe en 1991, l'Espagne (INTA) en 1996, l'Italie (CIRA) en 2000. Au sein de ce groupe, une structure à trois niveaux : un Conseil (où siègent les représentants des gouvernements et les chefs des établissements de recherche nationaux), un comité exécutif (composé de représentants des établissements de recherche) et des groupes de responsables (aérodynamique, mécanique du vol, hélicoptères, structures et matériaux), composés d'un représentant, par pays, de l'établissement de recherche et de l'industrie. A la base, des groupes d'action exécutent les recherches en commun ; au début des années 2000, une centaine de groupes avaient été actifs, avec une moyenne d'environ huit organisations participantes par groupe.

L'AEREA, *Association des établissements de recherche européens en aéronautique*⁷⁰ a été créée en octobre 1994 ; elle réunissait sept établissements : le CIRA italien, le DLR allemand, la DRA britannique, le FFA suédois, l'INTA espagnol, le NLR néerlandais, et l'ONERA. Cette création, spontanément décidée par les présidents des sept centres de recherche, a été portée sur les fonts baptismaux par le commissaire européen à la recherche, le professeur Ruberti. Cette association se voulait en quelque sorte l'extension des accords bi- ou trilatéraux de recherche déjà existants entre certains de ses membres (dans le cadre du programme communautaire européen de recherche, mais pas seulement), et en particulier l'exploitation de la soufflerie aérodynamique ETW à Cologne. Malgré les espoirs mis en elle, l'AEREA a été limitée dans son essor, non du fait des réticences de ses membres, mais parce que les industriels de l'aéronautique n'acceptaient pas que les acquis nationaux en termes de recherche puissent se partager avec les établissements de recherche de pays moins avancés. Ceci a bloqué la plupart des actions envisagées, les cas de recherche *ex nihilo* qui seuls pouvaient contourner l'obstacle étant extrêmement rares. En fait, cette situation a confirmé que, seuls, des rapprochements capitalistiques entre industriels pouvaient lever tous les obstacles à une coopération complète en Europe, allant au-delà du cadre du développement de programme particulier.

A titre d'exemple, c'est parce qu'il y a eu en 1992 la création d'Eurocopter, société résultant de la fusion capitalistique d'industriels allemands et français, qu'il a été possible de monter une coopération approfondie sur la recherche dans le domaine hélicoptère entre le DLR et l'ONERA (accord de partenariat EC, ECD, ONERA, DLR,

⁷⁰ Paragraphe rédigé par Marcel Bénichou, signataire de cet accord de groupement, alors qu'il présidait l'ONERA.

signé en juin 2001, harmonisant les recherches entre l'industriel et les deux centres de recherche). Par contre, même la coopération franco-allemande sur Airbus, à l'époque dont on parle, était insuffisante (car limitée au programme lui-même) pour libérer les transferts au niveau de la recherche sur les avions civils. On peut espérer que la création relativement récente d'EADS, associant au plan capitalistique, les avionneurs allemands et français concernés peut avoir le même effet bénéfique sur les avions civils mais toujours limité au couple franco-allemand.

La revue AST, Aerospace Science and Technology

En 1948, l'ONERA crée la revue scientifique intitulée « La Recherche aéronautique ». Elle acquiert rapidement une renommée internationale, grâce à la qualité de ses articles qui sont alors rédigés, en majorité, par des chercheurs de l'ONERA. En 1994, cette revue est remplacée par « La Recherche aérospatiale » qui, tout en continuant à bénéficier de la caution scientifique de l'ONERA, se veut être l'expression de la communauté aéronautique et spatiale française, en ce qui concerne son activité de recherche. A la différence de l'ancienne revue qui comportait une édition française et une édition anglaise, la nouvelle revue ne comporte qu'une seule édition dont les articles sont rédigés soit en français, soit en anglais, avec des légendes et des résumés dans les deux langues. Les articles émanent d'auteurs français, relevant de l'ONERA, mais aussi des laboratoires universitaires et de l'industrie, ainsi que d'auteurs étrangers.

En 1997, l'ONERA et son homologue allemand, le DLR en association avec la DGLR (*Deutsche Gesellschaft für Luft und Raumfahrt*), joignent leurs efforts en remplaçant leurs propres revues d'information scientifique, « La Recherche aérospatiale » et « ZFW » (*Zeitschrift für Flugwissenschaften und Weltraumforschung*), par une revue commune intitulée « *Aerospace Science and Technology* » (AST), écrite en anglais. Celle-ci a un comité éditorial franco-allemand et deux co-rédacteurs en chef, l'un français, l'autre allemand. Le préambule du premier numéro de AST, paru en janvier 1997, signé par les deux co-rédacteurs en chef, Jean Carpentier et Fred Thomas, précise que les objectifs de AST sont de permettre aux chercheurs de mieux faire connaître leurs travaux et de créer des effets de synergie entre eux, ainsi que de faciliter la communication scientifique entre les établissements de recherche et les industriels.

Bientôt les relations de l'ONERA et du DLR avec les autres organismes de recherche européenne conduisent à leur proposer de participer officiellement à l'édition de cette revue. C'est ainsi que, depuis 1999, AST est une revue commune, non seulement à l'ONERA et au DLR, mais aussi au CIRA italien, à la FFA suédoise, à l'INTA espagnol et au NLR néerlandais. Ainsi la quasi-totalité des organismes de recherche membres de l'AEREA sont associés dans l'édition de l'AST. Pour un souci d'efficacité, la rédaction reste coordonnée par les deux co-rédacteurs en chef français et allemand, mais le comité éditorial est élargi aux autres membres de l'AEREA participants. D'autre part, le conseil scientifique international comprend les présidents de ces organismes, ainsi que le président du CNES, le directeur général de l'ESA, le directeur de l'IVK (Institut von Karman) et quelques autres personnalités éminentes de la recherche aérospatiale.

Depuis sa création, AST a acquis une renommée mondiale qui rejaillit sur l'ensemble de la communauté aérospatiale européenne. C'est une excellente manifestation de la coopération entre les organismes de recherche aéronautique et spatiale d'Europe Occidentale.

ETW (*European Transonic Windtunnel*), la soufflerie transsonique européenne

Parmi les coopérations déjà citées, celle ayant abouti à la construction de la soufflerie transsonique européenne paraît exemplaire en matière de mise en commun de moyens d'essai. Il s'agit en effet de la première grande installation de recherches et d'essais en aéronautique (et au sein de la Défense), étudiée, réalisée et aujourd'hui exploitée en commun par quatre grands pays européens (Allemagne, Royaume Uni, Pays-Bas, France).

Le besoin d'une soufflerie permettant de représenter les écoulements aérodynamiques autour des avions en tenant compte des phénomènes de viscosité en régime transsonique s'est manifesté dès les années 1960 par l'ensemble de la communauté aéronautique. C'est ainsi qu'un groupe de travail (« LAWS », *Large Wind Tunnel Working Group*, groupe AGARD suivi en 1974 du *DRG-project group*, P.G.7 de l'AC/243, groupes⁷¹ dont étaient membres Maurice Bazin de l'ONERA et Jean Brocard de la SESSIA) est créé en 1968 au sein de l'AGARD (qui en l'occurrence assumait pleinement son rôle d'animateur de la communauté aéronautique des pays de l'OTAN) en vue d'étudier différents types de projets respectant le nombre de Reynolds et conclut en faveur d'un concept cryogénique et pressurisé. En 1978, à la suite d'un protocole d'accord (MOU) signé entre les quatre pays désignés ci-dessus, un groupe technique international basé au NLR à Amsterdam étudie les spécifications d'un tel projet à partir d'une soufflerie pilote ainsi que le choix d'implantation⁷² et le partage du financement. En 1985, après des négociations au plus haut niveau, une décision aboutit au choix du site de Cologne (DLR à Porz-Wahn) et à un partage en conséquence du financement. L'étude de définition du projet est alors lancée et une organisation mise en place, avec un comité directeur composé de représentants des gouvernements (IG Alain Queinec de la DRET pour la France), un groupe de projet international (IC Xavier Bouis de l'ONERA pour la France) et un consortium architecte industriel (Cinq sociétés engineering, dont côté français la SGN et la SESSIA). Signé en avril 1988, un accord intergouvernemental engage les quatre pays à financer et à construire la soufflerie, accord suffisamment contraignant pour dissuader chaque partenaire de se retirer unilatéralement pendant la construction. Il est alors créé une société de droit allemand, ETW GmbH⁷³ ayant la personnalité juridique capable de mener l'opération pour le compte des gouvernements : sont représentés, du côté français, à son conseil de surveillance, l'actionnaire ONERA (« *vote holder* ») ainsi qu'un représentant de la DPAC et un de la DGA nommés après concertation au titre d'une convention ONERA-DPAC-DGA.

La mise en service opérationnel se fait en 1995, le coût, deux milliards de francs environ, dont 38% pour la RFA, 28% pour la France⁷⁴ et la Grande-Bretagne, 6% pour les Pays-Bas) et les délais ayant été respectés. (Pour mémoire : la soufflerie

⁷¹ Groupes (RFA, GB, PB, FR) présidés par le Hollandais John P. Hartzuiker ainsi que le groupe du MOU créé en 1978.

⁷² Comme ce fut le cas pour le choix du site, où le projet de l'implantation à Grenoble du Laboratoire européen de rayonnement synchrotron fut en compétition avec le projet ETW au Fauga près de Toulouse.

⁷³ Regroupant les organismes exploitant les souffleries dans les pays participants : DLR, ONERA, RAE, NLR, actionnaires respectivement à 31%, 31%, 31%, et 7% (partage utilisé à l'exception de la construction). L'IC Xavier Bouis en sera directeur-adjoint (1988-1992) puis directeur général (1992-1993).

⁷⁴ Financement français assuré par la DGA et la DGAC ; le partage du financement 38%, 28%, 28%, 6% tient compte d'une prime de site de 10% pour la RFA.

américaine NTF, *National transonic facility*, de Langley, qui est comparable à ETW, est lancée en 1975 et opérationnelle en 1990).

ETW fonctionne en continu, en circuit fermé avec de l'azote à des pressions (1,25 à 4,5 bars) et des températures (90°K à 313°K), permettant d'obtenir, dans une veine d'essai de 2,4 m x 2 m, les conditions de compressibilité (Mach de 0,15 à 1,3) et de viscosité (nombre de Reynolds $R = \rho V L / \mu$ jusqu'à 50×10^6) représentant celles du domaine de vol des Airbus (figures 7 et 8).

Pour mémoire : Les travaux d'études d'ETW ont donné lieu aux publications suivantes du Fluid Dynamics Panel de l'AGARD, sous le titre : *Special course on advances in cryogenic wind tunnel technology* :

AGARD Report 722, 22-26 avril 1985, Rhode S^t-Genèse (Belgique) ;

AGARD Report 774, 5-9 juin 1989, Rhode S^t-Genèse (Belgique) ;

AGARD Report 812, 20-24 mai 1996, Cologne (Allemagne).

EUROMART et le programme communautaire européen de recherche aéronautique

La recherche communautaire aéronautique a été lancée en 1988 dans le cadre du PCRDT (Programme cadre de recherche et développement technologique) de la CEE, à la suite de l'étude EUROMART demandée aux neuf principaux avionneurs européens et à laquelle étaient associés les services français (DGA, DGAC, MRT).

La Commission des communautés européennes (CCE), en la personne du Commissaire européen à la recherche, Karl Narjes, prend en 1986 l'initiative de demander aux neuf principaux avionneurs européens (dont Aérospatiale et AMD-BA pour la France) une étude appelée EUROMART, *European Cooperative Measures for Aeronautical Research and Technology*, destinée à évaluer l'aide que la CCE pourrait apporter à l'Europe pour résister dans le futur à la concurrence américaine. Cette étude aboutit au rapport EUROMART de novembre 1988, qui permet au « Conseil recherche » de la CEE du 15 décembre 1988 de réserver au titre du programme BRITE-EURAM du 2ème PCRDT⁷⁵ 1987-91, 35 millions d'écus à des recherches aéronautiques spécifiques. Avec l'appui renouvelé fin 1990 du ministre français de la Recherche Hubert Curien, sont réservés 53 millions d'écus au titre du 3ème PCRDT 1990-94 au titre du programme TIM, Technologies industrielles et des matériaux. Pour le 4ème PCRDT 1994-98, industrie et organismes de recherche européens préparent un plan technologique à long terme, considéré comme trop sectoriel par la CCE. Mr H.J. Allgeier de la DG XII est le premier à gérer et administrer, avec l'aide de l'ICA Jean-Michel Duc, ce programme à la CCE, qui implique une organisation assez lourde avec de nombreux participants de l'industrie, de l'université et des grands organismes de recherche évoluant dans des comités, tel l'ARTCO, *Aeronautical Research and Technology Committee*. La Commission européenne (ex-CCE) procède par appel d'offres et passation de contrats, financés à 50%.

Se sont particulièrement impliqués au lancement de ce programme du côté industriel l'IG (FA) Jacques Balazard (Aérospatiale), du côté ONERA Philippe Poisson-Quinton, du côté des services officiels Michel de Vries (MRT) et l'IC Gérard Delalande (DGAC). Ce programme est suivi du côté français par le ministère chargé de la Recherche, en liaison avec ceux chargés des Transports et de la Défense.

⁷⁵ PCRDT, Programme cadre de recherche et développement : le 1^{er} PCRDT 1984-87 a vu le lancement du programme en informatique ESPRIT, pour lequel l'industrie française a apprécié le retour.



Fig. 7

ETW, soufflerie transsonique européenne, sur le site du DLR (Cologne, Allemagne)

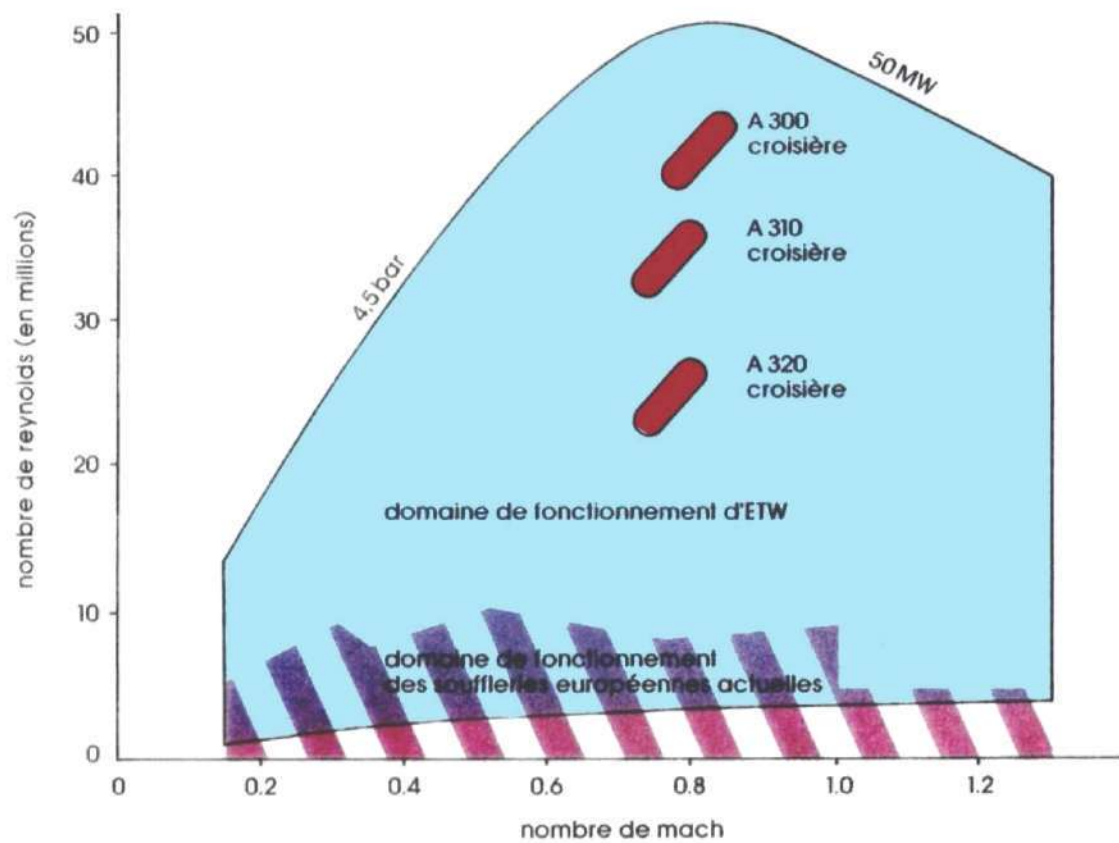


Fig. 8

PARTIE II

LES ÉTUDES ET RECHERCHES PAR DOMAINE

CHAPITRE 1

AVIONS⁷⁶

1 - AERODYNAMIQUE

Les recherches générales portent notamment sur le calcul des ailes, sur les voilures à forte flèche pour le vol supersonique et sur l'interaction entre ondes de choc et couches limites sur les ailes en régime transsonique.

Jusqu'en 1965, l'approche est essentiellement expérimentale, par essais en soufflerie. Les calculs sont limités, aussi bien par les méthodes (formulations théoriques simples) que par les moyens (calculateurs peu puissants). Cependant, d'autres formes de simulation sont utilisées. Dès 1946, les méthodes d'analogies électriques Pères-Malavard sont développées et appliquées au calcul des ailes d'avion : l'équipe de Lucien Malavard détermine, en 1955, à la cuve rhéoelectrique les caractéristiques de l'aile delta : la cambrure conique du bord d'attaque proposée, appliquée aux avions Mirage III et Étendard IV, en améliore la finesse aérodynamique et les qualités de vol ; de même, en 1956, l'étude de l'adaptation des profils au vol supersonique conduit à une combinaison de la cambrure et du vrillage de la corde du profil selon l'envergure, résultats fournis aux avionneurs. En configuration d'atterrissage et de décollage à grande incidence, il est démontré par calcul et confirmé au tunnel hydrodynamique le supplément de portance apporté par la formation de « tourbillons en cornet » sur l'extrados des ailes delta. Sur demande du STAé en 1959, l'ONERA contribue au projet Concorde par des études plus approfondies sur la forme d'aile (élancée « gothique flamboyant »), les entrées d'air, les arrière-corps de réacteurs, le vol à basse vitesse... (notamment avec R. Legendre, Paul Bévière, Ph. Poisson-Quinton, P. Carrière, J. Leynaert) et apporte un soutien important aux constructeurs (l'assistance de l'ONERA au programme Concorde⁷⁷, qui s'étend de 1959 à 1975, représente, en 1968, 9% de son activité totale). A noter aussi l'optimisation par l'Aérospatiale de la cambrure complexe de la voilure du Concorde en croisière supersonique à l'aide d'une simulation sur réseau de calculateurs analogiques.

A partir de 1965, l'accroissement rapide des possibilités des ordinateurs permet des progrès considérables dans les calculs aérodynamiques. Chez Dassault Aviation, dans l'équipe de Pierre Bohn, Pierre Perrier développe d'abord des calculs bidimensionnels de profils en subsonique et en transsonique, puis des calculs sur des ensembles voilure et fuselage en subsonique (méthode des singularités). Depuis la fin des années 1970, Dassault Aviation et l'ONERA travaillent beaucoup sur les calculs aérodynamiques par éléments finis tridimensionnels, d'abord en fluides parfaits, puis en fluides réels (calculs dits « Navier-Stokes »), toujours aux limites de la capacité des ordinateurs du moment. Un effort analogue est conduit à l'Aérospatiale avec Jean Bousquet (Sud-Aviation) et Michel Lazareff (Nord-Aviation)

⁷⁶ Par Daniel Chaumette avec la contribution de Pierre Lecomte.

⁷⁷ Philippe Poisson-Quinton, « Le rôle de l'ONERA dans le programme Concorde », *L'Aéronautique et L'Astronautique*, n° 157, 1992-6 ; Max Salmon, « Concorde et la recherche aéronautique », *L'Aéronautique et L'Astronautique*, n° 11, 1969-4.

1.1 - Aérodynamique des avions de transport

L'évolution entre les voilures des différentes générations d'avions de transport français illustre très bien les progrès dans les études aérodynamiques :

- sur la Caravelle, profil type NACA ;
- sur le Falcon 20, l'augmentation du Mach de croisière est obtenue grâce à une voilure à flèche augmentée et à profil plus mince, avec un profil NACA et une adaptation du squelette de la voilure ;
- sur le Mercure, l'utilisation de nouvelles méthodes de calcul permet d'obtenir un Mach critique plus élevé que le Falcon 20 avec une voilure à moindre flèche et à profil plus épais et donc une structure plus légère. Le Mercure a bénéficié des premiers calculs sur l'ensemble voilure fuselage (figure 9) ;
- le Falcon 50 est le premier avion utilisant les profils à cambrure arrière destinés à retarder l'apparition des ondes de choc (appelés profils supercritiques par la NASA), permettant d'augmenter encore l'épaisseur du profil à Mach critique égal. Le Falcon 50 est le premier avion français modélisé complètement en maillage éléments finis 3D de l'espace autour de l'avion.
- les méthodes de calcul de profils supercritiques font l'objet d'une validation sur avion T33 modifié par « manchonnage » des ailes (DE 76505 lancé en 1976 avec Michel Lazareff, ex Nord-Aviation ; les essais en vol ont lieu au CEV Aérospatiale à Toulouse) (figure 10).
- depuis le A320, tous les avions de transport sont des raffinements de ces bases, avec l'utilisation sur les Airbus de Winglets de différents types pour diminuer la traînée induite.
- le Falcon 7X et le A380 ont, tous deux, fait l'objet d'une modélisation par éléments finis 3D *Navier Stokes* avec plusieurs millions de nœuds sur avion complet en transsonique (figure 11). La traînée est évaluée par un code de perte d'entropie dans le sillage, développé par l'ONERA.
- Pour mémoire : on a déjà mentionné les travaux faits en coopération avec l'ONERA pour la définition d'une aile, dite gothique flamboyante bien adaptée au vol à Mach 2, en transsonique et croisière subsonique, et enfin à basse vitesse.

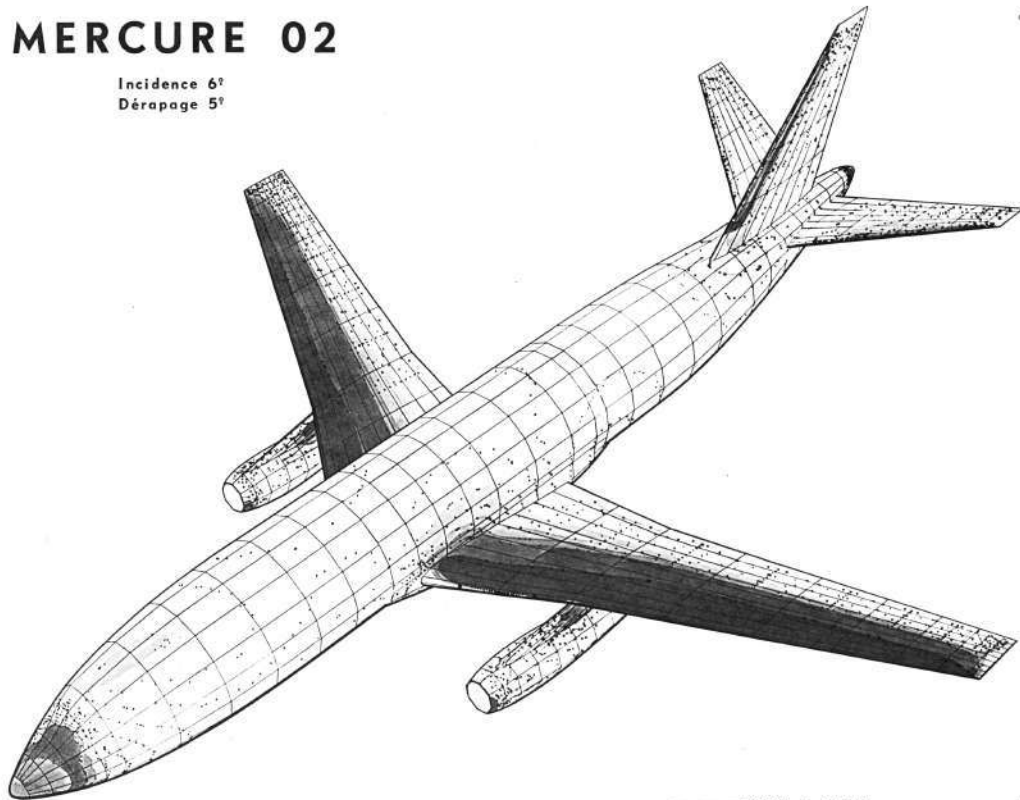
La réduction de traînée des cellules reste un thème majeur des études, en particulier des études européennes sur la laminarité des profils (par laminarité naturelle ou par aspiration), et sur le traitement de la couche limite turbulente (par exemple, « *riblets* » ou parois rainurées dans le sens de l'écoulement). Elle fait l'objet de recherches par simulation numérique et en soufflerie, en liaison avec les constructeurs (Falcon, Airbus). Une expérimentation en vol de riblets a été conduite sur un A320.

1.2 - Aérodynamique des avions de combat

En combat tournoyant, la manoeuvrabilité est augmentée par la possibilité de vol contrôlé à grandes incidences, ce qui donne lieu à des études spécifiques d'aérodynamique sur l'écoulement autour d'ailes élancées et sur les distorsions à l'entrée d'air moteur.

MERCURE 02

Incidence 6°
Dérapage 5°



Calcul Avions Marcel Dassault

Fig. 9

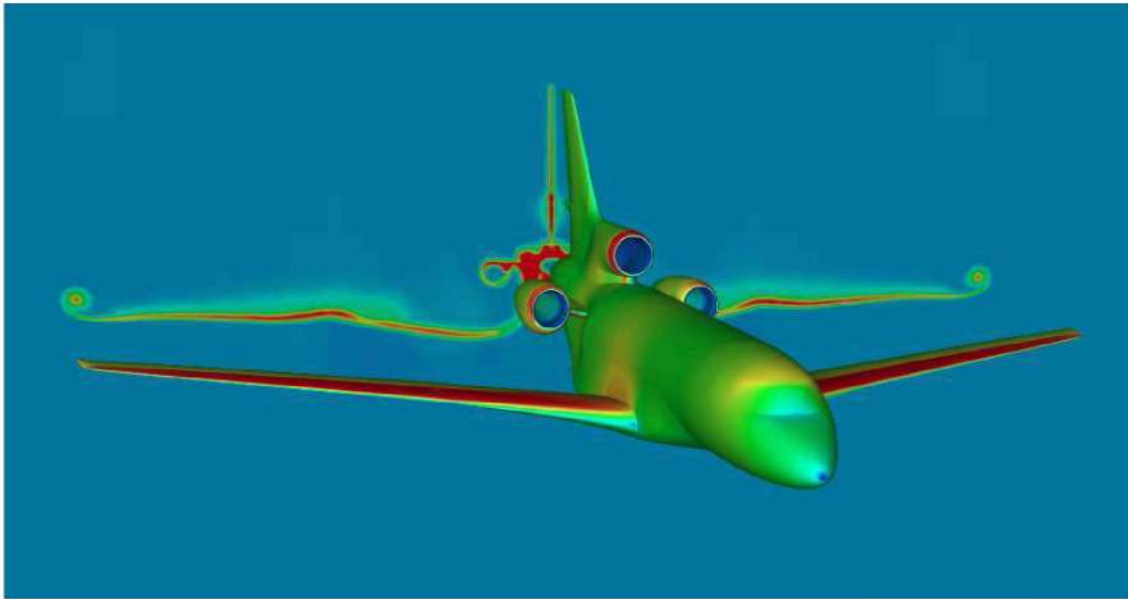
Calcul aérodynamique par éléments finis du Mercure. Il s'agit d'une des toutes premières applications de ces méthodes à un cas réel



Aérospatiale

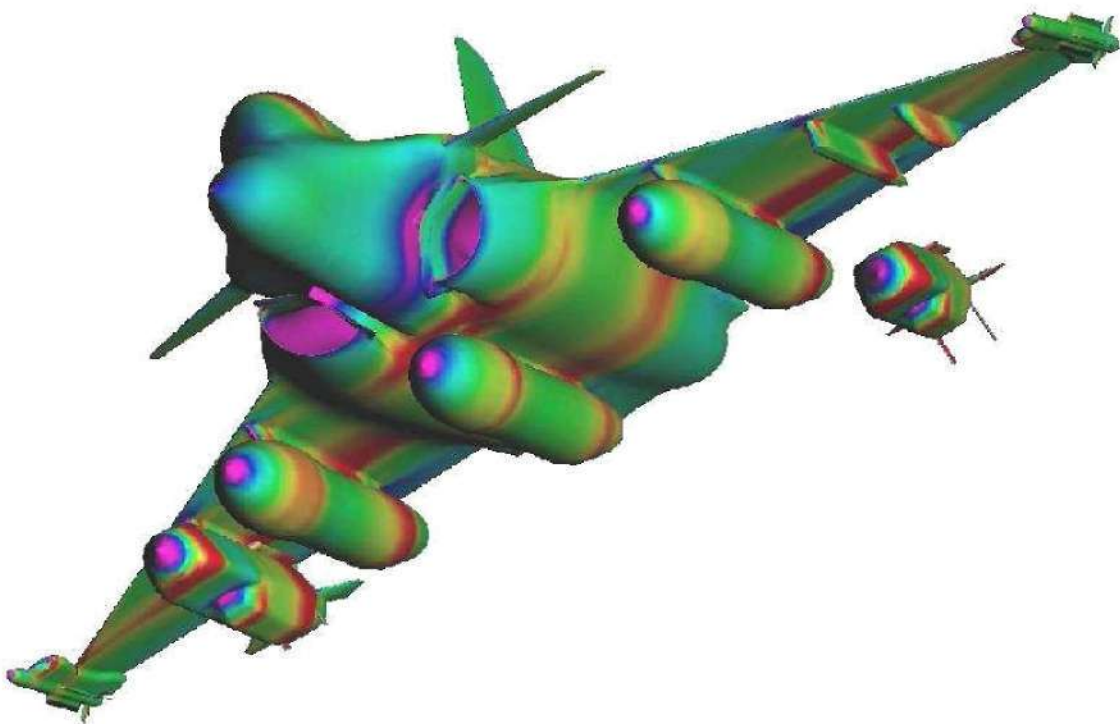
Fig. 10

Avion Pégase, T33 à profil supercritique



Calcul Dassault Aviation

Fig. 11
Calcul Navier Stokes du Falcon 7X et de son sillage



Calcul Dassault Aviation

Fig. 12
Calcul aérodynamique du Rafale lors du largage d'un engin SCALP

Les études de mécanique du vol aux grands angles et, en particulier, les études de vrille font appel à la soufflerie verticale de l'IMFL dans laquelle des maquettes d'avion instrumentées et télécommandées peuvent effectuer des vols libres ; cette soufflerie est équipée d'une balance rotative « tournebroche » pour mesurer les efforts sur des maquettes en rotation dans des attitudes extrêmes de vol ; avec une veine de 4 m de diamètre, elle est la seule de ce type à être opérationnelle en Europe (Voir Tome II, Chapitre 1, paragraphe 1.6).

L'aérodynamique externe du Rafale doit beaucoup aux recherches sur les écoulements tourbillonnaires et les effets des gouvernes « canard ». L'écoulement autour d'une configuration typique d'avion delta-canard a été analysé grâce à l'opération RAPACE (Recherches aérodynamiques pour avion de combat évolué). De même l'aérodynamique interne des prises d'air et, en particulier les décollements à grande incidence, ont été étudiés lors d'une grande opération de recherche appliquée appelée Périgord.(1978-87). Les méthodes d'optimisation automatiques de formes développées chez Dassault Aviation ont permis un bon fonctionnement des entrées d'air du Rafale jusqu'à Mach 1,8 sans dispositif mobile de recompression.

Depuis le Rafale, l'aérodynamique d'un avion de combat est un compromis avec les exigences de la réduction de la signature radar. Dassault Aviation a développé depuis 1987 des méthodes numériques par éléments finis avec des logiciels plus ou moins similaires à ceux de l'aérodynamique. Elles ont permis de doter le Rafale de caractéristiques de discrétion uniques dans sa génération (en figure 12, un calcul aérodynamique du Rafale lors du largage d'un engin SCALP).

2 - MECANIQUE DU VOL, COMMANDES DE VOL ELECTRIQUES ET CONTROLE AUTOMATIQUE GENERALISE

L'apparition des commandes de vol électriques et les progrès réalisés par les ordinateurs embarqués ont conduit, à la fin des années 1970, à l'émergence du concept de CAG, contrôle automatique généralisé⁷⁸. Dans ce concept, il s'agit non seulement d'apporter une aide au pilotage, mais aussi de réaliser le contrôle actif de l'avion, à l'insu du pilote, au moyen de gouvernes rapides ; seraient ainsi remplies automatiquement un certain nombre de fonctions, comme le vol à marge statique de stabilité réduite ou négative, les limitations automatiques de domaines (exemple protection contre le décrochage). Le concept CAG complet intégrerait aussi la réduction des charges à la « manœuvre » ou à la « rafale », l'antiturbulence, l'antiflottement, l'antitremblement (transsonique).

La première application des commandes de vol électriques sur avions militaires en Europe est le Mirage 2000, avec les fonctions de vol à marge de stabilité statique réduite, et de protection de domaine de vol (la possibilité de voler à marge statique réduite relance la formule delta qui était très pénalisée aux grands angles).

La première application civile a été le Concorde qui, dès 1969, volait avec des commandes de vol électriques analogiques à pleine autorité, avec toutefois un dernier secours mécanique. Des expérimentations ont été conduites par l'Aérospatiale sur un Concorde modifié, puis sur un A300, de commandes de vol

⁷⁸ Il faut rappeler le DE 78504, lancé en 1979 par le STAé, ayant pour objet la mise au point du contrôle actif d'un aéronef : le Mirage III B 225 du CEV Istres a ainsi permis de dégager les grands principes du CAG que l'on retrouvera sur le Mirage 2000 puis sur le Rafale.

électriques numériques avec commande par minimanches. Ces études ont trouvé une application partielle sur l'A310, puis complète sur l'A320 et les avions suivants.

En plus de la marge statique réduite et des protections de domaines, un gros avantage commercial est la possibilité de donner à différents modèles de la famille un comportement semblable, permettant des qualifications communes des pilotes.

A ce jour, les commandes de vol électrique se généralisent : le Falcon 7X est le tout premier avion d'affaires à commandes de vol électriques. L'ONERA participe aux études sur le CAG, qui sont coordonnées par son département des études de synthèse, notamment pour l'utilisation de gouvernes rapides en apportant ses connaissances sur l'aérodynamique instationnaire des gouvernes aux grandes vitesses.

3 - STRUCTURES : CONCEPTION GENERALE

Du point de vue des recherches et développements, la période de 1945 à nos jours peut se diviser en deux phases : de 1945 à 1970 et de 1970 à nos jours.

3.1 - Première phase : de 1945 à 1970

Cette première période voit surtout de grands développements sur les technologies des structures, ainsi que sur les moyens d'essais des structures, mais par contre, peu de nouveautés dans les méthodes de calculs de résistance statique des structures

On assiste à une augmentation considérable du poids, de la taille et des performances des avions (un exemple : les moyens courriers bimoteurs dont la charge alaire maximale s'est accrue : elle est passée en cinquante ans de 220 kg/m² sur le SO 30 P à 730 kg/m² sur le A321-200, 350 kg/m² sur la Caravelle 10R et 490 kg/m² sur le Mercure 100). Ceci n'a été possible que par la mise à disposition d'alliages d'aluminium en tôles fortes et en pièces forgées de grandes dimensions⁷⁹. A noter aussi le développement de l'usinage mécanique dans la masse, de l'usinage chimique, l'introduction d'alliages d'acier à très haute résistance, puis du titane TA6V pour des ferrures et la visserie (première application française du titane en visserie sur le Mirage IV). Cette période voit aussi la généralisation progressive des réservoirs structuraux pour le carburant, d'abord dans les caissons de voilure (premier cas : le SO 30 P en 1946), puis en fuselage (premier cas : le Mirage F1).

Parallèlement les moyens d'essais statiques des structures ont vu l'abandon rapide des méthodes de chargement manuel « au sac de sable ou de grenaille » au profit des chargements par vérins électriques ou hydrauliques, d'abord au centre d'essais d'Issy-les-Moulineaux du STAé, puis au CEAT.

Les moyens de mesure des contraintes par jauges extensométriques ont été considérablement perfectionnés, permettant même des mesures en vol.

Pendant ce temps les méthodes de calcul ont peu évolué. Les approches mathématiques exactes (sur lesquelles l'ONERA a travaillé quelque temps à partir de 1960) n'ont jamais débouché en dehors de chargements simples sur des cas canoniques. Les voilures et les fuselages sont toujours modélisés en « poutres longues », avec des correctifs empiriques, par exemple pour estimer la surcharge à

⁷⁹ Voir paragraphe 1.2.2, chapitre 4 matériaux.

l'arrière de l'emplanture d'une voilure en flèche. Pour résoudre les cas complexes on a souvent recours à des essais partiels, parfois à échelle réduite.

3.2 - Deuxième phase : à partir de 1970

Les deux développements majeurs de cette période sont le calcul par éléments finis et les structures composites carbone.

Calcul par éléments finis : tout comme pour l'aérodynamique, les méthodes de calcul par éléments finis sur ordinateur révolutionnent la conception des structures. Les premiers codes de calcul par éléments finis ont été développés aux États-Unis vers la fin des années 1960.

C'est à partir de 1970 que, chez Dassault Aviation et à la demande de Marcel Peyrony, Christian Petiau développe un code sur des idées originales. Ce code se révèle vite très performant et permet de traiter efficacement des modèles à grand nombre de degrés de liberté. Dès 1977, Christian Petiau le dote de capacités d'optimisation automatique des structures (appliqué pour la première fois sur la dérive en composite carbone du Mirage 2000), voir application aux figures 13 et 14.

Cette capacité est à l'époque sans équivalent dans le monde, ce qui conduit Boeing à demander une version commerciale de ce code, du nom d'ELFINI, jointe à son achat global de CATIA dont il sera parlé plus loin.

L'Aérospatiale (Jean-Marc Thomas) développe des méthodes analogues pour traiter des structures d'avions de grandes dimensions avec un maillage de plus en plus précis et un nombre de points de contrôle fortement croissants. Simultanément, des méthodes de calcul sont développées pour optimiser au mieux les structures sur des éléments de plus en plus grands.

Depuis cette période, les différents codes de calcul des structures par éléments finis ont continué à se développer, avec la participation de l'ONERA, intégrant la plasticité, les calculs non linéaires, et les couplages aéroélastiques. On peut estimer qu'ils ont permis un allègement des structures de l'ordre de 15%. Par ailleurs, l'introduction des composites carbone qui demandent une connaissance précise des contraintes, n'aurait pas été possible sans les calculs par éléments finis.

Du point de vue des technologies de structure, le principal développement de la période est l'introduction progressive des structures en composites carbone (on a aussi initialement employé la fibre de bore, mais elle restait trop coûteuse et a été abandonnée).

Malgré les espoirs, cette introduction a été plutôt lente et ce pour plusieurs raisons :

- la révolution nécessaire des moyens industriels et de maintenance (comparable au passage du bois au métal dans les années 1930) ;
- l'espacement entre les programmes nouveaux, surtout dans le militaire ;
- les craintes des utilisateurs (armées de l'air et transporteurs civils) quant à la durabilité et à la maintenabilité de ces nouvelles structures.

Le détail du développement est donné dans le chapitre 4 Matériaux, paragraphe matériaux composites. On se bornera à rappeler ici quelques pourcentages de masse de composites sur des appareils construits en série : 0,25% sur le Mirage F1 à partir de 1976, 7% sur le Mirage 2000, 20% sur le A320, 25% sur le Rafale (voir la figure 47)

L'Aérospatiale réalise dès 1988 les ailes externes de l'Avion de Transport Régional ATR72 en carbone (figures 15 et 16), dont le concept découle de

l'opération V10F (cf. paragraphe 1.2.1 matériaux composites du chapitre 4 matériaux) et du DTP CSPC n°1 caisson de structures primaires en composites, puis plus tard un très gros élément structural essentiel (de longueur 16 m) pour les A340-500 et 600 (cf. figures 48 et 49). Les avions en développement comme l'A400 M et le A350 ont encore plus de composites

Une autre nouveauté de la période est l'explosion de la CFAO (Conception et fabrication assistées par ordinateur) dont le plus grand succès est celui du logiciel CATIA, qui est devenu un standard de fait dans l'aéronautique. Ce logiciel est initialement développé par Francis Bernard chez Dassault Aviation à partir de 1975 pour fabriquer plus rapidement et avec plus de précision les maquettes de soufflerie. Il est ensuite utilisé pour le dessin des pièces de structures. Pour amortir les coûts de développement de ces logiciels, il est décidé de les commercialiser et pour ce faire est créé en 1981 Dassault Systèmes. Le succès est venu très vite avec le choix par Boeing de CATIA pour la conception du B 777.

Ces logiciels de CFAO apportent de nombreuses possibilités :

- « maquette numérique » qui remplace les maquettes physiques d'aménagement (première application sur le Falcon 2000 en 1979), cf. figures 17 et 18.
- possibilité de travail coopératif interactif à distance entre partenaires divers sur des ensembles de structure aménagée, précieuse pour les grands programmes actuels,
- usinages dans la masse rapides et de haute qualité (usinage TGV), perçages de haute précision permettant des montages dits « Meccano » sans ajustages,
- machines automatiques de dépose des composites, procédés de prototypage rapide, etc.

4 - STRUCTURES : FATIGUE, FAIL SAFE ET TOLERANCE AUX DOMMAGES

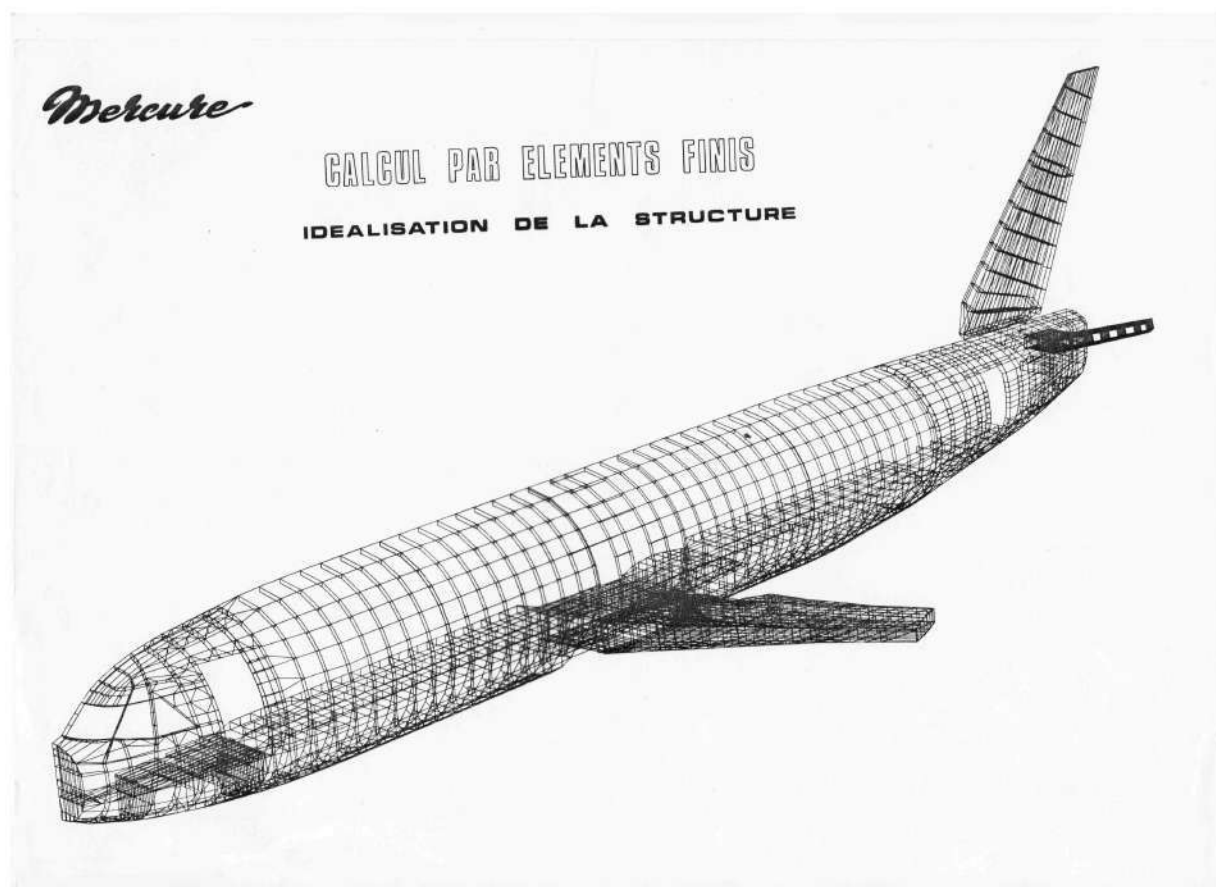
En 1945 la fatigue n'est pas considérée par les concepteurs des structures aéronautiques, car jusqu'alors les avions font peu d'heures de vol avant d'être retirés du service.

Cette situation change après quelques cas de rupture en vol du longeron de voilure d'avions de ligne à l'étranger, et surtout après les deux accidents des De Havilland Comet en 1954, par rupture en vol du fuselage pressurisé. Ces avions sont récents, et représentent alors le summum de la technologie ; aussi l'événement provoque une remise en cause des méthodes et règlements de conception.

Au STAé, l'IC William Barrois, le père de la fatigue aéronautique en France⁸⁰, est à l'origine de l'essai général en fatigue de la Caravelle. L'essai a lieu au CEAT sur un ensemble voilure et fuselage, ce dernier étant immergé dans une piscine pour faciliter les cycles de pressurisation (figure 19).

Par la suite, le Transall et l'Atlantic subissent au CEAT des essais similaires. Ces premiers essais correspondent au concept de vie sûre « *Safe life* », dans lequel la durée de vie autorisée en service est égale à la durée constatée lors de l'essai, divisée par un coefficient de sécurité.

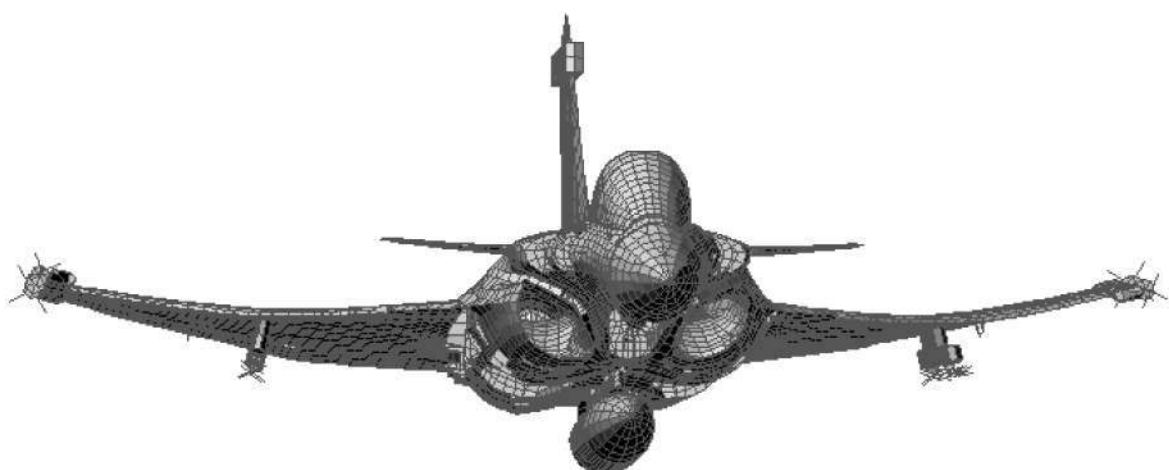
⁸⁰ Auteur d'un AGARDograph resté célèbre sur le sujet, alors qu'il présidait en 1968-1971 le groupe structures de l'AGARD.



Calcul Avions Marcel Dassault

Fig. 13

Modèle d'éléments finis de la structure du Mercure, un des premiers de ce genre en France



Calcul Dassault Aviation

Fig. 14

Modèle d'éléments finis de la structure du Rafale :
déformée sous un facteur de charge de 9 g



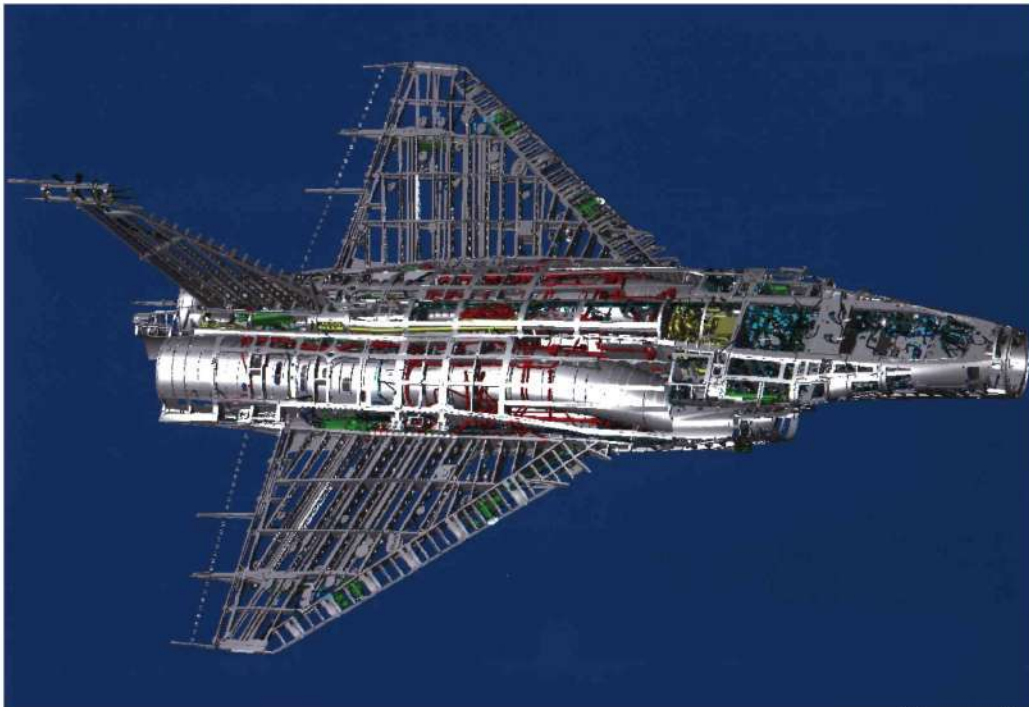
Aérospatiale

Fig. 15
L'avion ATR 72
1^{er} vol effectué en 1988



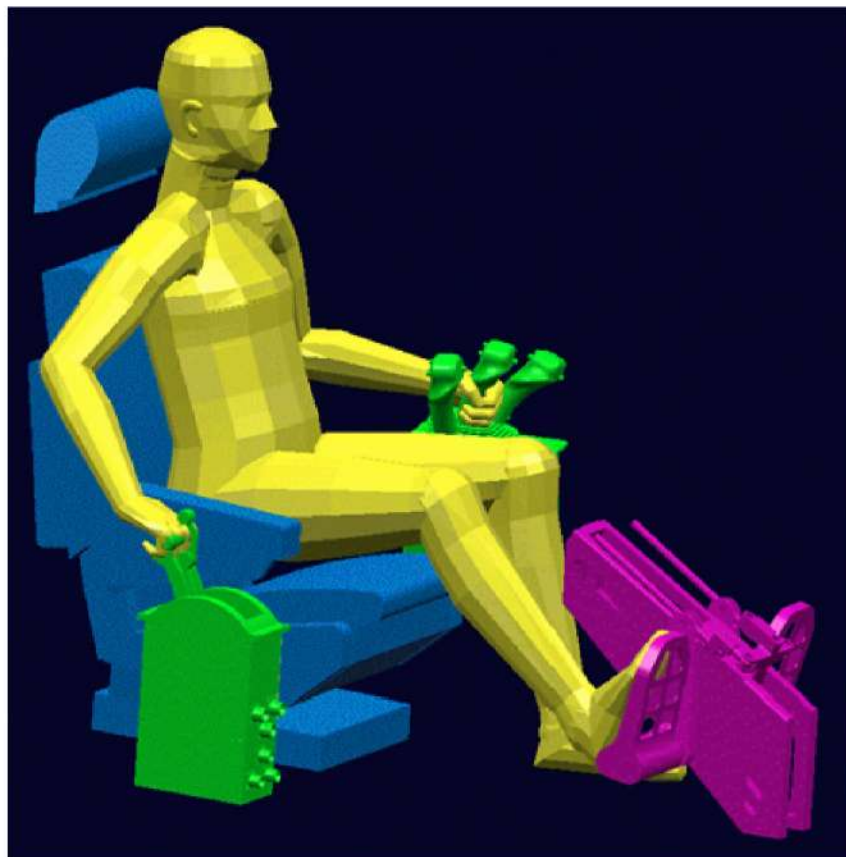
Aérospatiale

Fig. 16
Le caisson de voilure extrême de l'avion ATR 72 en matériaux composites carbone



Dassault Aviation

Fig. 17
Maquette numérique du Rafale



Dassault Aviation

Fig. 18
Utilisation de la maquette numérique pour l'étude de l'ergonomie du poste pilote

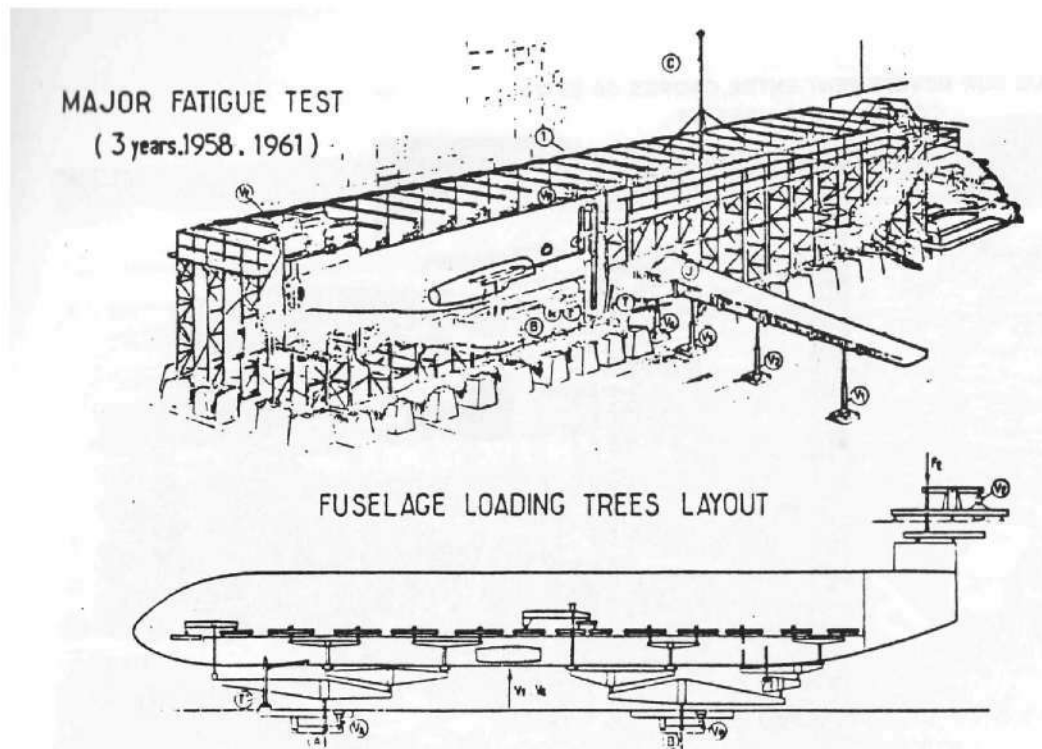


Fig. 19

Essai général de fatigue de la Caravelle au CEAT. Pour faciliter les cycles de pressurisation, le fuselage est immergé dans une piscine

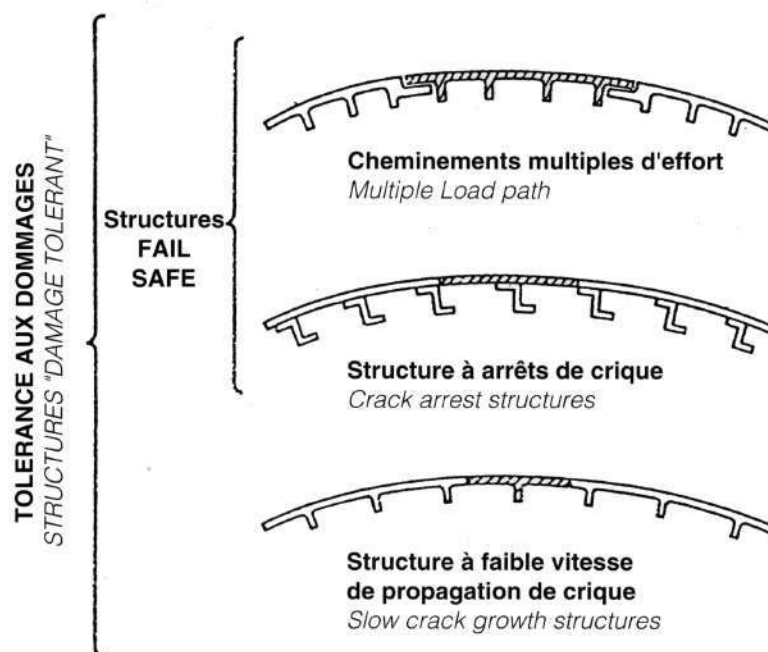


Fig. 20

Fail safe et tolérance aux dommages : exemple d' un intrados de voilure (les zones hachurées représentent les fissures de fatigue prises en compte)

En France comme en Angleterre, cette approche purement « *Fail safe* » est critiquée, car si l'un des chemins d'effort cède en fatigue, il y a une probabilité que les chemins de secours présentent aussi des défauts de fatigue et ne puissent tenir leur rôle. Les autorités maintiennent l'exigence d'essais de fatigue des avions civils, même de conception répondant au « *Fail safe* » comme la Caravelle.

Pendant ce temps, les avions de combat sont traités en *Safe life*, ce qui paraît leur apporter un niveau de sécurité suffisant. Cependant dans les années 1960, l'US Air Force doit déplorer une série de ruptures catastrophiques en fatigue sur des types divers d'avions de combat, et pour couronner le tout, deux accidents sur des F 111 quasiment neufs. L'enquête sur ces derniers cas montre que les ruptures en fatigue ont été initiées par des défauts de fabrication dans des pièces en acier à très haute résistance. Ceci conduit le département de la Défense américain à financer, à la fin des années 1960, un effort majeur de développement sur la mécanique des fractures et les calculs de propagation de criques et à introduire sur ses avions le concept de « tolérance aux dommages ».

Chez Dassault Aviation, cette philosophie « tolérance aux dommages » répond bien aux préoccupations de Marcel Peyrony et est très vite adoptée. Daniel Chaumette développe les méthodes de calcul de mécanique des fractures sur des bases rapportées des États-Unis, et les applique au Dassault Mercure, puis au Mirage 2000. La tolérance aux dommages des cellules est aujourd'hui une exigence réglementaire, aussi bien pour les avions militaires que pour les avions civils (figure 20).

Le CEAT et le Laboratoire central d'aérospatiale travaillent beaucoup sur les essais correspondants. De même l'ONERA s'investit dans la mécanique de l'endommagement et de la rupture, (ainsi que pour les applications moteurs) dans laquelle les équipes françaises, et particulièrement celles de l'ONERA, vont occuper une place éminente au sein de la communauté internationale.

5 - AEROELASTICITE ET FLOTTEMENT

Les méthodes d'essais de vibration et d'identification dynamique des structures ont toujours été un point fort de l'ONERA qui apporte ainsi directement une assistance technique essentielle aux constructeurs. Leur application a pour but de *prévenir les risques de flottement*, phénomène d'instabilité aéroélastique provenant du couplage des vibrations de structures avec les forces aérodynamiques associées à ces vibrations. Au moment de la création de l'Office, ce phénomène, qui peut mettre en jeu la sécurité des avions, est encore peu connu et responsable de graves accidents. La période 1946-1960 donne lieu à la formulation et à la mise en œuvre de l'approche scientifique de ce phénomène grâce à la constitution d'équipes de recherche⁸¹ en calcul de structures, en aérodynamique instationnaire et en couplage fluide-structure, tant sur le plan théorique qu'expérimental au sol, en soufflerie et en vol.

⁸¹ Qui sont initialement formées et dirigées par Robert Mazet, ENS21, professeur de mécanique, notamment vibratoire, aux universités de Lille (1936), Poitiers (1948) et Orsay (1961-74), et chargé de la direction scientifique « résistance des structures » à l'ONERA de 1947 à 1969 (auteur de *Mécanique vibratoire*, Béranger, 1955 et Dunod, 1966). Gabriel Coupry puis (1987) Roland Dat lui succéderont à cette direction.

Les premiers essais de vibrations au sol (voir le fascicule « Centres et moyens d'essais ») sont effectués avec l'installation mobile de l'ONERA et fondés sur les méthodes d'identification modale que sa direction des structures a mises au point : depuis 1952, il n'est pas un prototype en France qui ait volé sans avoir été soumis, au préalable, à ces essais. Puis *les essais en soufflerie de maquettes dynamiquement semblables* sont entrepris (essais en 1972 sur maquettes Mirage G8, Mercure et Airbus) et permettent de suppléer à l'insuffisance des méthodes théoriques dans le domaine transsonique ou dans le cas de configurations complexes des charges extérieures. Enfin, les essais de vibrations en vol réalisés à l'aide de systèmes d'excitation (électrodynamique sur Concorde en 1969, à ailette oscillante sur Airbus A300 en 1982) permettent de valider *les calculs de flottement* (les calculs par éléments finis permettent une très bonne prédiction du flottement et des modes de vibration) et de procéder, en liaison avec le CEV, à l'ouverture du domaine de vol des avions prototypes (figure 21).

L'expérience acquise avec les avions permet à l'Office de traiter efficacement les problèmes de vibrations ou d'aéroélasticité qui se posent hors du domaine aéronautique, par exemple pour les éoliennes ou les ponts suspendus à haubans (tels en 1973 celui de St-Nazaire à St-Brévin, premier pont à haubans de grandes dimensions construit en France, et en 1987 le pont de Normandie).

6 - MOYENS DE CALCUL

Comme dans les autres disciplines auxquelles l'aéronautique fait appel, l'aérodynamique a bénéficié, à partir des années 1970, du fort développement des moyens et des méthodes de calcul ainsi que des progrès de l'analyse numérique (codes de calcul et simulation numérique). De plus en plus puissants, les ordinateurs permettent de faire des progrès importants dans le domaine des calculs aérodynamiques en ce qui concerne aussi bien la complexité du modèle mathématique, (en allant du fluide parfait en stationnaire au fluide visqueux en instationnaire, avec les équations de Navier-Stokes) que celle de la configuration géométrique traitée (en allant du profil d'aile à l'avion complet). Les puissances de calcul installées dans les laboratoires d'État comme chez les industriels ont cru exponentiellement (Exemple pour Dassault Aviation à la figure 22).

Dès le début des années 1980, l'ONERA se lance dans l'acquisition de grands calculateurs scientifiques, grâce auxquels il peut jouer en Europe un rôle de pionnier dans la réalisation des grands codes aérodynamiques. Il a accès, en 1983, au Cray 1S de la Recherche en tant que partenaire du centre de calcul vectoriel pour la recherche (CCVR) installé à l'École Polytechnique. L'année suivante, sous l'égide de la DGA et à l'initiative de l'ingénieur général Auriol, alors directeur général de l'ONERA, il met en place le « calculateur aéronautique » (un Cray 1S2000, auquel succède un Cray XMP 18 en 1987... et un C94 en 1996) avec pour premiers partenaires Aérospatiale, les Avions Marcel-Dassault, Matra-Défense et SNECMA. Les essais en soufflerie restent néanmoins toujours indispensables pour affirmer les configurations retenues d'après les résultats de calcul ; d'autant que certaines souffleries (cryogéniques, par exemple) s'approchent aujourd'hui des conditions de compressibilité (nombre de Mach) et de viscosité (nombre de Reynolds) représentatives de celles du vol.

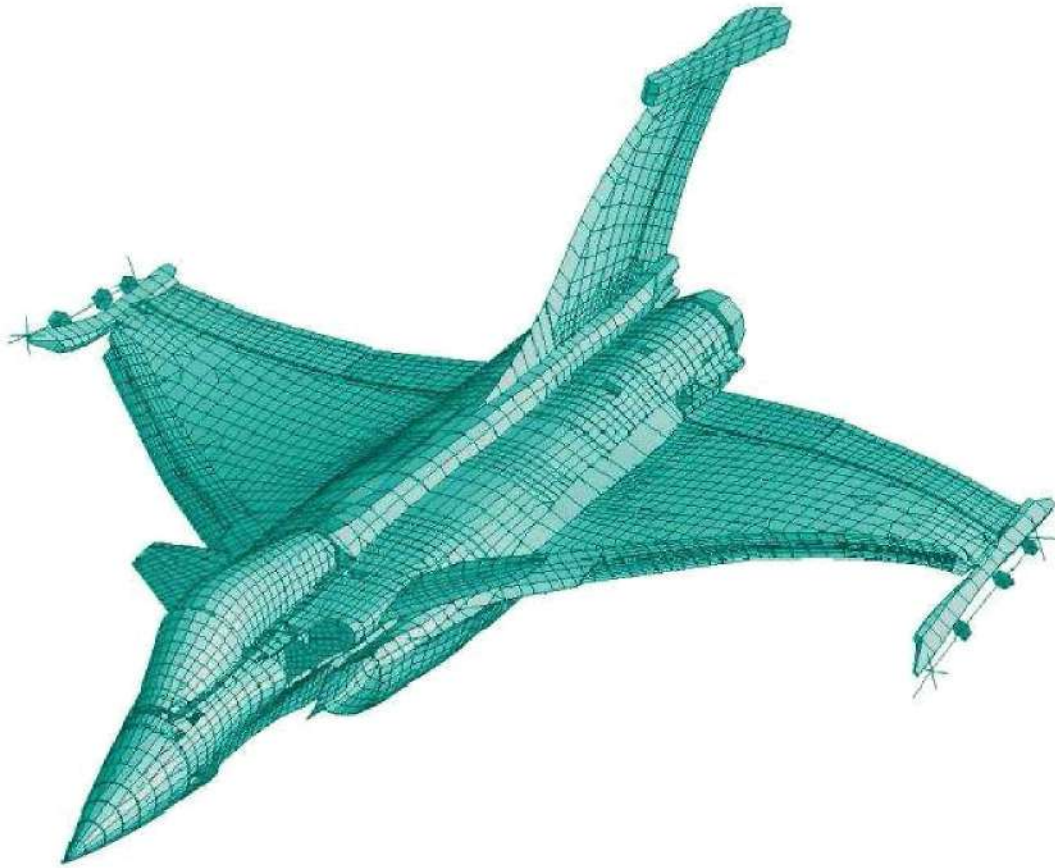


Fig. 21

Les calculs par éléments finis permettent une très bonne prédiction des modes de vibration :
ici premier mode antisymétrique du Rafale, calcul Dassault Aviation

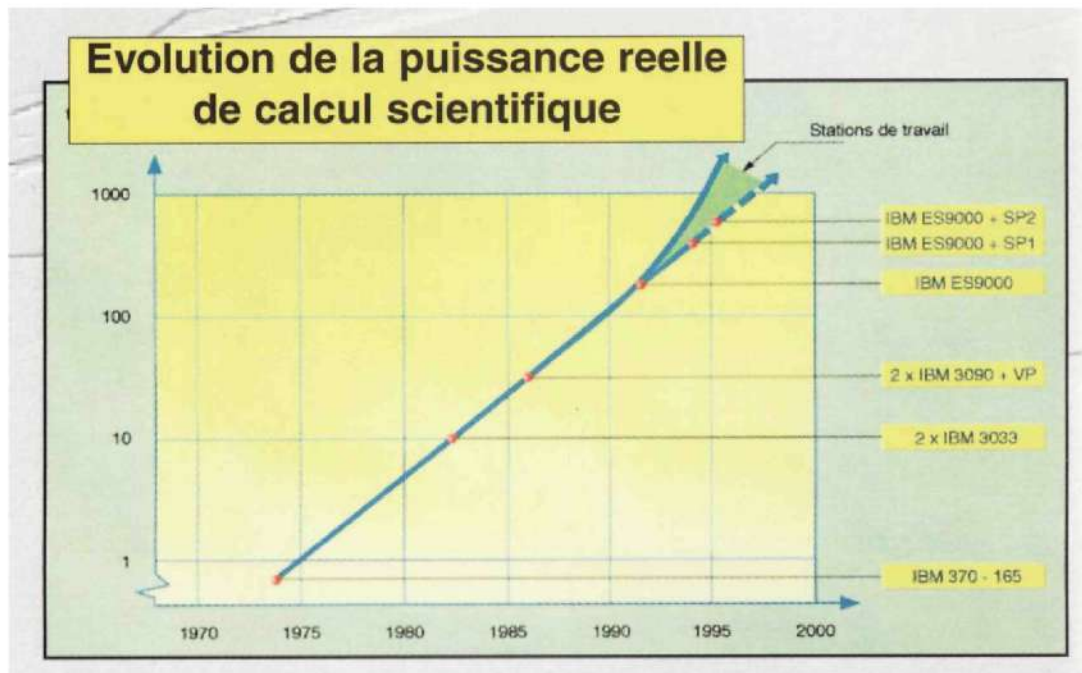


Fig. 22

Les puissances de calcul installées dans les laboratoires d'État comme chez les industriels
ont cru exponentiellement : ici le cas de Dassault Aviation

CHAPITRE 2

TURBOMACHINES AERONAUTIQUES

Les turbomachines aéronautiques ont fait l'objet de l'excellent ouvrage COMAERO sur les programmes de moteurs (2005), coordonné par Michel Lasserre. On rappelle ci-après, à titre historique et avant de décrire les études amont, le rôle d'éminentes personnalités, chercheurs ou ingénieurs qui ont marqué cette période en matière d'innovation et de développement, et ont donné à notre pays la capacité de se remettre à niveau rapidement.

Auguste Rateau a été le précurseur en faisant paraître en 1897 un traité célèbre sur les turbomachines qui introduit notamment les paramètres de similitude, en créant en 1903 sa société d'appareils à turbine et en réalisant en 1916 le premier turbocompresseur de suralimentation au monde, expérimenté en 1918 sur Breguet XIV. C'est à la même société *Rateau* que remontent en France à 1939 les premières études de turboréacteur : menées sous la direction de René Anxionnaz et de Marcel Sédille ; elles aboutissent en 1947 à un essai d'homologation au sol à la poussée de 1100 déca newton (kgp) du premier turboréacteur à double flux français et même mondial⁸², le SRA1 (SRA : Système Rateau-Anxionnaz). Sans soutien de l'État, la société abandonne en 1953 et laisse partir plusieurs ingénieurs formés (parmi lesquels R. Constant, A. Lafond, G. Mission, G. Racine, C. Jouhanneau) au département de turbomachines de la SNECMA qui vient d'être constitué par Michel Garnier. La CEM, étudie également pendant la guerre, sous la direction de Georges Darrieus et avec René Bidard, une turbine pour l'aviation, construite par la SOCEMA avec Pierre Destival, et qui aboutit en 1946 au TGAR 1008, délivrant en 1949 une poussée de 2100 kgp au banc, également sans suite.

En ce qui concerne la naissance de l'ATAR à la SNECMA, Pierre André, qui a vécu et fort bien décrit cette période allant jusqu'au M 53 dans l'ouvrage COMAERO sur les moteurs, a récemment porté un intéressant témoignage⁸³ sur la contribution des ingénieurs allemands, notamment celle des docteurs Hermann Oestrich et Hans-Georg Münzberg. Le premier moteur, l'ATAR 101 V, tourne au banc en mars 1948, le 1^{er} vol (ATAR 101 B) a lieu sur Ouragan en 1951. L'IG Michel Garnier succède en 1960 au Dr Oestrich comme directeur technique (1960-78) et saura faire les bons choix techniques et industriels en accord avec sa tutelle, la DTI, comme il avait contribué à les faire au tout début des années 1950 avec son président (1949-64) Henri Desbruères. Les IC Jean Devriese (1968-78) et Pierre Lachaume (1978-87) reprennent successivement la direction technique après avoir dirigé la section moteurs du STAé (section et service qui ont été dirigés entre 1946 et 1971 par l'IG André Vialatte, qui a remarquablement orienté et soutenu l'industrie des moteurs⁸⁴).

La firme *Hispano-Suiza*, bien connue avant-guerre, choisit en 1946 la construction sous licence avec Rolls-Royce : elle produit les turboréacteurs NENE en 1949 (2300

⁸² Considéré comme tel (résultant d'études entreprises en 1940) par Alfred Bodemer, documentaliste à SNECMA, dans « Rateau et l'aviation », *Revue Pégase*, n°62, juin 1991.

⁸³ Dans la *Revue Pégase*, n°111, 4^{ème} trimestre 2003.

⁸⁴ Cf. l'ouvrage COMAERO : Michel Lasserre, *Les moteurs aéronautiques*. Paris, CHEAr/DHAr, mars 2005.

kgp), Tay en 1954 (2800 kgp), dérive du Tay en 1953 une version à compresseur amélioré, le Verdon (3500 kgp). Ces réacteurs propulsent nos premiers avions de chasse d'après guerre : Mistral, Ouragan, Mystère II et Mystère IV A avant que les ATAR ne prennent le relais. Parmi les personnalités marquantes : les présidents Maurice Heurteux, Robert Blum, les ingénieurs Marcel Bruyère et Pierre Chaffiotte.

C'est à partir de leur invention en 1937 du compresseur S 39 à circulation variable pour suralimenter le moteur Hispano-Suiza 12 Y du Dewoitine 520 et des commandes⁸⁵ qui leur furent passés par l'État, que Joseph Szydlowski et André Planiol fondent en 1938 la société *Turboméca*. Guy Decôme raconte la récupération en Allemagne en 1945 d'ingénieurs allemands (initialement au nombre de 120, venant de Daimler Benz, Dornier, Messerschmitt et Heinkel, ils resteront une vingtaine en 1949 et définitivement douze en 1952, naturalisés pour la plupart, dont Willy Syring qui deviendra directeur technique) ; quelques-uns parmi eux dont Georg Oberländer seront en 1947, avec Joseph Szydlowski, à l'origine de la conception de l'Oredon, qui fit son premier essai en 1948, ancêtre de toute une famille de turbomoteurs (Artouste, Astazou, Turmo, Arriel, Makila...) qui équiperont tous les hélicoptères de série construits par la firme de Marignane (le SE 3130 Alouette II équipé de l'Artouste II fait son premier vol le 12 mars 1955 : sorti à plus de 1 300 exemplaires il sera le premier grand succès mondial d'hélicoptère à turbine) ainsi que de turboréacteurs d'avions (d'abord le réacteur TR 011 Piméné et l'Aspin I, premier réacteur double flux à voler en France le 6 novembre 1951 sur l'avion Fouga Gêmeaux IV ; puis les couples Marboré-Fouga Magister, Aubisque-SAAB 105, Adour-Jaguar, Adour-Hawk en franco-anglais, Larzac-Alphajet en franco-allemand avec SNECMA) et de missiles (couple Marboré-cible CT20, Arbizon-Otomat). Le lancement en 1965 du programme Adour sera le début d'une coopération exemplaire et durable avec Rolls-Royce, comme en témoigne aujourd'hui l'ampleur des programmes de turbomoteurs RTM 322 (NH 90) et MTR 390 (Tigre) ; les accords de coopération franco-britanniques de 1967 sur les hélicoptères Lynx WG13-RB360, Puma SA330-TurmoIIIC et Gazelle SA341-Astazou, se limitant à une co-production. Devenue un motoriste au niveau mondial présentant une grande variété de produits, la société Turboméca le doit, outre à son président fondateur, au soutien de l'État (les services de la DTI, le STAé et sa section moteurs que l'IG André Vialatte a dirigés successivement de 1946 à 1971), ainsi qu'à ses principaux responsables qu'ont été ses trois premiers directeurs Willy Syring, Charles Martin-Neuville et René Barthélémy, et son directeur général (1973-87) Gérard Pertica. Jusqu'en 1980, le DG Adjoint W Syring est responsable de la direction technique, mais le président J. Szydlowski se réserve le titre de directeur technique. Après le départ de W. Syring en 1980, Robert Deblache est le premier directeur technique à temps plein (lui succèdera en 1985 Jean Bernard Cochetoux, PDG en 1996).

James Gaston Bayard, ingénieur militaire des travaux de l'Air à l'ERA (origine du CEAT) de Toulouse, qu'il quitte en 1945 pour fonder la société *SEMCA*, qui deviendra par la suite le leader français du conditionnement d'air militaire et civil, y crée le turbodémarrreur *Noelle 60* (60CV, 1960). Il fonde *Microturbo* en 1961 pour développer le *Noelle 60*, qui sera à l'origine d'une famille de turbodémarrreurs

⁸⁵ l'IG Raymond Marchal raconte comment, au STAé à l'époque, il est intervenu pour faire obtenir la commande massive dont parle Guy Decôme dans l'ouvrage *moteurs COMAERO* (p.114), dans le bureau d'Albert Caquot, alors directeur de la DTIA en 1939 (témoignage dans « Albert Caquot » de Jean Kérisel, ENPC 2005).

autonomes qui équipera tous les intercepteurs *Dassault*. En 1972, sous l'impulsion de l'IGA Marc Faury, et avec l'aide de la DRME et de la DTCA (DE en 1975 et 1979), il lance le TRI 60, turboréacteur consommable, à partir duquel sont développés les réacteurs de nombreux types d'engins-cibles et de missiles, dont l'*Apache* et ses dérivés *SCALP EG / Storm Shadow*). Voir également l'ouvrage COMAERO sur les moteurs de Michel Lasserre.

Les études amont pour les turbomachines

La réalisation des moteurs s'appuie sur un ensemble de techniques avancées en mécanique, aérodynamique, combustion, matériaux... qui ne sont vraiment maîtrisés que par un petit nombre de pays

Dès le début des années 1960, le motoriste *SNECMA* fait croître ses équipes de recherche et s'engage relativement tôt dans la coopération avec l'ONERA, les centres de recherche universitaires et les laboratoires du CNRS sous la forme d'actions concertées qui sont souvent incitées et soutenues par la DGA, principalement la DRME en liaison avec la DTCA. Les principaux domaines de recherche concernés par les turbomachines aéronautiques sont la mécanique, l'aérodynamique, l'aérothermique, la combustion, les matériaux et leur technique de mise en œuvre.

Le laboratoire de combustion de l'École centrale de Paris dès 1960, le Centre des matériaux de l'École des mines de Paris à sa création à Corbeil en 1966 (voir le chapitre 4 matériaux et procédés) choisissent d'effectuer progressivement une grande partie de leurs recherches sur des thèmes *SNECMA*. Depuis 1970, le champ de ces actions s'est élargi vers la recherche fondamentale. En 1988, année de la *mécanique*, en France, ce sont quarante laboratoires de recherches français qui passent des accords de recherche sur 60 thèmes (dont 20 concernent les matériaux), du fondamental à l'appliqué, avec le groupe *SNECMA*⁸⁶ et lui apportent leur appui dans la totalité des sciences et des techniques susceptibles d'application dans la conception de ses turboréacteurs et de ses moteurs-fusées.

Parmi ces laboratoires coopérants et soutenus par la DGA (DRET et STPA), on peut citer, outre ceux de l'ONERA partenaire privilégié, à titre d'exemples, ceux des écoles suivantes : ECL Lyon (laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique⁸⁷), ENSMA Poitiers (énergétique), UTC Compiègne (acoustique et vibrations, matériaux), INSA Lyon (structures), CNAM Paris (matériaux), Mines Paris (CEMEF Sophia-Antipolis) ainsi que ceux du CNRS à Orléans (combustion), Orsay (analyse numérique), Mulhouse (physico-chimie).

On présente ci-après les études amont faites successivement chez les constructeurs *SNECMA* et Turboméca, en citant les organismes de recherche qui ont

⁸⁶ D'après la brochure réalisée à l'occasion de la rencontre « de la mécanique à la propulsion, un enjeu pour la recherche » organisée à la maison de l'UNESCO les 7 et 8 septembre 1988 par le Général Bernard Capillon, président du groupe *SNECMA* qui comportait à l'époque 25 700 personnes dont 13 300 à *SNECMA*, 4 100 à la SEP, 2 700 à Messier-Hispano-Bugatti et 2 900 à Hispano-Suiza.

⁸⁷ Laboratoire fondé et dirigé par le professeur Jean Mathieu, ancien de l'ONERA, l'un des premiers universitaires à s'ouvrir à l'industrie aéronautique, et qui eut, il y a plus de 30 ans, le courage de créer une société partenaire, *Metraflu* (1972-2001), pour se doter des moyens humains et matériels que son administration lui refusait.

coopéré, et en précisant que l'ONERA⁸⁸ a été associé pratiquement à toutes les actions.

1 - LA RECHERCHE A SNECMA⁸⁹

Dès le début des années 1950 SNECMA a engagé des recherches dans le domaine des compresseurs et de la combustion. Sur ces recherches et leurs remarquables résultats on trouvera les témoignages de Jean Calmon, Jacques Caruel et René Hoch.

A partir de 1970 l'effort de recherche a été généralisé à tous les composants et toutes les technologies du turboréacteur et a été régulièrement augmenté jusqu'à nos jours. Sont développés ci après les multiples actions réalisées.

1.1 - Aérodynamique des compresseurs et des soufflantes

Dans le domaine des compresseurs transsoniques et des soufflantes, SNECMA a entrepris dès les années 1950 des essais de validation de la conception de monoétagé transsoniques en tête. Les premiers (TS1 à TS9) avaient permis le développement des ATAR-9K et 9K50. Par la suite la soufflante du M45H fut développée à partir de ces expériences, puis les soufflantes des diverses versions du CFM56.

Pour appuyer ces recherches un effort considérable a été entrepris, également dès 1970, à l'ONERA et en collaboration avec les équipes de SNECMA pour développer la simulation numérique. A cet effet ont été progressivement établis des codes d'intégration numérique des équations complètes d'Euler, permettant le calcul d'écoulements transsoniques, tridimensionnels, instationnaires dans un étage de compresseur composé en fluide parfait dans un premier temps. La simulation de l'écoulement d'un fluide visqueux par intégration des équations moyennées de Navier-Stokes, avec modèle de turbulence, tout d'abord en bidimensionnel, puis en tridimensionnel a été également réalisée, grâce à l'accroissement de puissance des ordinateurs.

En parallèle, des essais en grille dans les souffleries ONERA ont accompagné ces études et fortement contribué au développement et à la validation de ces nouvelles méthodes de calcul.

De 1970 à 1985, la direction de l'aérodynamique de l'ONERA a fait fonctionner dans la soufflerie S5Ch de Chalais-Meudon deux installations d'essai fixes (non tournantes) :

- un montage d'essai de grille d'aubes de redresseur transsonique à faible déviation, qui permet de faire progresser la conception des aubages fortement chargés,
- un montage d'essai de grille d'aubes supersonique à faible déviation qui caractérise les coupes de tête de compresseur ou de soufflante.

Ces installations d'essais fixes (non tournantes) ne sont plus opérationnelles aujourd'hui, compte tenu des progrès prodigieux faits dans le domaine des codes de

⁸⁸ Citons particulièrement, Jean Fabri, puis (1979-88) Serge Boudigues (ancien de SNECMA), pour l'énergétique.

⁸⁹ Par Alain Habrard, et Georges Meauzé en ce qui concerne les recherches de l'ONERA avec SNECMA.

calcul, dont l'Office reste un pionnier. Pour ce qui concerne les moyens d'essais tournants utilisés par la direction de l'énergétique OE à Palaiseau, leur importance est restée limitée, en raison des moyens lourds implantés au CEPr de Saclay et du désir des motoristes de s'appuyer à l'ONERA sur des recherches plus amont. On peut citer :

- la boucle à fréon supersonique : banc d'essais de compresseurs de 1 000kw réalisé par Rateau en 1971, alimenté au fréon jusqu'en 1978 (l'utilisation du fréon dans lequel la vitesse du son n'est que de 120 m/s permet d'obtenir des vitesses supersoniques avec de faibles vitesses de rotation, 12 000 t/mn, mais a été abandonnée en raison de ses caractéristiques thermodynamiques complexes), a permis d'acquérir une bonne connaissance des configurations d'ondes de choc dans une roue de compresseur supersonique. Une partie de ce banc est reprise à la fin des années 1980 pour installer le banc ERECA (Étude et recherche expérimentale sur les compresseurs avancés, figure 23) ;
- une bouclette à fréon, également supersonique, de 25 kw à 12 000 t/min, en configuration centrifuge, qui a été d'une utilité certaine pour Turboméca, 1969 ;
- un banc de 40 kw à 6 000 tr/min, conçu et installé à la soufflerie de Cannes, transféré à Palaiseau et dénommé CERF (Compresseur d'études et de recherches fondamentales), fin des années 1980, pour comportement d'étagage de compresseur axial vis-à-vis de la distorsion
- plusieurs installations de compresseurs de faibles dimensions, fonctionnant à basse vitesse mais fortement instrumentées ont été utilisées pour améliorer la connaissance des phénomènes apparaissant à l'approche du pompage, tels que le décrochage, le décollement tournant...

A partir de 1980, les soufflantes expérimentales TS24-1 et 2 permirent notamment de valider l'utilisation intensive de la simulation numérique. C'est ainsi « qu'en 1984 SNECMA définit, en utilisant pour la première fois un ensemble de méthodes numériques et notamment un code Euler 3D développé avec l'ONERA, la soufflante à nageoires du CFM56-5A destiné à l'Airbus A320, dont le rendement dépasse de trois à quatre points celui de toutes les soufflantes connues à cette époque »⁹⁰

A la fin des années 1980 fut expérimentée la soufflante TS27 à large corde sans nageoire, dont les enseignements furent appliqués au CFM56-7. Au début des années 1990 le TS31 abordait les soufflantes en flèche.

Dans le domaine des compresseurs BP multiétages à application militaire, le TS25 avec directrice d'entrée (DE CEMOS, compresseur expérimental BP multi-étages ONERA-SNECMA, 1981-1987) a contribué au « démonstrateur » du M88 (figure 24), puis le TS28, à rapport de pression nettement augmenté, a préparé le M88 lui-même. Les versions à poussée augmentée envisagées pour ce moteur devaient bénéficier du développement exploratoire, lancé en 1989, CENTOR, compresseur entièrement optimisé en régimes (TS30) visant un très fort rapport de pression au régime maximum et un très bon rendement à bas régimes.

Ce compresseur qui présentait aussi un premier étage DAM⁹¹ CENTOR (qui a permis la démonstration de la capacité du M88 à être développé à 9 t de poussée), a été suivi du développement exploratoire ECO (vers 1995) comportant le test au banc

⁹⁰ Georges Karadimas, Le point de vue SNECMA sur le rôle des superordinateurs, *Nouvelle revue Aéronautique et Astronautique*, n° 2, juin 1994, p. 16.

⁹¹ DAM : disque aubagé monobloc (« blisc »).

partiel d'un compresseur BP dérivé du TS30 mais comportant 3 DAM au suivi d'essais d'un démonstrateur moteur M88-ECO (9 t ou durée de vie fortement augmentée) à pression ambiante et en caisson au CEPr.

Tous ces compresseurs ont tourné en essai partiel au banc 1C1 de Villaroche. Dans le cadre de CEMOS, l'ONERA a développé une méthode originale de simulation de distorsion d'entrée d'air utilisable au banc compresseur, avec une manche d'entrée biseautée pour provoquer un décollement contrôlé sur un secteur de lèvre. Le préistributeur Bertin au banc CERF de l'ONERA a aussi contribué à l'étude de l'effet de la distorsion. Les moyens de mesure de distorsion instationnaire firent l'objet d'importants développements à SNECMA.

Dans les compresseurs HP (Hautes pressions), où les faibles hauteurs d'aube donnent de l'importance aux écoulements secondaires, l'accent des recherches a été mis sur l'étude expérimentale et la modélisation de ces écoulements, notamment par la réalisation par SNECMA et les essais par l'ECL de plusieurs petits compresseurs monoétage ECL1, ECL2 qui n'a pas tourné, ECL3, ECL4. Sur les derniers, des mesures étaient faites par vélocimétrie laser. Des modélisations ont été développées en liaison avec l' Université d'Athènes.

Les mesures sur ECL1 (1977-83) ont permis de valider les codes COPPALE et BROCEFAL (2D), les mesures sur ECL3 et 4 des codes Navier-Stokes 2,5D et notamment le code CANARI (3D) de l'ONERA

En multiétage on notera la conception et les essais de 1990 à 1994 par SNECMA du compresseur H4 (quatre derniers étages du compresseur HP du GE36-UDF⁹², figure 25) au banc RACE du CEPr, puis au banc 1C1 du compresseur H5, très chargé et faisant partie d'un programme d'échange avec Rolls-Royce dans le cadre d'AMET (*advanced military engine technology*).

Pour mémoire, citons, dans les années 1970 des études et essais sur les compresseurs biétages contrarotatifs et, dans les années 1980, des études et essais sur les hélices contra-rotatives (UDF- GE36). Ceci revient à l'ordre du jour pour de futurs moteurs (*open rotor*).

Au début des années 1990, dans le domaine des moteurs civils, le PAT (Plan d'Action Technologique de la DPAC) a permis à la SNECMA de faire l'expérience d'un compresseur à très grand rapport de pression (26 en 11 étages) couplé à une turbine biétage ; le H6 (DE 93, 6 étages calculés en Navier-Stokes 3D), tout aussi chargé mais prévu pour être couplé à une turbine monoétage, a permis de préparer le démonstrateur de corps HP DEM21 du moteur franco-russe SaM146 (SNECMA et NPO Saturn) pour l'avion régional Superjet 100 du groupe Sukhoï.

1.2 - Aéroélasticité des compresseurs

Au début des années 1970 et sous l'impulsion de son directeur scientifique central, l'IG Robert Legendre⁹³, avec le soutien de l'IG Michel Garnier, directeur technique général de SNECMA, l'ONERA entreprend la mise au point et le développement de méthodes d'évaluation des forces aérodynamiques instationnaires sur les aubes de compresseur afin de prévoir les phénomènes de flottement.

⁹² UDF *unducted fan* (ou THR = turboréacteur à hélice rapide).

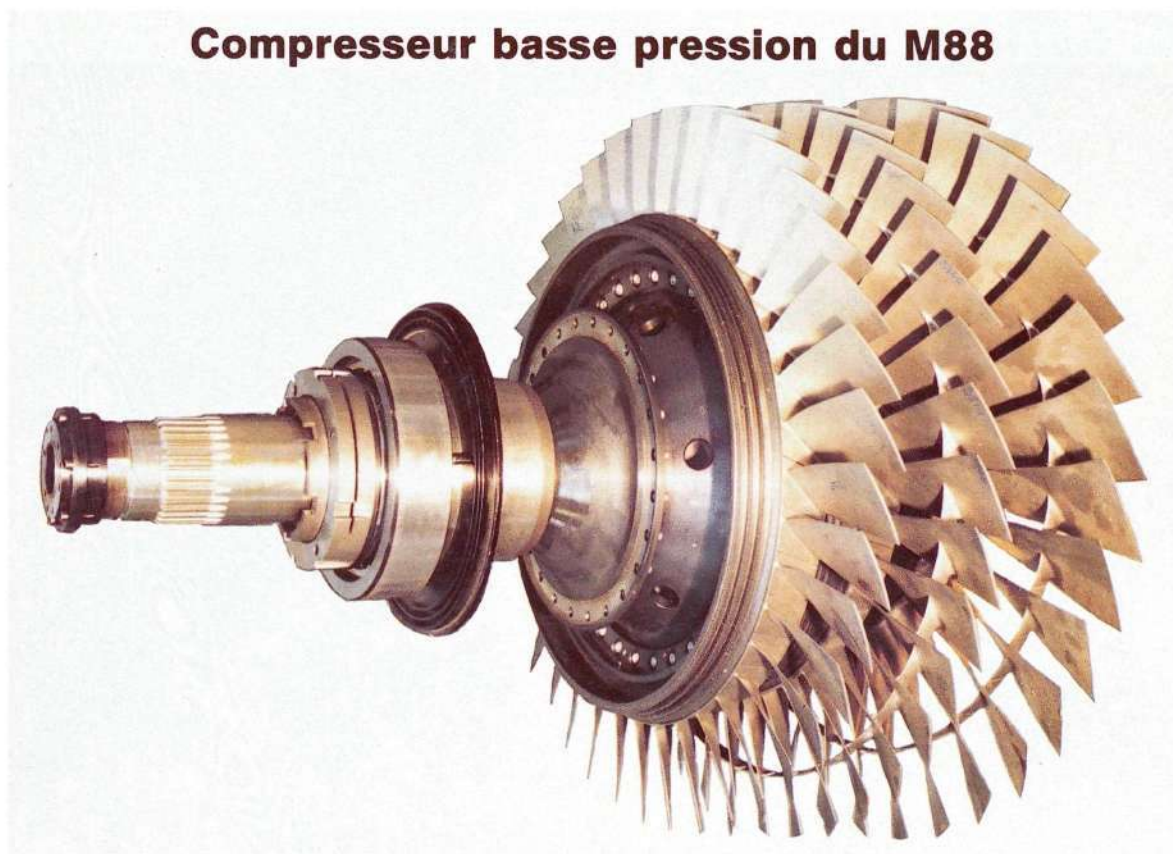
⁹³ X27, IG (GM), directeur scientifique central (1950-71) puis haut conseiller scientifique à l'ONERA, membre de l'Académie des sciences (1968), renommé pour ses méthodes de calcul appliquées aux profils d'aubes et d'ailes (hodographe), à l'aéroélasticité, au bruit d'origine aérodynamique, etc., plus de 300 publications (1907-1994).



ONERA

Fig. 23

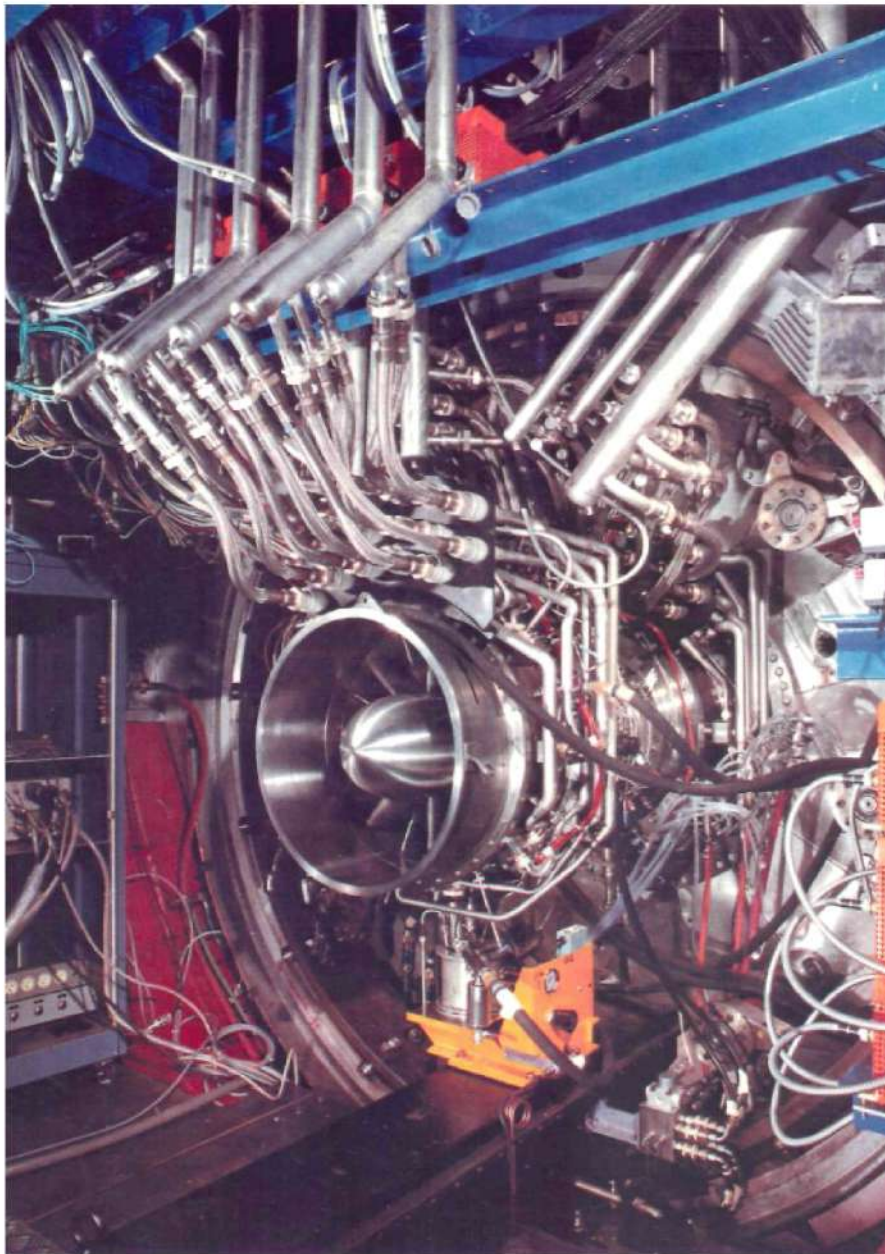
Banc ERECA pour la mise au point de techniques de mesures pour l'analyse de l'écoulement dans une roue mobile de compresseur transsonique (ONERA/Palaisseau)



SNECMA

Fig. 24

Rotor du compresseur BP TS25 (démonstrateur M88)



SNECMA

Fig. 25
Compresseur expérimental H4 au banc RACE du CEPr

Un premier dispositif de grille plane d'aubes en régime subsonique est installé en 1971 à la soufflerie R 42 à Modane-Avrieux : il permet de valider une méthode théorique linéaire de prévision des instabilités vibratoires aéroélastiques en subsonique compressible. Mais cette méthode ne s'applique pas au cas fréquent des instabilités qui ont lieu à incidence élevée et sont provoquées par des décollements de couche limite et des couplages ondes de choc-couche limite, phénomènes encore peu accessibles aux méthodes théoriques, ce que vont montrer les essais entrepris en 1973 à la SNECMA par l'ONERA sur le compresseur M45H. Il est alors décidé de construire une nouvelle soufflerie de grille d'aubes rectiligne, munie d'un dispositif de mise en incidence, et couvrant les domaines subsonique et transsonique, ainsi que Mach 1,4 : cette soufflerie désignée R 4.3 est mise en service en 1977 à Modane et fonctionne jusqu'en 1985, année où elle est utilisée pour prévoir les conditions d'instabilité du compresseur TS 27 de SNECMA avant sa mise en route au banc, ce qui s'avère tout à fait probant. Elle est encore utilisée dans les années 1990 au coup par coup.

1.3 - Aérothermodynamique des turbines⁹⁴

Outre l'aérodynamique pure (exemple d'un calcul figure 26), des études plus fondamentales sur les coefficients d'échanges ont été poursuivies avec l'Institut von Karman, à l'aide de maquettes d'aubes à grande échelle équipées de fluxmètres. A l'ONERA la direction de l'Énergétique a conçu et installé à Palaiseau le banc MERCI (Montage d'étude du refroidissement par convection interne) qui mesure les coefficients d'échange de chaleur dans les canaux internes (en rotation) de refroidissement des aubes de turbine.

En ce qui concerne l'environnement aérothermique des turbines, le banc CRETE (Cavité en rotation pour l'étude thermique des écoulements), également conçu par l'ONERA à Palaiseau pour l'étude des écoulements entre les disques fixes et mobiles des étages de compresseurs et de turbines, a permis de valider le code de calcul MATHILDA développé par l'Office.

Tous ces bancs ONERA sont équipés d'une instrumentation fine de mesures optiques non intrusives utilisant des lasers à partir de 1971 (vélocimétrie laser en bidimensionnel puis en tridimensionnel).

A la SNECMA, les programmes MINOS et DEXTRE ont joué un rôle très important dans les connaissances sur les turbines HP refroidies.

DEXTRE (développement exploratoire turbine refroidie fortement chargée, 1976 - 1983), a été initié en 1972 par le risque que GE n'ait pas la licence d'exportation du corps HP de son réacteur F101 pour le CFM56. Ce risque disparu, DEXTRE s'est trouvé opportunément adapté à la préparation du M88. Ce programme a fait l'objet d'un financement partiel sur crédits du plan de soutien à l'économie en 1976.

L'objet expérimental composé d'un compresseur réalisé à partir d'étages existants, d'une chambre annulaire compacte à injection aérodynamique et d'une turbine refroidie très chargée a été essayé au banc L4 du CEPr aménagé à cet effet.

MINOS (montage inter ONERA SNECMA) qui est une turbine M53 très instrumentée, installée en 1977 au banc turbine à chaud du CEPr (figure 27), a permis de valider (1980) des méthodes de prévision des répartitions de température dans les aubes refroidies par film d'air.

⁹⁴ Pour ce paragraphe 1.3 et le paragraphe 1.7 technologie des turbines, voir la figure 29.

L'essentiel des recherches en essais partiels a porté sur des essais à haute température en grilles d'aubes, incluant les refroidissements. Durant les années 1985 à 1988, ont été ainsi expérimentées au CEPr (bancs K9 et A11) les aubes de distributeurs ARCADE et les aubes mobiles ATTICA, dont les résultats ont permis de spécifier pour le M88 de série des températures très nettement plus élevées que pour le démonstrateur de ce moteur. Par la suite l'accent a été mis sur le refroidissement des plateformes d'aubes de distributeur qu'il est aussi nécessaire de refroidir efficacement et sans fuites.

Des études plus fondamentales sur les coefficients d'échanges ont été poursuivies avec l'Institut Von Karman, à l'aide de maquettes d'aubes à grande échelle équipées de fluxmètres.

Le banc de turbine à chaud du CEPr ayant été désaffecté, le besoin d'un support « corps HP » pour étudier *in situ* l'aérothermique de turbine HP à chaud (notamment l'effet des écoulements secondaires et des jeux) s'est fait sentir, pour faire des mesures représentatives *in situ* sur des turbines de hauteur d'aubes représentatives des futurs moteurs très comprimés. Faute de disposer d'un corps HP M88 et du banc L4 du CEPr, alors mobilisés par le programme de développement, une adaptation du corps HP du moteur LARZAC, très instrumenté (programme ALBERTA) a été installée au banc 6H5 modernisé et capable de gavage par air comprimé (1987-1992). D'usage difficile pour placer l'instrumentation, il a été remplacé par un corps HP M88 dès qu'il y en a eu un de disponible pour les recherches.

Le banc 1T d'essai de turbine à froid de Villaroche a été peu utilisé jusqu'à sa réhabilitation au début des années 1990 en banc « tiède » capable d'essayer des turbines monoétagé (HP ou premier étage BP) avec reproduction des fuites et refroidissement du distributeur.

Sur ce banc, et sur M88 (version 9T), ont été expérimentées des technologies améliorées de distributeur et de roue mobile, notamment avec barrières thermiques pour le développement du M88-2 étape 4⁹⁵ à durée de vie augmentée : DE 92502, TOPP, Turbine Optimisée pour les Performances et la Production, lancé en 1992.

Dans le cadre du PAT précité, une turbine HP à deux étages refroidis a été conçue et évaluée sur corps HP complet.

Vers mi 1995, en liaison avec *General Electric*, des recherches et essais ont été lancés sur l'interaction entre l'écoulement à la sortie d'une Turbine HP très chargée et le premier étage d'une Turbine BP multiétagé et sur la réduction des pertes dans cette zone.

1.4 - Combustion

Le développement des méthodes de calcul et des modélisations fines des écoulements réactifs a été un objectif important des recherches dans les années 1960, afin d'améliorer l'efficacité et la compacité des chambres de combustion en complétant les critères de dimensionnement classiques. L'importance croissante de la réduction de la pollution et les effets aggravants (pour les oxydes d'azote, NOx) de taux de compression moteur de plus en plus élevés ont aussi conduit à renforcer l'effort de recherche au cours des années 1980.

Il convient de rappeler l'opération A3C (Action concertée chambre de combustion) sur la modélisation numérique des écoulements turbulents et réactifs dans les chambres de combustion, engagée en 1987 par la DRET et regroupant plusieurs

⁹⁵ L'étape 4 correspond à des améliorations validées sur le corps HP, le rendement (consommation spécifique à régime partiel) et la durée de vie (1998-2000).

équipes de recherche de l'ONERA (Francis Hirsinger, coordinateur), du laboratoire d'énergétique moléculaire et macroscopique et combustion (unité EM2C du CNRS) de l'École centrale de Paris (animateur Sébastien Candel), de l'INRIA, de la société Bertin et de Turboméca, avec comme partenaire industriel principal SNECMA. Cette opération, particulièrement réussie, a permis de valider le code de calcul « Diamant » (3D Navier-Stokes en écoulement réactif) qui a fait l'objet fin 1991 d'un protocole d'accord de propriété industrielle. La validation s'est faite sur le banc LAERTE, « Laboratoire des écoulements réactifs et de leurs techniques d'étude », installé en 1991 par l'ONERA à son centre de Palaiseau, et a débouché en 1996 sur des calculs opérationnels de foyers tridimensionnels. Le banc LAERTE (figure 28) est équipé d'une instrumentation fine de mesures optiques non intrusives utilisant des lasers, notamment la DRASC (Diffusion Raman anti-stokes cohérente, dont la mise au point doit beaucoup à Jean-Pierre Taran de l'ONERA) pour la mesure locale instantanée de température et de concentration d'espèces chimiques dans les gaz.

Le code Diamant de l'ONERA est le premier code 3D réactif à avoir été utilisé industriellement par SNECMA pour développer des foyers. Couplé avec le code MATHILDA, il a donné naissance au code MSD utilisant des maillages cartésiens. L'extension aux maillages de formes quelconques a été effectué plus récemment avec le code CEDRE.

Par ailleurs, le code éléments finis 2D NADIA de l'ECL, grâce à l'utilisation d'un maillage par triangles a également été utilisé industriellement pour calculer les performances aérodynamiques sur des géométries complexes (interaction diffuseur-tête de chambre). Il a servi de base au développement du code 3D réactif NATUR qui possède cette même aptitude à mailler et calculer des géométries complexes. Intégré avec le code N3S de l'EDF, ce code, rebaptisé N3S-NATUR, est le plus utilisé par SNECMA, car il permet la modélisation de géométries pratiques.

Les dispositifs d'injection par prévaporisation (Olympus, M53, Larzac) ont été remplacés par des dispositifs aérodynamiques à simple ou double vrille (Dextre, M88). Un programme de recherche avec vrilles à géométrie variable a été mené fin des années 1980, l'objectif étant de se donner un degré de liberté supplémentaire pour améliorer les compromis entre les performances du foyer :

- Allumage et rallumage / re-démarrage en altitude ;
- Émissions au ralenti (CO et hydrocarbures imbrûlés) ;
- Émissions à régimes élevés (décollage et montée) : NOX, fumées ;
- Homogénéité des températures en sortie de foyer.

Des dispositifs ayant un potentiel de réduction des émissions d'oxyde d'azote plus important sont étudiés depuis 1990, notamment dans le cadre de programmes européens (prémélange, injection multipoint, etc.)

Dans le cadre du développement de corps HP civil du Plan d'action technologique (PAT) de la DPAC, une expérience de chambre à double foyer (DAC, *Dual annular combustor*) à injection aérodynamique a été menée à bien. Cette technologie est utilisée sur certaines versions du CFM 56-5B.

Ultérieurement, en 2000-2002, une chambre à deux têtes comportant un module équipé de systèmes d'injection de type pré-mélange a été essayée sur un corps HP de type DEM21 dans le cadre d'un projet européen (projet CLEAN). Un potentiel de réduction des NOX de l'ordre de 70 % comparé aux technologies en service a été démontré mais cette technologie est maintenant dépassée car trop coûteuse.

L'architecture de type « chambre à deux têtes » devrait être remplacée à terme par des solutions de type « multipoint » qui pénalisent moins le coût de possession et de maintenance du moteur.

Les technologies de refroidissement ont aussi fait l'objet de recherches importantes, notamment sur les films dans les années 1970, puis sur les barrières thermiques, puis sur la multiperforation. Pour les chambres modernes et futures à très forte charge de combustion (température devant turbine très élevée), le débit d'air frais restant disponible peut être très faible (chambre quasi stoechiométrique) et, sa température elle-même très haute (taux de compression supérieur à 35). L'efficacité du refroidissement et de la protection des parois est donc primordiale. Au milieu des années 1990 a été expérimentée une chambre SNECMA complète (DE 94508), à très haute température, en utilisant le nouveau banc du CEPr spécialement aménagé pour les essais, aux conditions maximales de pression et de température, de telles chambres (K11) alors qu'auparavant on ne pouvait essayer, dans des conditions thermodynamiques proches du plein gaz que des secteurs de chambre.

Dans le domaine de la post-combustion, le développement exploratoire DRAC (discrétion réchauffe arrière-corps), lancé en 1989 a donné une suite au dispositif original d'accroche flamme à bras radiaux développé pour le M88 en visant à la fois un effet de mélange pour réduire la signature infrarouge et augmenter le rendement et une amélioration de l'efficacité du refroidissement des bras radiaux par le flux secondaire du moteur. Un système dérivé, reprenant les acquis de DRAC sera ultérieurement essayé sur démonstrateur moteur M88-ECO.

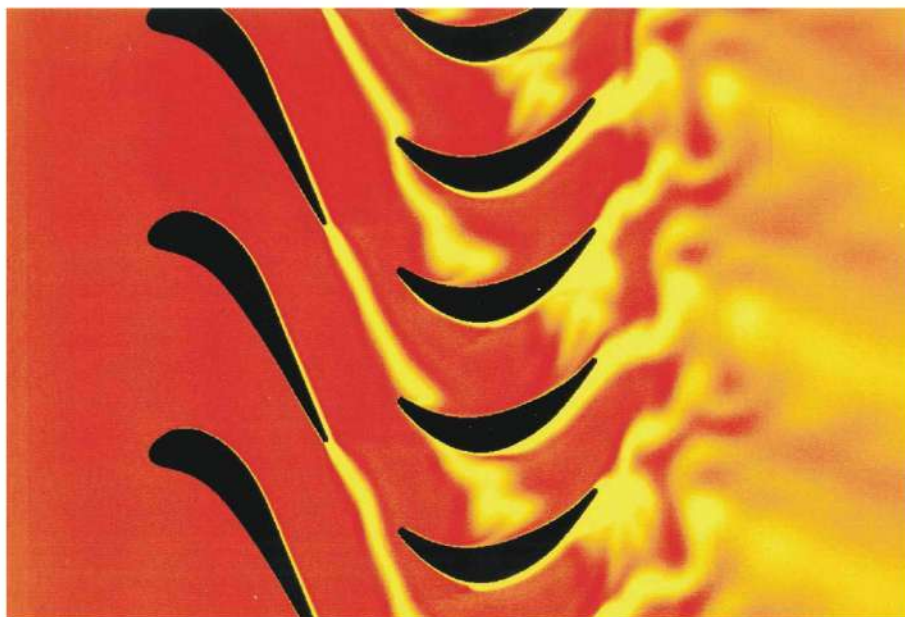
Auparavant, dans les années 1970-1980, des essais de configurations classiques sur canal à échelle réduite avaient été menés à l'ONERA pour établir des critères de dimensionnement des post-combustions en terme de relations longueur-blocage-perdes de charge-rendement et tester l'efficacité de différentes architectures (bras radiaux, systèmes avec giration...).

Pour mémoire, on rappellera le développement de la PC très particulière pour Concorde : taux de post-combustion faible (19%) mais avec un seul accroche flamme de perte de charge très minime.

1.5 - Entrée d'air et tuyère

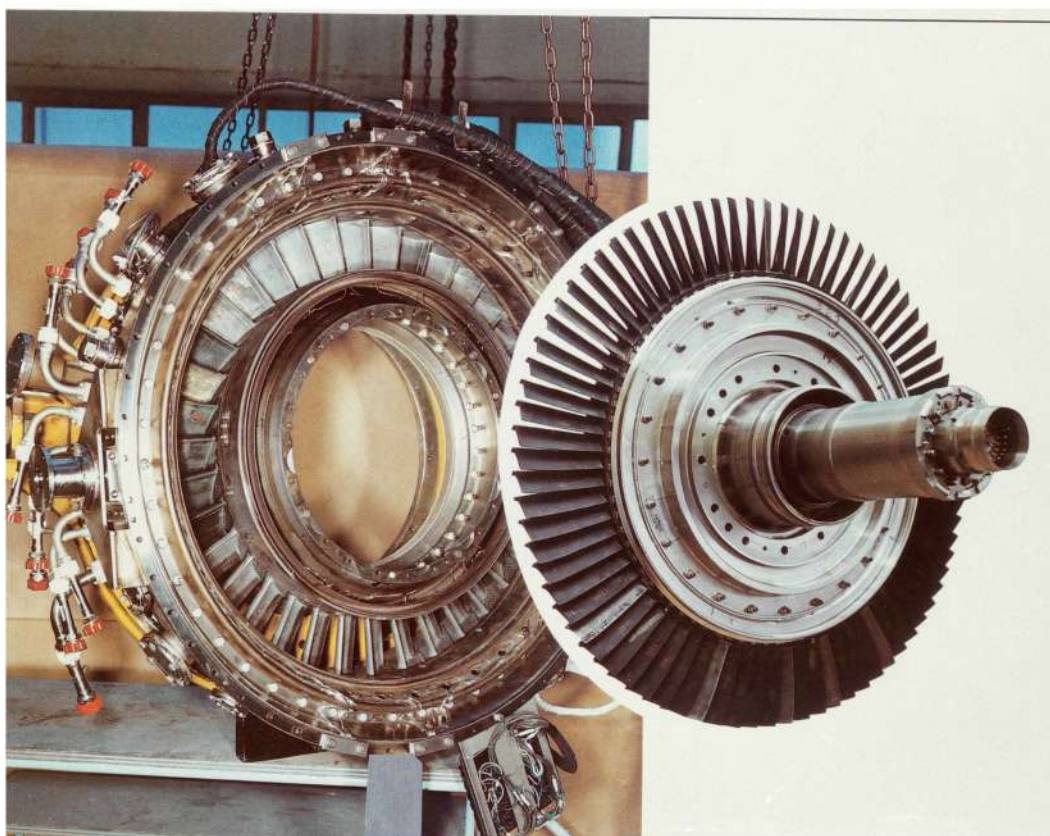
Il convient de mentionner les études aérodynamiques menées sur les tuyères et arrière-corps de réacteurs, lancées par Pierre Carrière⁹⁶ et menées à Modane-Avrieux dans les installations de haut niveau technique que sont les bancs de dynalpie (voir le fascicule Centres et moyens d'essais) à gaz froid BD1 (depuis 1967, arrêté après 1988) et à gaz chaud BD2 (depuis 1976, en commençant par le thème du CFM 56), mesurant avec précision débits et poussée. Ces problèmes d'adaptation, auxquels sont confrontés l'avionneur et le motoriste, ont été particulièrement traités pour Concorde et associés aux problèmes d'entrée d'air. La contribution de Jacky Leynaert à l'entrée d'air de Concorde (optimisation de formes externes, recollement de l'écoulement en supersonique, solution originale de prise d'air) a été fondamentale. Le résultat de cette coopération Aérospatiale-ONERA a été la réalisation d'une entrée d'air à compression mixte, autoamorçable – ce qui est important pour traiter la situation en cas de panne de réacteur – et atteignant à Mach 2 un rendement semble-t-il inégalé (0,96).

⁹⁶ X32, IG (FA). Au LRBA (1946-56, cf. partie I, chapitre1, paragraphe 8). A l'ONERA, directeur scientifique de l'aérodynamique (1956), puis directeur scientifique central (1973-1978). Aérodynamicien et thermodynamicien renommé, crée à SUPAERO les premiers cours de statoréacteurs.



ONERA

Fig. 26
Calcul Navier-Stokes instationnaire 2D dans un étage de turbine transsonique :
visualisation des effets visqueux (entropie)



SNECMA

Fig. 27
Turbine expérimentale MINOS



ONERA

Fig. 28
Banc d'étude de la combustion de l'opération A3C au LAERTE, ONERA Palaiseau

1.6 - Technologie des compresseurs

A la SNECMA, à la fin des années 1980 un effort particulier a été conduit sur la fabrication d'aubes de soufflantes, à large corde, creuses, en titane par soudage et formage superplastique d'une part, et sur la réalisation d'aubes de soufflante en composite, avec fibrage 3D et injection de résine (RTM, *Resin transfert molding*) d'autre part (DTP ASCO). Ces recherches ont été interrompues au début des années 1990. Sur les aubes en composite elles ont été reprises au début 2000 avec succès.

Un étage HP disque-aube intégral correspondant au premier étage du H4 a aussi été expérimenté sur le plan vibratoire au banc 1C2 (programme PATRICIA).

Pour mémoire, avec le TS30 et ECO, il a été développé le rotor intégral (3DAM).

La réalisation expérimentale d'un carter d'entrée en composite compatible constitue le DE CARTEC qui est lancé en 1989. (Voir aussi signature radar).

L'assemblage de tambours de compresseur HP, en particulier pour le M88, a nécessité l'étude et le développement du soudage par friction sur superalliages.

La réalisation de DAM en composite à fibre SiC et à matrice titane fait, depuis 1993, l'objet d'un programme coopératif Euclid CEPA 3 auquel participe SNECMA (DE lancé en 1992 avec Rolls Royce et Fiat Avio).

1.7 - Technologie des turbines⁹⁷

La période 1980-1990 a donné lieu à un développement remarquable de nouveaux matériaux pour aubes et disques (voir chapitre « Matériaux »). Ce développement réalisé par les motoristes, l'ONERA, l'École des Mines et IMPHY SA a permis de retenir tout particulièrement les super alliages AM1 (SNECMA M88) et AM3 (Turboméca), pour la réalisation d'aubes monocristallines, ainsi que le N18 pour disques tolérants aux dommages (M88). On notera les excellents travaux menés par l'ONERA (Roger Labourdette, Jean-Louis Chaboche) sur la modélisation du comportement et de l'endommagement des structures complexes rencontrées dans les applications de ces alliages.

Pour SNECMA, la complexité des circuits de refroidissement dans les aubes de turbines HP, et l'emploi de la solidification dirigée et des nouveaux superalliages a nécessité une activité de recherche et développement importante pour mettre au point les procédés de fabrication, notamment pour la réalisation des noyaux complexes (figure 30).

Turboméca, par contre s'est concentré sur les aubes en solidification dirigée ou monocristalline, non refroidies du fait de leur petite taille.

En ce qui concerne les disques, il a fallu développer les procédés de mise en œuvre des alliages tels que le N18⁹⁸, depuis la poudre jusqu'au forgeage isotherme en passant par l'extrusion de billettes (coopération avec ONERA, IMPHY SA, l'École des mines de Paris : CEMEF (Centre de mise forme des matériaux et Centre des matériaux de Corbeil) ainsi que les méthodes de contrôle de la qualité (détection des défauts).

Un programme exploratoire sur des disques à échelle réduite et à échelle 1 (DE 1985) a permis de valider un ensemble d'outils et méthodes et, à partir de 1995, de s'équiper à SNECMA Gennevilliers d'une unité de forgeage isotherme pour réaliser

⁹⁷ Pour ce paragraphe 1.7 et le paragraphe 1.3 aérothermodynamique des turbines, voir la figure 29.

⁹⁸ Voir la figure 51 au chapitre matériaux.

les disques du M88. Turboméca, pour sa part, a engagé des recherches et un DE (1985) sur des roues de turbine bimétallique monobloc (brasage, métallurgie des poudres) sans déboucher à ce jour. (cf. chapitre matériaux)

Les barrières thermiques font toujours l'objet de recherches importantes notamment pour obtenir un bon accrochage. Les premières applications expérimentales, au-delà des chambres de combustion, ont été faites sur des aubes de turbines M53 avec essais sur moteur vers 1987, puis sur M88. Elles sont maintenant en série sur le M88-2 étape 4.

Les procédés de microperçages des parois d'aubes pour les refroidissements par films (électroérosion, laser, etc..) ont représenté, en collaboration avec Chromalloy, des études significatives.

Une activité continue sur les revêtements antioxydation-anticorrosion a été menée dans les années 1970-1980 (chromaluminisation notamment). Les revêtements abrasables, tant pour les anneaux de turbine que pour les labyrinthes ont fait l'objet de recherches approfondies avec l'ONERA (feutres, céramiques).

1.8 - Discretion

Signature infrarouge

Les jets de turboréacteurs et l'arrivée des missiles ont conduit très tôt à engager des études sur la mesure et la prévision des signatures infrarouges des moteurs. A la fin des années 1980, l'accent mis sur la discrétion des avions militaires a conduit à acquérir des données sur les dispositions constructives aptes à réduire la signature du jet et des pièces environnantes, au moins au plein gaz sec. Outre l'amélioration des modèles de réaction chimique / radiation dans les gaz éjectés, et les simulations par lancer de rayons, des maquettes de diverses forme de tuyère ont été essayées à l'ONERA aux bancs M1 à Palaiseau puis BD2 à Modane en 1988-1994 (tuyère convergente, convergente divergente, bidimensionnelle...) jusqu'à 1100 K, 4 bar. Des études de revêtements ont également été réalisées afin de conférer aux parties solides visibles (premier étage de compresseur BP, chemise de protection thermique de PC, volets de tuyère) des propriétés radiatives spécifiques.

En 1986, il est lancé à la SNECMA un DE sur les dispositifs d'atténuation intégrée de la signature IR des réacteurs : il devait comporter des mesures faites à l'air libre par le CEAT.

Sur le DE DRAC, discrétion réchauffe arrière-corps (1989, déjà cité), la réduction de signature des pièces était recherchée par refroidissement et celle des gaz dans le canal et le jet par mélange. Par contre des formes de tuyères autres que celle du M88 n'ont pas été réalisées.

Signature radar

La contribution du moteur, vu de l'avant, à la signature radar est réputée importante, notamment avec la rotation des aubes du compresseur. Les effets de masque et d'absorption des matériaux employés sur la directrice d'entrée du compresseur peuvent apporter une contribution intéressante à la réduction obtenue par la forme et les matériaux de la manche d'entrée. Le DE CENTOR a inclus un important volet « discrétion radar ». Ceci a compris la conception et la réalisation d'une grille d'entrée en composite compatible M88, incluant des revêtements absorbants (DE CARTEC, carter d'entrée en composites, 1989)

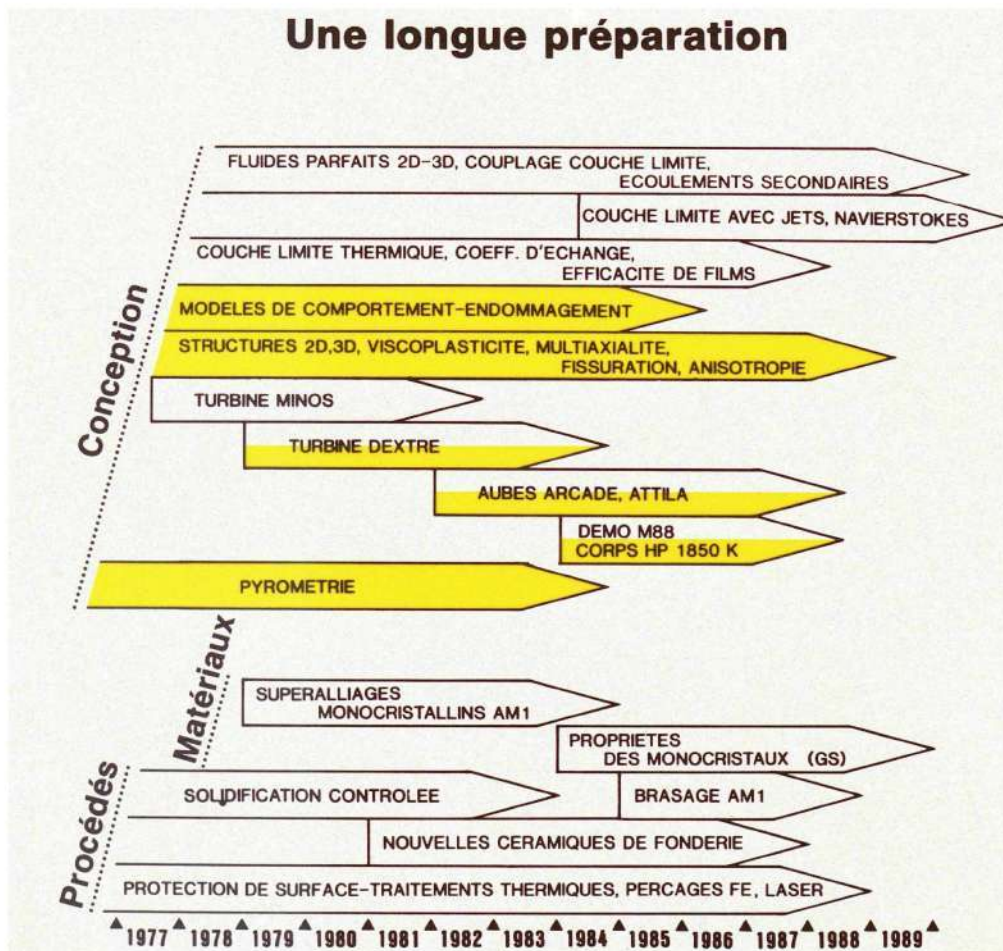


Fig. 29
Les recherches sur les turbines en amont du M88 (Source SNECMA)

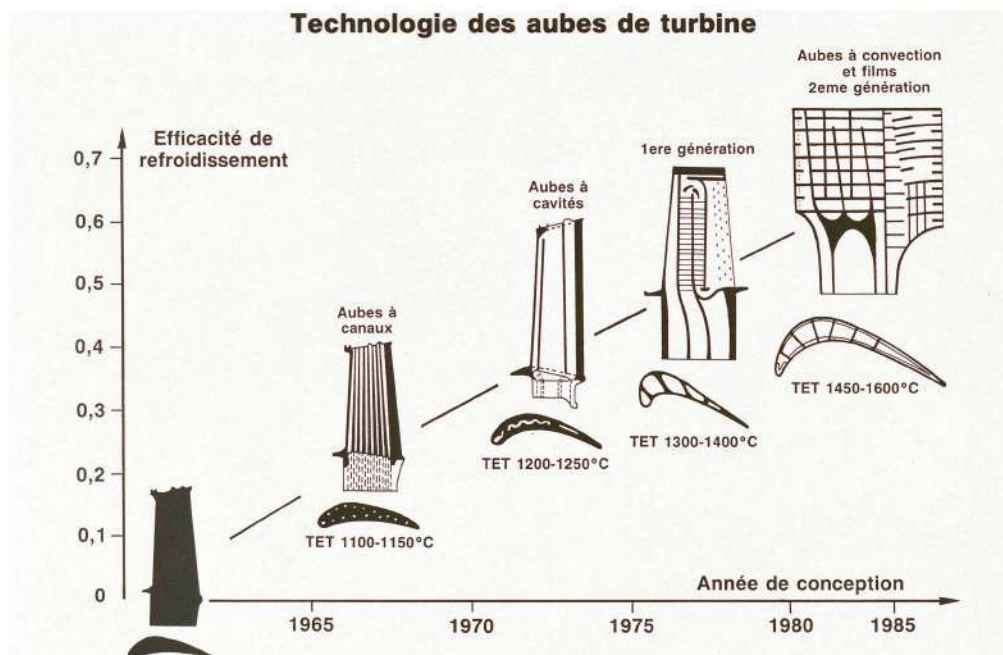
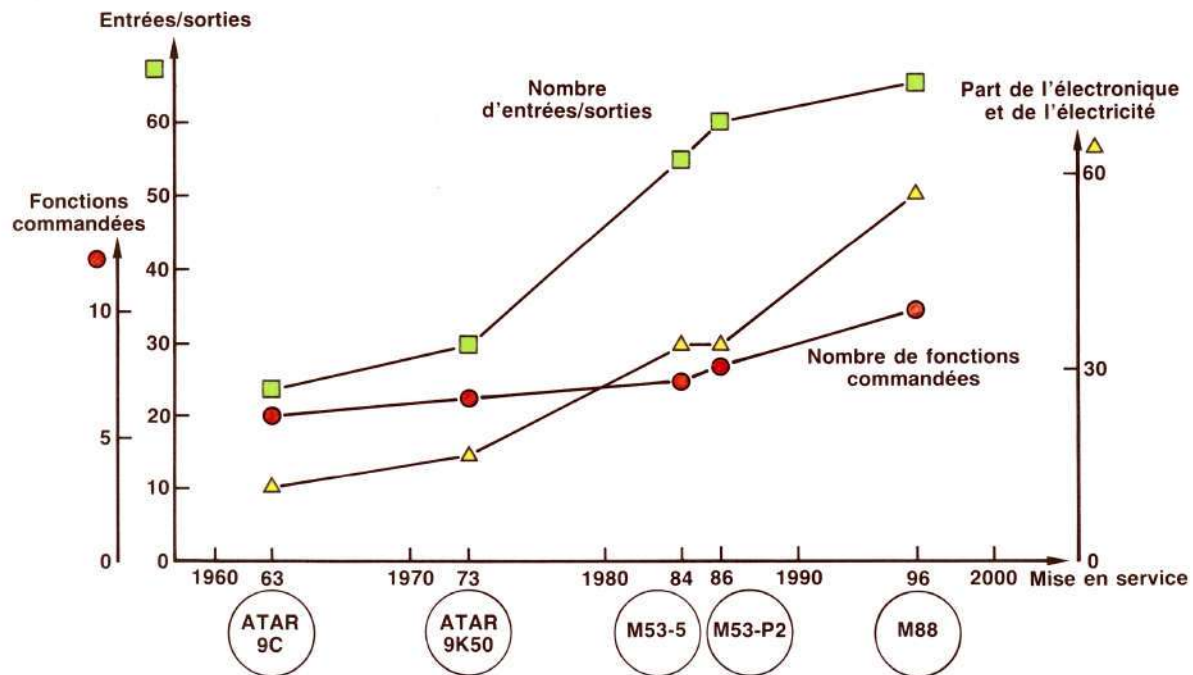


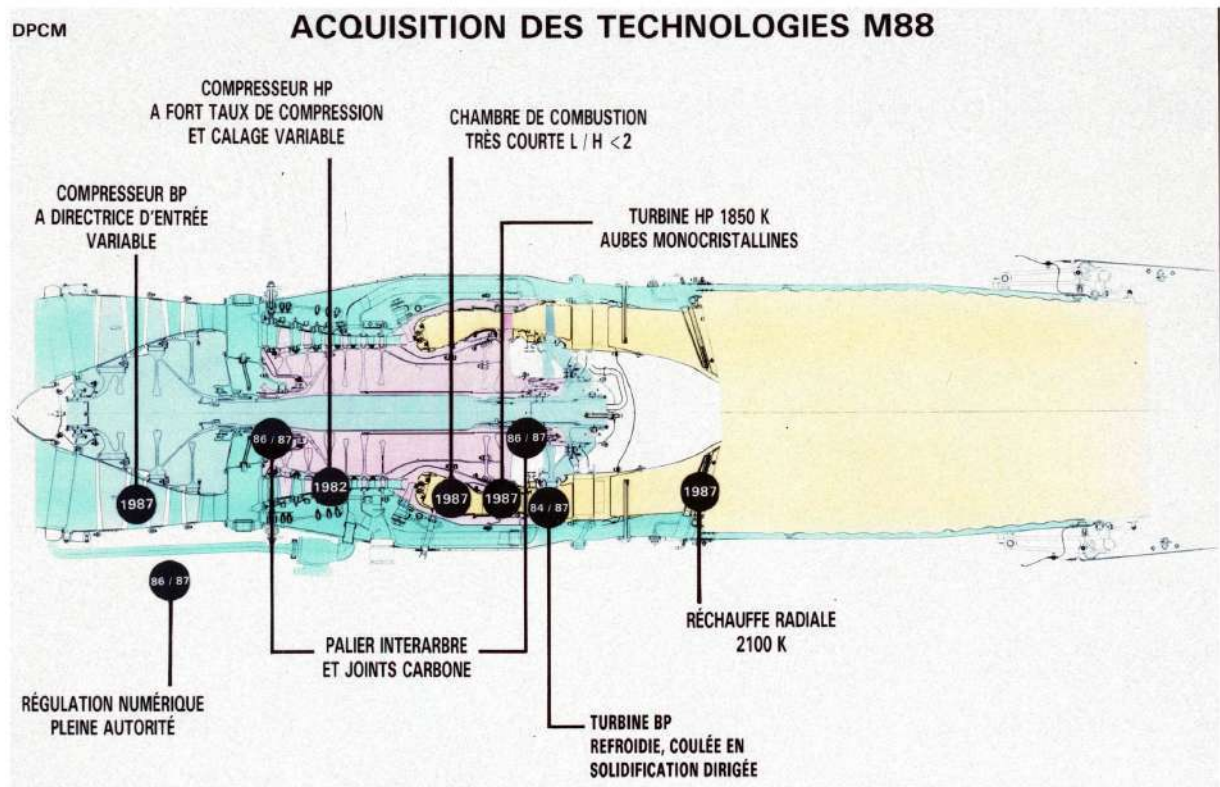
Fig. 30
Technologie des aubes de turbines refroidies (Source SNECMA)

Evolution technologique de la régulation



SNECMA

Fig. 31



SNECMA

Fig. 32

Le programme a été réalisé en coopération avec Hispano-suiza, SNPE et Dassault. Des mesures ont été faites en chambre anéchoïque à la SNPE, comparant le carter composite et le carter métallique en présence de la RM1 du compresseur. Des mesures chez Dassault ont été faites avec la manche d'entrée Rafale.

1.9 - Régulation

A partir de 1970 la part croissante de l'électronique dans les régulations des moteurs a conduit à réaliser des recherches spécifiques et des développements exploratoires : ainsi SYREN (Système de régulation numérique) en assistance au M53, puis RENPAR (Régulation électronique numérique pleine autorité redondante) en préparation du M88 (DE 77503, première phase lancée en 1977 ; DE 84542, deuxième phase lancée en 1984) première application sur avion militaire de cette technologie, qui a réduit la part hydromécanique au minimum. En 1992 a été lancé à SNECMA le DE STAR (Synthèse de techniques avancées de régulation) visant à progresser dans ces technologies (évolution donnée figure 31).

Le programme M 88 doit la réussite de son développement à l'important effort de préparation de l'avenir consenti dès le milieu des années 1970 (figure 32). Initialement, des études paramétriques sont conduites par SNECMA en liaison avec AMD-BA sous l'égide du CPE et permettent de définir en 1978 un cycle entièrement nouveau de moteur « polyvalent » pour avion de combat multi-mission (figure 33). Ensuite de nombreuses études amont, et tout particulièrement d'importants développements exploratoires (turbine DEXTRE lancé en 1976, régulation RENPAR en 1977, corps HP expérimental en 1978,...), ont été menés sur les différents composants du moteur. Le moteur de démonstration tourne au banc en 1984. La première rotation au banc d'un moteur M88-2 de développement a lieu le 27 février 1989, le premier vol sur l'avion banc volant ACX-Rafale A le 27 février 1990. Le premier vol bimoteur sur prototype Rafale C01 est effectué le 19 mai 1991. Il s'agit là d'un programme ambitieux, dont les objectifs techniques ont été atteints, et les objectifs en matière de coûts et délais respectés. Le M88 (poussée fixée à 75 kN) a une architecture des plus modernes : double corps, double flux, très compact (rapport poussée sur masse deux fois celui de l'ATAR 9K50), ayant un rapport de pression de 24 (quatre fois celui de l'ATAR 9K50), la régulation la plus nouvelle, des aubes de stator à calage variable (roue d'entrée et compresseur HP), une chambre de combustion courte et à injection aérodynamique. Depuis, les études ne cessent d'être poursuivies, comme en témoigne l'étape 4.

2 - LA RECHERCHE A TURBOMECA⁹⁹

De son côté, Turboméca se dote très tôt, avec l'aide des « marchés de recherches » annuels accordés par le STAé, d'équipes d'ingénieurs spécialisés en aérodynamique sur les compresseurs et les turbines, pour l'établissement et l'amélioration des méthodes de calcul des écoulements gazeux et des profils. Des bancs d'essais relatifs à ces composants sont installés pour contrôler les résultats de ces travaux en vraie grandeur, soit à Turboméca, soit au CEPr.

⁹⁹ Par Alain Calemard, avec la participation de Georges Meauzé pour les recherches ONERA.



SNECMA

Fig. 33

Visite des dirigeants des Avions Marcel Dassault à la SNECMA Villaroche en novembre 1986, sur l'avancement du programme M88 .

De gauche à droite : Charles Edelstenne, l'IG Hugues de L'Estoile – qui, lorsqu'il était directeur du CPE, avait lancé à la SNECMA vingt ans plus tôt les premières études paramétriques des performances aboutissant en 1978 à la définition du M88 –, Xavier d'Iribarne, Jean Cabrière, Jacques Bénichou, Serge Dassault, Bruno Revellin Falcoz, Jean Calmon et Pierre-Henri Gourgeon (caché).

Outre les travaux qui ont permis de créer la première génération de turbomachines, on note un premier programme de recherche, lié au programme franco-britannique Adour : bien que Rolls-Royce et Turboméca se mettent rapidement d'accord sur l'architecture générale du moteur, Rolls-Royce met en doute les capacités de Turboméca à obtenir les caractéristiques des composants visés (compresseurs et chambre). Les services officiels décident donc de réaliser des maquettes aérodynamiques dans les deux pays et les résultats décideront du vainqueur : Turboméca remporte la compétition avec un compresseur double corps de 7 étages (P/P10) ; la chambre Turboméca tient aussi ses objectifs mais est jugée trop complexe. Rolls-Royce est *fair play* et voue depuis ce jour une admiration sans faille à Max Giraud (Ingénieur en chef, responsable du département études et recherches aérothermodynamiques jusqu'en 1989) qui a conçu l'aérodynamique du compresseur. RR acquiert la licence du compresseur HP et l'utilise en 1969 sur un de ses premiers prototypes de turbofan triple corps, le RB 203 TRENT (44,4 kN) destiné à remplacer le Spey (mais qui n'est pas lancé en série). Le compresseur complet, dans une version améliorée (un étage de moins) et à échelle moitié sera repris plus tard pour le Larzac.

Dès les années 1980, la recherche est structurée autour des technologies nécessaires au renouvellement des petites turbomachines et à leur spécificité :

- recherche de la simplification maximale ;
- technologie des aubages radiaux et des grandes vitesses de rotation (plus de 50000 tr/min) ;
- augmentation des températures de turbine avec mais aussi et surtout sans refroidissement ;
- système de régulation automatique intégré aux commandes de pilotage des hélicoptères.

En recherche fondamentale, ces spécificités se traduisent par :

Adaptation des nouveaux codes de calculs (Euler, Navier-Stokes) aux particularités des écoulements radiaux fortement perturbés ;

Soutien au développement et à l'amélioration des modélisations aérothermodynamiques des codes CADET, CANARI puis ELSA, et DIAMANT en combustion.

Modélisations de l'érosion, de la filtration de l'air, du givrage et de l'acoustique qui permirent d'importants progrès dans l'installation des turbomoteurs et des APU's (*Auxiliary power unit*) dans les années 1990 ;

Validation d'alliages de titane haute température permettant de concevoir des rouets centrifuges à pression élevée ;

Validation de nuances de monocristaux adaptés à l'augmentation de la température des aubes de turbine non refroidies ;

L'ONERA est un partenaire important pour l'aérodynamique, la combustion et les matériaux.

Le Laboratoire de mécanique des fluides de l'École centrale de Lyon apporte aussi une forte contribution dans l'aérodynamique des compresseurs centrifuges

Des programmes exploratoires de composants sont lancés dans le domaine de la mécanique (arbres traversants super critiques, paliers haute vitesse NDM¹⁰⁰ supérieur à 3 millions), de l'aérodynamique (compresseurs, chambres, turbines) et des systèmes automatisés. Puis ces composants sont rassemblés dans des moteurs (ou des générateurs de gaz) de démonstration. Ils permettent de valider leur

¹⁰⁰ NDM, nombre de tours/minute x diamètre moyen, en mm.

intégration dans les différentes gammes de puissance retenues. On retiendra les principaux programmes suivants pour les composants :

- compresseur centrifuge mono étage P/P supérieur à 8 dès 1979, puis monoétage mixte ($P/P > 7$), programmes soutenus par la DRET ; (figures 34 à 36)
- turbine mono étage à forte charge (TFC 1 à 9) qui commence en 1976 et se poursuit encore : la turbine mono étage est la base de toute la nouvelle génération de moteurs : elle permet, grâce à la forte détente au travers de l'aubage d'augmenter la température devant turbine tout en reculant le besoin de refroidissement. Elle répond bien aussi au besoin de simplicité des turbomoteurs. Turboméca a développé l'emploi d'aubes monocristallines rapportées et a engagé des recherches et un DE (1985) sur des roues de turbine bimétallique monobloc (brasage, métallurgie des poudres) sans déboucher à ce jour. (Voir au chapitre matériaux) ;
- Chambre de combustion à flux inversé dont l'encombrement axial réduit est nécessaire aux nouveaux turbomoteurs double corps à arbre traversant ; la taille des moteurs Turboméca a permis à l'ONERA d'essayer directement leurs chambres de combustion dans ses installations de Palaiseau et de participer directement à leur mise au point. ;
- Régulation électronique numérique : dès 1980, Turboméca fait voler à la CGTM une « Gazelle » sous régulation électronique numérique à autorité totale et sera le premier motoriste à certifier cette régulation pour des turbomoteurs civils.

Ces quatre composants se retrouvent, dès 1981, dans le turbomoteur Arrius qui est le premier moteur de nouvelle génération commercialisé par Turboméca.

On note aussi, en 1980, le programme « bi-centrifuge en série », financé par le STPA, qui sera le père du compresseur du MTR390, le moteur de l'hélicoptère Tigre ; ce compresseur a la particularité d'être le premier de ce type, au monde, certifié pour utilisation sur moteur à arbre traversant sans nécessité de vanne de décharge ou de contrôle passif

Pendant une quinzaine d'année, de 1975 à 1990, le STPA aide Turboméca à financer des moteurs de démonstration dans les gammes de puissance correspondant aux besoins prévisibles des futurs programmes militaires NH 90 (2 x 2000cv) et Tigre (2 x 1000 puis 1300cv) :

- En 1978 démonstrateur MTU Turboméca MTM 380 pour le Tigre (compresseur de 5 étages)
- En 1983 démonstrateur MTU Turboméca MTR 385 pour le Tigre (compresseur de 3 étages)

On se rappelle, qu'en finale, le moteur du Tigre aura un compresseur bi étage !

En 1978 démonstrateur Delta 1 : c'est un générateur de gaz de la classe 1800 CV comportant un compresseur axial tri étage à géométrie variable suivi d'un étage centrifuge entraîné par une turbine monoétage à fort taux de détente en COTAC (élaboré par l'ONERA, mais qui a dû être abandonné à cause des caractéristiques de son fluage primaire). Ce démonstrateur sera suivi par Delta 2, équipé d'un compresseur et d'une turbine refroidie monoétage modifiée.

Évolution des compresseurs centrifuges Turboméca

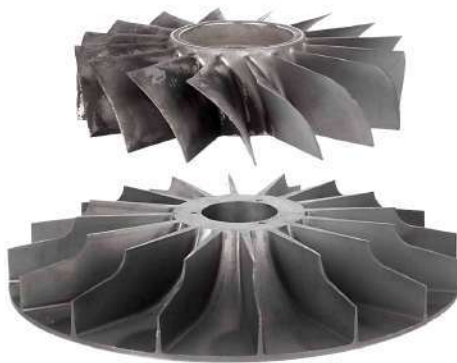


Fig. 34

Les tout premiers centrifuges : construction en deux parties, une roue d'entrée accolée à un rouet purement radial. Avantages : usinage compatible avec les moyens de l'époque
Inconvénients : performances et stabilité aérodynamique limitées



Fig. 35

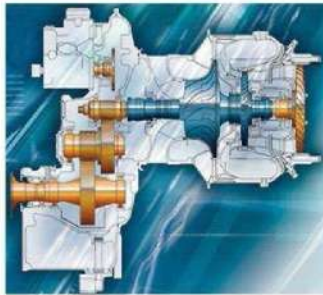
Le même compresseur assemblé. Le contact entre le bord de fuite de la roue d'entrée et le bord d'attaque du rouet pouvait être au choix : libre, en appui forcé ou avec un amortisseur en hypalon. Ceci permettait de maîtriser le comportement vibratoire des pales, difficilement prévisible avec les outils de l'époque



Fig. 36

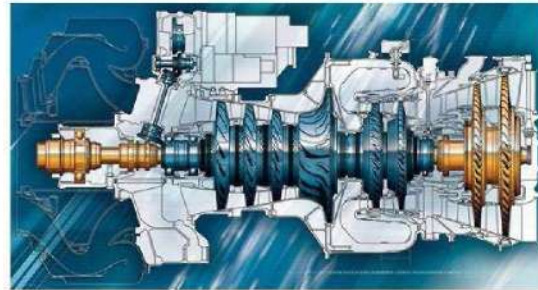
À gauche un rouet centrifuge de première génération, à droite un des tout récents rouets : il est monobloc, les pales sont continues et la sortie n'est plus radiale. On constate aussi la présence de pales intercalaires : avantages : vitesses périphériques et performances élevées, stabilité améliorée. Cette configuration a été rendue possible par l'apparition de fraiseuses 5 axes, le coût d'usinage reste élevé

Les architectures des turbomachines



Arrius 2K

Architecture simplifiée au maximum
pour les petits moteurs



RTM 322

Architecture plus complexe pour
les moteurs plus puissants



Fig. 37

Évolution de la puissance massique des turbomachines



Moteur Artouste 2 année
1954
Puissance au décollage ISA :
300kW (403shp)
Masse : 143 kg
Puissance massique :
2.81 shp/kg
Consommation Spécifique au
décollage :
0.429 kg/shph (0.577 kg/kWh)



Moteur Arriel 1A année
1980
Puissance thermique au
décollage ISA : 466kW
(626shp)
Masse : 111 kg
Puissance massique :
5.64 shp/kg
Consommation Spécifique au
décollage :
0.268 kg/shph (0.360 kg/kWh)



Moteur Arriel 2C2 CG (Coast
Guard) année 2004
Puissance thermique au décollage
ISA : 704kW (945shp)
Masse : 131.5 kg
Puissance massique :
7.19 shp/kg
Consommation Spécifique au
décollage :
0.247 kg/shph (0.332 kg/kWh)



Fig. 38

Dès le début des années 1990, l'activité sur les Delta est remplacée par deux programmes :

- le premier ASTEC 1 et 2 (DE 91), en coopération avec Rolls-Royce : La turbine monoétagée est remplacée par une turbine biétagée refroidie de conception RR. Le rapport de compression du compresseur (toujours trois axiaux et un centrifuge) dépasse 15. Ces démonstrateurs sont les ancêtres du RTM322 qui équipe maintenant en série les hélicoptères NH90, EH101 et une version britannique de l'Apache.
- Le deuxième, VESTA sur le plan national et dans la taille du moteur MTR390 du Tigre, permet à Turboméca de poursuivre son effort sur les turbines refroidies. Sur VESTA, le compresseur axio-centrifuge est remplacé par un bi-centrifuge de nouvelle génération.

Le programme ATHENA prend la suite de VESTA et se poursuit encore aujourd'hui. Turboméca, depuis, poursuit sa stratégie de développement de composants et de validation sur démonstrateurs même si, après ASTEC et VESTA, les financements étatiques DGA se sont taris, les financements DGAC ou PCRD n'ayant pas compensé la baisse des crédits militaires.

En entrant dans le groupe Labinal en 1988, Turboméca coordonne sa recherche avec Microturbo et cette synergie permet d'utiliser les résultats du compresseur expérimental TOMAS développé au milieu des années 1980. Monoétagée à $P/P = 2,1$ il est la base du fan du démonstrateur SIRC pour moteur (double flux, simple corps) de missile de croisière financé par la DGA à Microturbo.

Dans les premiers jours du XXI^e siècle, Turboméca intègre le groupe SNECMA puis SAFRAN. Des nouvelles synergies sont alors possibles et mises en œuvre.

3 - TEMOIGNAGES : PREPARATION DU RENOUVEAU POUR LES MOTEURS DE FORTE PUISSANCE (1950-1970)¹⁰¹

3.1 - Les compresseurs : un domaine d'excellence SNECMA

L'ATAR déjà axial

Alors que la plupart des moteurs britanniques et américains d'après-guerre étaient construits autour de compresseurs centrifuges, le premier prototype ATAR 101V a été conçu, dès 1946, sur la base d'une machine axiale à sept étages. La SNECMA a augmenté la poussée de l'ATAR par un processus progressif particulièrement efficace. Sans changer la configuration d'ensemble du compresseur d'origine, son débit est augmenté de 15% pour aboutir aux versions 101C et D, les premières fabriquées en série et installées sur les chasseurs Dassault Mystère II de l'armée de l'Air française à partir de 1954.

Une nouvelle étape est franchie par l'adjonction d'un étage en avant du compresseur 101D. La version 101 E qui en résulte est le propulseur du bombardier bimoteur SO 4050 Vautour construit à 140 exemplaires en trois versions.

Une seconde étape de gavage par l'addition d'un étage frontal fait passer du 101 E à l'ATAR 8, avec une augmentation du débit d'air de 15% sans modification

¹⁰¹ Par Jean Calmon, avec le concours de Jacques Caruel et de René Hoch.

du diamètre maximal du moteur. Avec post-combustion, c'est l' ATAR 9B du Mirage III.

Ces progrès remarquables ont été réalisés par le service « compresseurs » dirigé par G. Neubauer et R. Bouillet, sous l'autorité de H.G. Münzberg. Dès 1950, les constructeurs de turbomachines disposaient des éléments nécessaires pour réaliser des compresseurs axiaux dont les performances pourraient être caractérisées par un taux de compression par étage compris entre 1,20 et 1,25, un débit spécifique maximum de l'ordre de $140 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, le rendement avoisinant 0,84.

Dans cette technique, les vitesses au bord d'attaque des aubes sont limitées à des valeurs correspondant à des nombres de Mach inférieurs à 0,9. Il en résulte de sérieuses limitations dans la capacité de débit, la vitesse de rotation et le taux de compression par étage.

Le compresseur étant le module le plus volumineux et le plus lourd du turboréacteur tous les efforts vont porter sur la réduction de la longueur, c'est à dire principalement du nombre d'étages et sur l'accroissement du débit aspiré par unité de surface frontale.

Un rêve : le tout supersonique

Dès le début des années 1950, la SNECMA a engagé des recherches vers des technologies nouvelles. Elles sont conduites par P. Schwaar, ingénieur suisse.

La première priorité porte sur l'élévation du taux de compression génératrice de performances globales très améliorées, sans accroître le nombre d'étages. Compte tenu des déviations importantes déjà réalisées, le progrès ne peut venir que d'un accroissement de la vitesse de rotation et, par conséquent, des nombres de Mach sur les aubes.

D'autre part, on sait qu'une onde de choc détermine une augmentation de la pression statique qui s'effectue avec un bon rendement tant que le nombre de Mach incident reste relativement bas. Ces considérations ont été à l'origine d'importantes recherches dans le domaine des compresseurs supersoniques, c'est à dire des machines pour lesquelles l'écoulement relatif aux aubes mobiles ou fixes est entièrement supersonique. Les premières investigations furent menées par Weise dès 1937, puis les travaux ont été repris au NACA sous l'impulsion de Kantrowitz en 1942.

À la SNECMA, une première machine expérimentale est construite et essayée en 1954. L'objectif de S1 est tout de suite extrêmement ambitieux : taux de compression égal à deux pour un seul étage qui pourrait remplacer les trois premiers de l'ATAR 101D. Toutefois, seul l'aubage fixe redresseur sera supersonique afin de ne pas compliquer, pense-t-on, la situation avec des phénomènes secondaires liés à la rotation. En fait, le fonctionnement de la roue mobile trop chargée est mauvais, les angles d'attaque du redresseur sont trop faibles, les systèmes d'onde de choc prévus ne sont pas amorcés, le débit est en déficit de 15 à 20%, le taux de compression ne dépasse pas 1,46 et le rendement est inférieur à 50%.

Cette expérience aura montré une incapacité à faire fonctionner une roue mobile supersonique aussi chargée et la nécessité de disposer de méthodes de calculs décrivant les équilibres radiaux dans les écoulements. Les premières bases en sont formulées par P. Schwaar qui mène ces recherches à la SNECMA.

Simultanément, les tentatives du NACA avec des configurations à une roue mobile supersonique suivie d'un redresseur subsonique se heurtaient à l'incompatibilité entre les ondes de choc et de fortes cambrures au moyeu.

Aussi, le sujet est-il repris par la SNECMA avec les deux grilles supersoniques pour bénéficier d'un écoulement accéléré à travers la roue mobile dans le référentiel fixe. C'est le compresseur S5 essayé en 1956. Pour un objectif de 1,95, le meilleur rendement est obtenu au taux de compression de 1,80 et plafonne à 0,53. Le décollement reste intense sur l'extrados des aubes et sur les parois limitant la veine.

La conclusion s'impose : le cumul de nombre de Mach élevés et de taux de diffusion importants entraîne des pertes excessives, incompatibles avec un fonctionnement sain et efficace.

Une promesse : le transsonique

Pourtant, les essais des S1 et S5 ont mis en évidence de très bonnes performances aux vitesses de rotation telles que les nombres de Mach soient compris entre des valeurs subsoniques élevées et faiblement supersoniques. Aussi le retour à des prétentions plus modestes a-t-il permis d'affirmer la technique dite « transsonique ». Dès 1955, la SNECMA conçoit et essaye des machines expérimentales. Voir le tableau 1, p.117.

Le TS-1 à deux étages conçu en 1955 pour gaver le compresseur ATAR 101E, avec un accroissement de débit de 32%.

Les TS-2 et TS-3 construits pour aborder des nombres de Mach élevés jusqu'à 1,32, aux niveaux de compression de plus en plus ambitieux de 1,25 et 1,40 respectivement,

Le TS-6 qui constitue une tentative pour réaliser le TS-1 en un seul étage,

L'étape suivante vise à associer deux étages du type TS-3/TS-6 : c'est le TS-7 qui réalise en 1958 un taux de compression égal à 2,0 avec un comportement général exceptionnel.

L'adjonction d'un étage de gavage à grand allongement donne un ensemble TS-8 de trois étages aspirant un débit considérable (190 kg/s par m² de surface frontale, soit 35% de plus que l'ATAR 8) pour un taux de compression de 2,5. Le premier étage du TS-8 constitue le véritable ancêtre des soufflantes de moteurs civils, domaine dans lequel la SNECMA a toujours excellé (applications M45H, puis CFM 56).

Six machines différentes essayées en quatre ans : c'est une performance industrielle extraordinaire.

Le nombre de Mach au bord d'attaque de l'aube mobile varie de 0,8 au moyeu – compatible avec un profil fortement cambré – à 1,3 ou 1,4 à l'extrémité extérieure de l'aube – où l'onde de choc a l'effet minimal sur un profil pratiquement sans cambrure – d'où l'appellation transsonique. Notons que cette répartition est obtenue naturellement avec l'écoulement entrant dans le compresseur et que nous avons démontré dès 1958 la valeur de machines ne comportant pas de directrice d'entrée, configuration très largement adoptée dix ans plus tard dans les nouvelles machines du monde entier.

En 1959, P. Schwaar quitte la SNECMA pour poursuivre sa carrière chez Pratt et Whitney, puis chez Lycoming. Il transmet tout son savoir à J. Calmon qui poursuivra sa mission jusqu'à 1964, remplacé à son tour par J.-M. Thiaville. Ce dernier continuera le développement de la technologie « transsonique » jusqu'en 1976.

La réussite technique exceptionnelle annonce un saut spectaculaire dans les qualités des compresseurs et la SNECMA attend impatiemment l'occasion d'une mise en application.

Une première éventualité s'offre avec l'augmentation de poussée du Pratt et Whitney J75 souhaitable pour le Mirage IVB. Sans changer l'encombrement du compresseur, la SNECMA se propose de remplacer les deux premiers étages, en appliquant la technique transsonique avec un objectif prudent d'accroissement de débit de 5%. A l'échelle 0,4, la maquette homothétique TS-9 est immédiatement conçue et lancée en fabrication. Les résultats obtenus en 1960 sont en tous points supérieurs aux prévisions, en particulier les rendements qui sont très élevés. Entre-temps, le Mirage IV est redevenu un appareil propulsé par l'ATAR mais ce ne sera que partie remise pour le « transsonique ».

P. Schwaar et J. Calmon ont bâti une méthode complète et originale de conception des compresseurs transsoniques, construite et validée dans les années 1960 par les résultats et l'analyse détaillée des essais des compresseurs TS (nombreuses publications).

Première application : l'ATAR 9K

Au début des années 1960, la SNECMA propose pour les Mirage III à l'exportation une version à 6 700 Kgp, puis celle-ci devient le moteur du Mirage IV dans sa définition de série, sous la désignation ATAR 9K.

Les deux premiers étages de l'ATAR 9C sont remplacés par deux transsoniques autorisant une augmentation du débit aspiré de 7% en croisière. Le taux de compression du nouvel ensemble est de 1,65 pour gaver les étages 3 à 9. La mise au point commence en 1961 et, menée « au pas de course », conduit à la livraison du premier avion à l'armée de l'Air française en février 1964.

La technique transsonique remplit ses objectifs : le 9K aspire un débit supérieur au 9B de 5,5% au décollage et de 7,5% dans les conditions de vol à $M=2,0$.

L'ascendance transsonique des moteurs actuels

- La SNECMA aborde le double-flux supersonique...

Annoncé en 1959 par la prise en licence du J75, l'accord entre les deux firmes est conclu le 28 décembre de la même année. *United Aircraft Corporation* dont Pratt & Whitney est une division fait apport des droits de licence en échange d'actions de la SNECMA qui représentent 10,9% du capital. Les premières relations techniques et commerciales portent sur l'adaptation par la SNECMA du moteur civil JTF10 aux avions militaires à décollage vertical.

Les premiers calculs thermodynamiques faits par la SNECMA démontrent que le taux de compression maximum de la soufflante à deux étages du JTF10 est insuffisant pour permettre l'allumage d'une préchauffe sans risquer un pompage. La SNECMA décide de modifier le compresseur basse-pression en remplaçant le troisième étage par un étage complet de soufflante comprimant tout le débit.

Après discussion avec les spécialistes Pratt & Whitney en novembre 1961, le compresseur basse-pression du moteur supersonique TF 106 est lancé et fonctionne au banc un an plus tard. En ce qui concerne ses caractéristiques, le TF 106 absorbe un débit d'air supérieur de 55% à celui de l'ATAR 9K, avec un taux de dilution de 1,2 et un taux de compression global de 16.

Toujours en ligne avec sa politique de compresseurs transsoniques à hautes performances, la SNECMA réalise une machine TS 10 démontrant, dès janvier 1963, que le débit aspiré par le JTF 10 et ses dérivés peut être augmenté de 12% en remplaçant les deux premiers étages de la soufflante suivant une conception plus avancée.

Les compresseurs expérimentaux TS 8 et TS 10 lançaient l'acquisition d'une technologie propre des soufflantes multi-étages pour moteurs militaires. Elle trouvera son application à partir de 1968 sur le M53 et plus récemment dans sa forme la plus évoluée sur le M88.

- ... puis les moteurs civils

Dans le cadre du salon aéronautique associé à la foire internationale de Hanovre en avril 1964, la SNECMA présente le nouveau turboréacteur Mars M45 monoflux et double-corps, d'un taux de compression de l'ordre de 16.

Sur la base des compresseurs expérimentaux TS7 et TS8 déjà mentionnés, la SNECMA a développé une famille de machines à hautes performances. Quatre nouveaux étages ont été réalisés et six combinaisons des sept étages disponibles ont été mises en essais entre 1961 et 1967, couvrant ainsi toutes les applications simple-flux ou double-flux, simple-corps ou double-corps. Pour en fixer la valeur technique, disons que la configuration TS13 à six étages a les performances du 9K qui en comporte neuf, avec des réductions de 12% du diamètre et de 23% de la longueur du compresseur. Bien entendu, ces machines constituent les assises des projets de moteurs Mars M45. Voir le tableau 2, p117.

SNECMA et BSEL (*Bristol Siddeley Engines Ltd*) signent un accord en octobre 1964 de coopération sur la famille M 45 couvrant la gamme des poussées de 2000 et 6000 Kgp, sous maîtrise d'œuvre française décidée le 28 février 1965. Le corps basse-pression et les réchauffes sont réalisés par la SNECMA.

L'avion ECAT (avion d'école de combat et d'appui tactique) propulsé par le M 45 ne sera pas choisi et l'appareil à géométrie variable franco-britannique sera abandonné en 1967. Les deux partenaires tenteront de sauver cette entreprise en mettant au point la version civile M45H à grand taux de dilution pour la propulsion de l'avion allemand de 40 places VFW 614 qui malheureusement n'aura qu'une diffusion très limitée.

Le corps basse-pression réalisé par la SNECMA comporte une soufflante mono-étage et cinq étages intermédiaires. Le taux de dilution est de 2,85 et, en flux secondaire, la soufflante produit un rapport de pression égal à 1,55 très important pour l'époque. Sa conception fait l'objet d'une attention toute particulière en ce qui concerne l'émission sonore, notamment par l'espacement et par un choix convenable des nombres d'aubes des grilles fixe et mobile. La famille CFM56 sera fondée sur les principes validés par le M45H.

3.2 - La combustion : Une tradition SNECMA

Une chance pour l'ATAR

La chambre de combustion est sans doute le composant qui a évolué de la manière la plus spectaculaire. En effet, le premier moteur Whittle mis en essais en 1937 avait une grosse chambre de combustion unique reliée à l'alimentation annulaire de la turbine par une volute. Ensuite, le Whittle W1 fut doté de plusieurs tubes à flamme à écoulement direct puis la chambre fut à nouveau modifiée pour passer à une disposition à écoulement inversé sur le W2.

Contrairement à tous les moteurs britanniques et américains d'après-guerre qui étaient équipés de chambres de combustion à tubes séparés ou connectés, l'ATAR a été doté dès son origine d'une chambre de combustion annulaire. Ses avantages tiennent au gain de poids résultant de la réduction de l'encombrement, à la diminution de la surface développée et l'absence de tubes d'interconnexion, ainsi

qu'à la perspective d'obtenir des répartitions de températures plus homogènes à la sortie de la chambre et de réduire les pertes de charge.

La chambre annulaire est l'un des atouts fondamentaux de l'ATAR, lui permettant d'entrer de plein-pied dans la continuité d'une famille de moteurs. Elle sera une constante de tous les moteurs SNECMA (figure 39).

Un développement empirique

Le foyer doit satisfaire un très grand nombre de qualités. Les performances sont évidentes : très bon rendement et faibles pertes de charge. Elle doit également être légère, courte et d'une très bonne tenue mécanique. Plus délicates sont la facilité d'allumage et surtout la sûreté du réallumage en vol, essentielle pour la sécurité. Enfin, difficile est l'obtention de répartitions de températures à la sortie, tant radiales que circonférentielles, garantissant l'intégrité et la durée de vie des turbines qui suivent.

Les moyens de mesure de l'époque ne permettaient pas d'observer en temps réel les phénomènes internes dans ces zones les plus chaudes. Aussi la mise au point était-elle conduite pas à pas par voie expérimentale. La chambre est soumise à un essai sur moteur complet, puis démontée en atelier ainsi que la turbine ; ensuite elle est observée visuellement et soumise à des épreuves mécaniques. La grande expérience des ingénieurs spécialisés les guide dans les modifications à apporter aux réglages des débits de carburant, à la position et la forme des entrées d'air de dilution dans les mélangeurs, à la technologie des injecteurs avec adjonction de deux préchambres.

La mise au point du foyer s'est déroulée ainsi pour toutes les versions, essentiellement par des essais menés directement sur le moteur.

Vers plus de science...

Afin de présélectionner les configurations à expérimenter sur moteur, les essais de secteurs puis de chambres complètes sont accrus à la SNECMA, à l'ONERA et au CEPr, avec une simulation plus ou moins poussée des conditions à l'entrée. La saisie des phénomènes physico-chimiques à l'intérieur du foyer devient ainsi de plus en plus fine. Mais, il faut aller encore plus loin.

En 1964, L. Bauger est nommé Ingénieur en chef « Projets » avec autorité sur les « Avant-projets de machines » et sur le département « Combustion » dirigé par A. Quillevéré, Ingénieur en chef adjoint. Sa démarche s'appuie sur :

- une approche plus physique des phénomènes turbulents omniprésents dans la combustion, par l'application de la thermodynamique statistique développée par I. Prigogine et ses émules,
- une recherche en laboratoire conduite en coopération avec E. Esposito, chercheur à l'École centrale de Paris.
- les premières modélisations des écoulements dans les foyers pour optimiser le couplage entre temps de séjour et cinétique chimique.

...pour une nouvelle génération de foyers...

Il en résulte de nouveaux principes de conception des chambres de combustion fondés principalement sur :

Trois générations de chambres de combustion

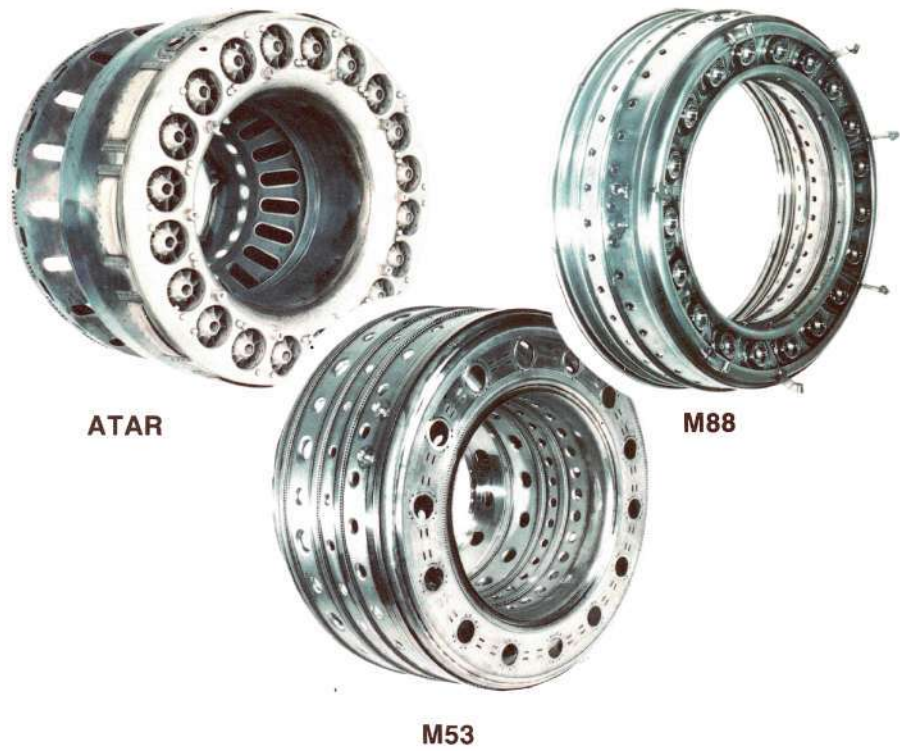


Fig. 39

SNECMA

Trois générations de systèmes d'injection

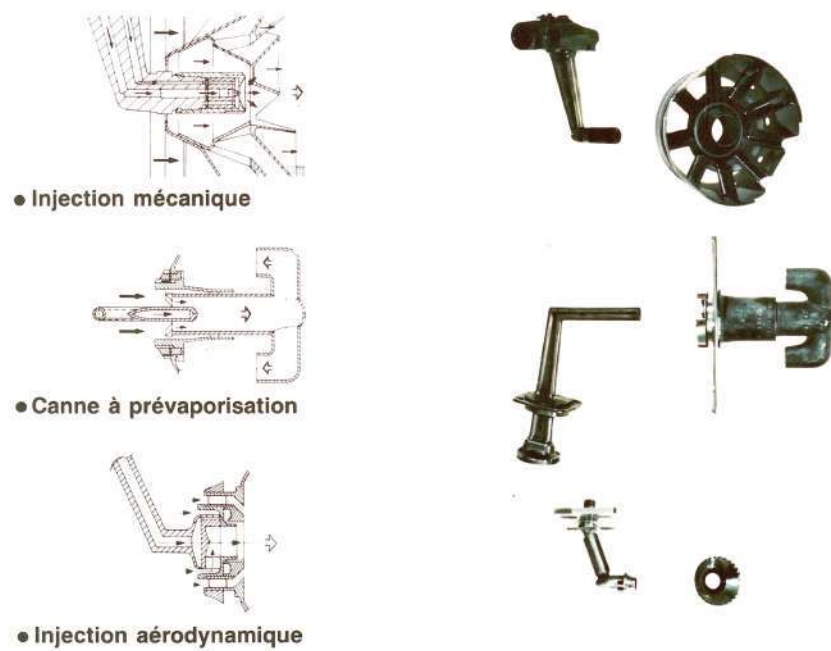
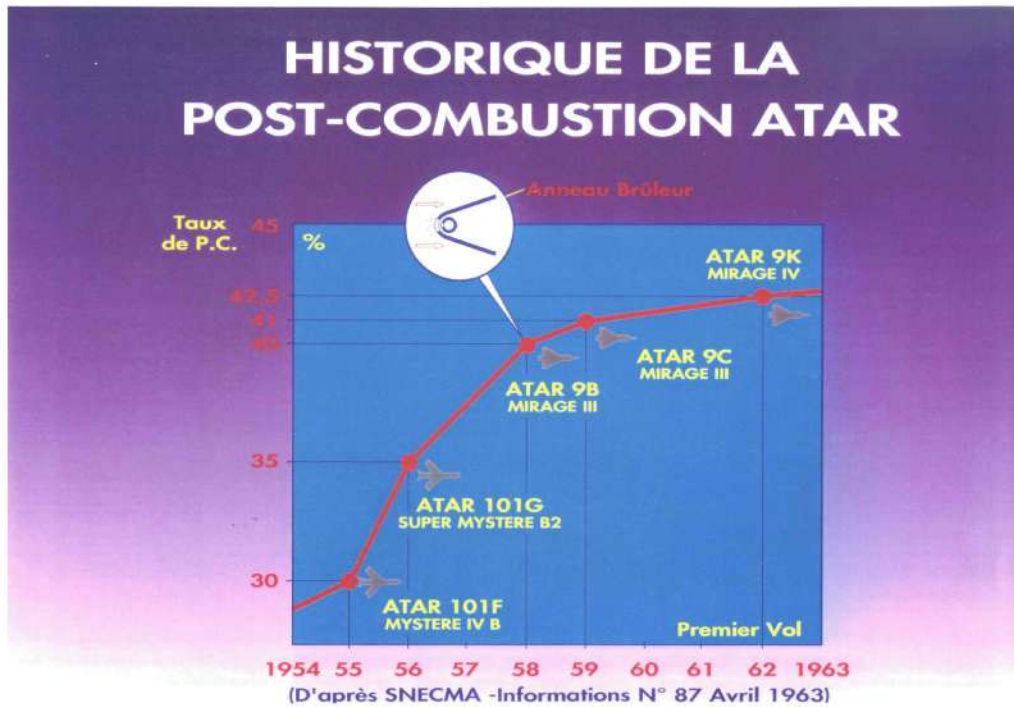


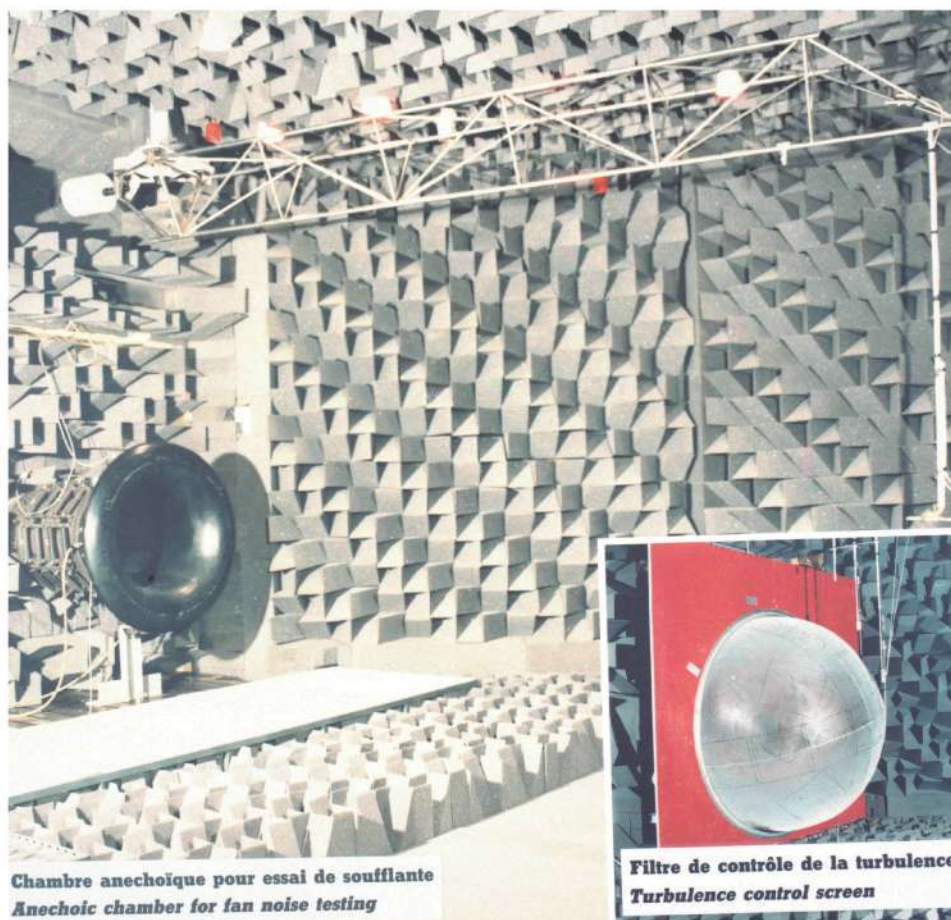
Fig. 40

SNECMA



SNECMA

Fig. 41



SNECMA

Fig. 42
chambre anéchoïque SNECMA pour essai de soufflante

- une nouvelle génération du système d'injection. En effet l'injection mécanique des moteurs ATAR nécessite une alimentation à deux débits et à haute pression. Elle a un bon comportement lors du fonctionnement à pleine puissance, mais présente des risques de cokéfaction et encrassement survenant à régime partiel. Le nouveau système comporte une prévaporisation et injection à contre-courant dans une canne pour préparer le mélange air-carburant en amont de la combustion proprement dite (figure 40),
- une introduction d'air secondaire par des films pariétaux organisés dans les parois de la chambre, assurant à la fois le contrôle des cartes de températures et le refroidissement des parois. L'amélioration de la durée de vie du foyer et de la turbine autorise l'augmentation des températures maximales du cycle.

...à applications immédiates

J. Caruel puis G. Bayle-Labouré viennent renforcer l'équipe de A. Quillévéré qui applique les technologies ci-dessus aux nouveaux moteurs Larzac et M53. Ces turboréacteurs sont toujours en opérations aujourd'hui.

La certitude de tenir une technologie de pointe s'est affirmée à l'occasion de la remise en cause de la chambre de l'Olympus 593 : celle-ci était du type cannulaire à huit tubes à flamme qui devenait une formule démodée. Ainsi, dès 1967, la SNECMA propose de préparer le remplacement par une chambre annulaire. Les deux constructeurs mobilisent leurs compétences et, après des essais comparatifs, c'est la solution proposée par la SNECMA qui est choisie en 1969 et intégrée dans la définition sous la responsabilité de Rolls-Royce (Bristol). Le système d'injection est du type cannes à prévaporisation et l'ensemble supprime les émissions de fumées visibles. L'amélioration des performances, traduite en charge marchande de Concorde, est équivalente à six passagers.

La perspective d'une forte augmentation du taux de compression pour les moteurs civils conduira à une troisième génération de brûleurs à injection aérodynamique donnant une bonne pulvérisation à tous les régimes (figure 40)

3.3 - La post-combustion ou réchauffe.

La technologie SNECMA...

L'expérimentation en vol d'un moteur ATAR 101D avec un canal de post-combustion a débuté en 1955. Cette version 101F fournissait une poussée augmentée de 30% et fut avionnée sur Mystère IV B à titre de démonstration, l'application en série intervenant réellement avec le 101G des Super-Mystère B2.

La post-combustion SNECMA a toujours eu une caractéristique d'avant-garde particulièrement appréciée des pilotes : la seule manette des gaz permet de contrôler de façon continue la poussée du moteur avec la même progressivité que pour le moteur sec, contrairement aux moteurs concurrents de l'époque. L'ATAR ayant eu dès ses origines une tuyère continûment variable commandée par le régulateur principal, le mariage étant aisé avec un régulateur de post-combustion contrôlant le débit de carburant en fonction des mêmes paramètres. La grande compétence de la SNECMA et la pertinence des solutions choisies pour le système de régulation de l'ATAR ont grandement facilité la mise au point de la post-combustion.

Alors que le 101G a un système classique d'injecteurs radiaux en amont des stabilisateurs, une évolution technologique déterminante intervient en 1958 avec l'introduction des anneaux-brûleurs comportant une rampe d'injection crachant vers

l'amont, placée à l'intérieur de l'accroche-flamme en forme de V selon des brevets SNECMA (figure 41).

Ce dispositif installé sur l'ATAR 9 porte le taux de post-combustion à 40% pour le 9B, puis 42,5% pour le 9K.

...son application au double flux supersonique...

La SNECMA a également mis au point un système d'allumage entièrement automatique réalisé par un injecteur situé dans la chambre de combustion et dont la flamme traverse la turbine pour atteindre les anneaux-brûleurs alimentés au ralenti. Une sonde à ionisation intervient pour couper l'allumeur dès qu'elle est stimulée par la flamme de la post-combustion.

Dès la fin des années 1950, les projets de moteurs double-flux s'affirment pour la motorisation des avions de transport. L'intérêt existe aussi pour les avions de combat dont le rayon d'action serait accru grâce aux gains de consommation de 20 à 30% réalisés en vol subsonique. Reste à trouver une solution pour restituer les poussées nécessaires aux performances supersoniques, sans accroître exagérément la taille du moteur.

La post-combustion reste la réponse la plus élégante, d'autant que l'effet statoréacteur prédominant aux grandes vitesses est accentué par la formule double-flux. Toutefois, le mélange des deux flux qui crée des conditions hétérogènes et l'abaissement de la température des gaz après la turbine sont deux circonstances défavorables pour le rendement de la combustion et la stabilité de la flamme.

La SNECMA attaque ce problème en commençant par rétablir des conditions voisines au mélange des flux réalisées par une chauffe du flux froid extérieur, dite préchauffe. Les essais de cette formule débutent en 1964 sur un Mirage III transformé pour servir de banc volant au TF104 établissant la première mondiale d'un moteur double-flux avec post-combustion, sur un avion supersonique. L'optimisation de l'injection de carburant répartie sur plusieurs anneaux-brûleurs permettra ultérieurement de supprimer la préchauffe sur le TF306.

La SNECMA a acquis une connaissance des moteurs double-flux supersoniques à réchauffe et un savoir-faire dans leur mise au point qui la placent au tout premier plan international au moment du lancement du M53 en 1968.

...et pour Concorde

Parallèlement, la SNECMA a entrepris sans encombre la conception et la mise au point de la réchauffe de l'Olympus 593. D'abord prévue uniquement au décollage et au taux de 9%, son utilisation sera étendue au vol transsonique et le taux maximal porté à 19%, contribuant ainsi de manière très significative aux augmentations de poussée exigées au cours de la mise au point de l'avion.

3.4 - Une discipline nouvelle : L'acoustique

Dès le tout début des années 1960, la SNECMA s'est attachée à réduire le bruit de ses moteurs civils par des travaux motivés d'abord par le programme Concorde, puis par la perspective de normes limitant le bruit au voisinage des aéroports.

Sous l'autorité de G. Richter, des recherches en acoustique sont engagées par R. Hoch dès 1961. Son équipe s'accroît rapidement et s'emploie à réduire le bruit de jet de l'Olympus 593, source principale des émissions sonores de Concorde. Différentes configurations de silencieux (rétractables pour éviter des pertes prohibitives pendant tout le vol) sont mises en essais, tous décevants.

Les motoristes BSEL et SNECMA ont compris que le problème est extrêmement difficile à résoudre et, dès 1967, les sommités scientifiques britanniques et françaises de l'acoustique sont mobilisées pour constituer le *Noise Panel* présidé par le professeur Flowcs Williams de l'*Imperial College* de Londres. Des échanges ont eu lieu également avec *General Electric* (GE) le motoriste pressenti du supersonique américain.

Les travaux permettent de mieux comprendre les phénomènes de génération du bruit des jets, sans pour autant apporter des solutions pour l'atténuer. Les avions d'Air France et British Airways entreront en exploitation commerciale sans silencieux, le bruit étant limité en optimisant les trajectoires au décollage et en approche.

Parallèlement, le département acoustique a construit sa connaissance du bruit de la soufflante, source principale des moteurs subsoniques M45H, puis M56. Sont identifiées les sources génératrices – distorsions de l'alimentation, interaction des sillages, bruit d'ondes de choc – et définis les critères de réduction du bruit à la source – vitesse de rotation, nombre d'aubes fixes et mobiles, espacement rotor-stator, forme des profils,

L'atténuation du bruit de la soufflante est également obtenue par le traitement acoustique des parois de carters sur le principe des résonateurs et des matériaux poreux absorbants.

Les recherches sont validées par de nombreux essais, en utilisant des moyens extrêmement variés et complémentaires. Une chambre anéchoïque pour essais de maquettes de tuyères est installée au CEPr tandis qu'un banc de compresseurs est aménagé en chambre sourde à Villaroche pour caractériser le bruit de soufflante (figure 42). Le banc d'essais à l'air libre de moteurs complets, construit à Istres, est équipé pour relever le champ sonore autour du moteur en cours de fonctionnement. Un peu plus tard, le CEPr se dotera, en collaboration avec l'ONERA, de la soufflerie CEPRA 19 pour étudier les effets du vol sur le bruit de jet tandis que les silencieux seront caractérisés avec un moteur réel sur l'aérotrain Bertin.

R. Hoch a formé un groupe d'ingénieurs acousticiens de renommée internationale travaillant en étroite collaboration avec l'ONERA, la société Bertin, plusieurs laboratoires de recherches et organismes internationaux. Ces efforts ont porté leurs fruits en permettant de mettre sur le marché les moteurs les plus silencieux dans leurs catégories.

3.5 - La fondation des avant-projets et études générales

Jusqu'en 1960, la SNECMA avait pour seul produit l'ATAR dont les perfectionnements étaient étudiés directement par les services spécialisés.

En 1964, J. Devriese entre à la Direction technique comme directeur-adjoint et, afin de faire face aux développements simultanés de plusieurs programmes, renforce l'organisation en créant les Marques Techniques chargées de l'animation par moteur : ATAR 8, ATAR 9K, TSS (Concorde), nouveau moteur militaire pour commencer, puis M45 et Larzac. Le dispositif est complété par la marque « projets » avec autorité sur les avant-projets et études générales.

J. Calmon en est le premier Ingénieur en chef-adjoint avec un groupe chargé de l'étude paramétrique des cycles thermodynamiques de moteurs pour avions de combat, sous contrat du Centre de prospective et d'évaluations, et des ingénieurs projets, deux au départ et jusqu'à neuf avec l'entrée de nouveaux collaborateurs sélectionnés parmi les meilleurs embauchés. Cette démarche s'inscrit dans le cadre d'une politique de recrutement à haut niveau voulue par le Président Jean Blancard.

Chaque ingénieur a en charge :

- une famille de projets parmi M45, M47 (Airbus), M49 (Larzac), combinés turbo-stato, M50 (moteurs à aubages contrarotatifs sans statots), etc.
- l'animation, en liaison directe avec les services d'études correspondants, des recherches et études générales dans un domaine particulier parmi compresseurs, turbines, combustion, régulation, tuyères, construction mécanique, etc. L'ingénieur établit le programme de travail en concertation avec les services de la Délégation ministérielle pour l'Armement (DRME notamment) et avec le concours de l'ONERA et des laboratoires associés.

La recherche est ainsi structurée dans toutes les disciplines et pour tous les modules du moteur, avec des objectifs multiples et à long terme.

Nommé ingénieur en chef Moteurs Airbus fin 1967, J. Calmon est remplacé par P. Alési. S'ouvre la période où se fige la configuration du M53 et se précise la formule M56.

J. Devriese, nommé entre-temps directeur technique, applique une nouvelle réorganisation des Marques en 1972. J.F Chevalier est alors nommé ingénieur en chef « Avant-projets et recherches ».

Conclusion

Sur la période 1950-1970, la SNECMA bâtissait son existence sur le socle exceptionnel constitué par l'ATAR, tout en engageant des démarches extrêmement innovantes pour se donner les compétences nécessaires afin de :

- conduire en propre ses programmes de moteurs militaires ATAR, M53 et plus tard M88 aux performances compétitives avec les meilleurs,
- être un partenaire majeur dans tous les programmes conduits en coopération.

De ce fait, en pleine responsabilité et en bénéficiant de la totale confiance de ses partenaires, la SNECMA a appliqué son savoir-faire :

- aux soufflantes et compresseurs basse-pression du M45 avec BSEL, des CFM56 avec GE,
- aux compresseurs haute-pression du JT9D avec PWA, du RB207 avec Rolls Royce, même si ces programmes ont été interrompus,
- à la réchauffe, aux tuyères et à la rénovation de la chambre de combustion de l'Olympus 593 pour Concorde avec BSEL,
- à la chambre de combustion et aux turbines du Larzac avec Turboméca,
- au compresseur haute-pression et à la chambre du GE 36 (THR) avec GE dans les années 1980, un concept d'avant-garde que les motoristes citent aujourd'hui dans le cadre des économies de carburant à l'horizon 2020.

Tableau 1 : Caractéristiques des compresseurs transsoniques expérimentaux de SNECMA

Désignation de la machine	Caractéristiques de projet		Résultats des essais			Année
	Nombre d'étages	vitesse périph. (m/s)	Débit spécifique	Rendement	Taux de compression pompage	
TS-1	2	356	162	0,84	1,47	1956
TS-2	1	422	163	0,82	1,39	1957
TS-3	1	422	162	0,805	1,51	1957
TS-6	1	362	164	0,83	1,46	1957
TS-7	2	380	162	0,81	2,25	1958
TS-8	3	404	191	0,81	2,85	1959
TS-9	2	367	174	0,89	1,66	1960

Tableau 2 : Compresseurs multi-étages à hautes performances de SNECMA

Début des essais	Etages							Taux Compression	Débit spécifique	Utilisation
	1	2	3	4	5	6	7			
1961		x	x	x	x	x		4,7	162	Compr.B.P.
1962	x	x	x	x	x			4,5	191	Compr.B.P.
1963	x	x	x	x	x	x		6,4	191	Monocorps
1965	x	x	x	x				3,3	191	Compr.B.P.
1966			x	x	x	x	x	4,4	129	Compr.H.P.
1967	x	x	x	x	x	x	x	8	191	Monocorps

CHAPITRE 3

MISSILES TACTIQUES¹⁰²

Lors des années 1970 et du début des années 1980 la création d'un organisme unique, le Service technique des engins tactiques (STET) a pu fédérer les travaux d'études générales et contribuer ainsi à l'apparition d'une nouvelle génération de missiles. Au cours de cette période et de celle qui suivit immédiatement, la situation économique des industriels missiliers, particulièrement favorable, assura un soutien notable par autofinancement des travaux initiés par les services officiels. Ainsi, la focalisation de l'effort sur des opérations définies et importantes et la mobilisation de moyens financiers notables assurèrent des progrès décisifs.

La décision de créer le STET fut prise en octobre 1970, elle concernait le rattachement à la DTEN d'un certain nombre de programmes de missiles tactiques en cours de développement ou de production (quelques programmes demeuraient cependant dans les Directions d'origine). Elle confiait à ce nouvel organisme les études de préparation de l'avenir : études générales et développements exploratoires.

L'organigramme du STET comprenait un groupe spécialisé pour la préparation de l'avenir : All pour « Avenir-industrie-international » dont le fonctionnement devint effectif en 1972. Cette structure devait permettre une meilleure harmonisation des budgets d'études générales financés par les trois états-majors qui se trouvaient désormais gérés par le même service et surtout donnait la capacité de mobiliser des financements importants pour des développements exploratoires à vocation interarmes sur un budget commun géré par la DPAI. De plus, les missions « Industrie et International » qui entraient également dans le champ des responsabilités de All, ont assuré une orientation des études selon des axes bien définis de politique industrielle et prenant en considération les perspectives de coopération internationale. C'est sur ces bases qu'ont pu être lancés des développements nouveaux pour les principaux sous-ensembles de missiles tactiques, sous-ensembles qui se sont trouvés être les constituants majeurs d'une nouvelle génération de missiles.

Rappelons quelques-unes des opérations qui ont alors été lancées.

1 - LES STATOREACTEURS

La genèse de cette opération repose sur la compétence de l'ONERA en la matière, héritière d'une expérience qui remonte aux travaux conduits au LRBA dans les décennies précédentes. Il s'agissait de réaliser un type de propulsion plus

¹⁰² Par Bernard Laurent. On rappelle l'ouvrage COMAERO très complet sur les programmes de missiles tactiques (2004) de René Carpentier.

efficace que la propulsion à poudre classique par le recours à un mode aérobique, avec une même facilité d'emploi en utilisant un combustible solide auto-pyrolisé, et de permettre de loger dans la pointe avant un autodirecteur de section suffisante par le choix d'entrées d'air latérales, à la différence du missile « Sea-Dart » britannique.

Les possibilités d'application de ce concept concernaient aussi bien les missiles sol-air que les missiles air-sol ou air-mer. En particulier, l'EMAA était intéressé à accroître la portée des bombes guidées par un dispositif de propulsion simple. Un développement exploratoire interarmes fut donc accepté en 1973 sous la désignation de statofusée probatoire. Sur le modèle de l'opération ELECTRE, l'ONERA en prit la maîtrise d'œuvre et s'engagea, dans un cadre forfaitaire, à obtenir deux tirs réussis à partir de la réalisation de quatre modèles de tir.

Il est apparu très vite à tous les acteurs l'intérêt de donner une assise industrielle solide à cette opération et le STET pu ainsi favoriser le rapprochement ONERA-SNIAS. Ces deux organismes opérant ensemble obtinrent le succès complet de deux tirs réussis dès les deux premiers essais.

Le mouvement était lancé, outre les connaissances techniques de base, il était créé un accompagnement d'essais : banc stato, adaptations de souffleries...et surtout la confiance des décideurs à partir de laquelle purent être lancés les développements de programmes comme l'ASMP, l'ANS... dont la saga des statos rédigée par l'ONERA donne, par ailleurs, un descriptif détaillé¹⁰³.

On retiendra combien la synergie des efforts scientifiques de l'ONERA et des compétences techniques et industrielles de la SNIAS a été ici productive. On notera que le STET a veillé, tout en faisant un choix industriel indispensable, à ne pas créer une compétence exclusive, aussi la société MATRA a-t-elle été associée de manière telle qu'elle a pu mener également, avec ce type de propulsion, des travaux pour des applications sol-air ou air-air.

2 - LES THEMES DE PROPULSION

On portera encore au crédit des développements exploratoires interarmes, la réalisation du moteur TRI-60 de Microturbo. Ce turboréacteur subsonique, simplifié et de coût aussi réduit que possible, prenait son concept dans une utilisation de temps de vol réduit (éventuellement limitée à un tir) sur des missiles de croisière ou des missiles antinavires de longue portée du type OTOMAT. Le STET obtint le financement nécessaire au lancement d'un développement exploratoire dont les résultats devaient être utilisés pour la propulsion du missile de croisière APACHE de MATRA et confia naturellement la conduite de ce programme au service spécialisé dans les turbomachines de la DTCA.

Ici encore, le développement exploratoire se transforma rapidement en un développement direct avec le choix de ce moteur qui s'imposa pour la propulsion de la cible C22 que le STET mis en développement en 1978.

Au crédit des études générales du STET dans cette période, on peut aussi inscrire les travaux fait avec la SNPE pour l'amélioration de la propulsion à poudre des missiles, notamment dans le but d'en accroître les performances propulsives et la vitesse de combustion tout en optimisant la discrétion optique et la transparence nécessaire pour le guidage au travers de la flamme du propulseur.

¹⁰³ Voir chapitre 3 de la partie III.

On peut rappeler encore, les essais de tirs des maquettes sous-marines qui furent effectuées au Bassin d'essais des carènes et qui conduisirent à la définition de la capsule du missile SM-39.

3 - LE GUIDAGE ET LE PILOTAGE

La préparation des nouvelles générations de missiles anti-aériens (air-air et sol-air) a été un axe majeur d'effort des années 1970 et du début des années 1980. Les concepts de ces nouveaux systèmes (SAMP, SATCP, MICA) nécessitaient le développement de technologies avancées.

Il a été possible de mobiliser les compétences de Thomson-CSF et d'EMD pour des développements exploratoires sur les autodirecteurs actifs pulse doppler qui conduisirent à des essais aéroportés au début des années 1980 donnant les bases des autodirecteurs des missiles MICA et ASTER.

Parallèlement, les travaux d'études générales assurèrent la préparation des autodirecteurs infrarouges, de petit diamètre, disposant de plusieurs cellules dans le plan focal et destinés au missile SATCP dont le programme a été lancé en 1980. Ces travaux préfiguraient également les autodirecteurs à imagerie infrarouge pour missile antichar de longue portée.

Le volume de COMAERO consacré aux missiles tactiques récapitule l'ensemble de ces travaux préparatoires ; dans le domaine du guidage-pilotage, on peut encore ajouter le début de développement des centrales inertielles à éléments liés, utilisant des gyromètres à suspension accordée chez SAGEM et SFENA ; ultérieurement les gyromètres laser ont été exploités pour ce type de centrale inertielle. Les développements exploratoires, lancés fin des années 1970, permettaient d'envisager le guidage à mi-course des missiles avant la prise en charge finale par l'autodirecteur (en simplifiant notamment les contraintes sur la liaison arrière du missile vers le lanceur) et l'assistance au pilotage par la suppression des gyromètres d'antenne.

Ces techniques de guidage-pilotage, associées aux travaux d'études générales sur le pilotage à grande incidence et au pilotage en force (PIF-PAF), ouvraient véritablement de nouvelles perspectives pour les générations de missiles anti-aériens à venir en terme de manœuvrabilité, de portée, de détection et de poursuite de cibles.

Un des axes soutenus était celui du *guidage terminal* des armements air-sol. Une première approche visait à améliorer la précision de la roquette air-sol de 100 mm développée par Thomson-Brandt. L'idée était d'associer un autodirecteur semi-actif laser à un pilotage en force, obtenu par des impulseurs agissant au centre de gravité de la munition. Différentes maquettes des deux composants furent réalisées et des essais furent effectués sur le rail d'accélération de Brandt dans l'établissement de Salbris. Malheureusement, les essais sur le rail étaient particulièrement sévères en matière d'environnement mécanique et les adaptations pour la roquette de 100 ne purent être concrétisées.

Cependant, le STET avait également prévu d'essayer cet autodirecteur laser sur un missile porteur bien stable et sans problème d'encombrement : l'AS30. Un développement exploratoire y était consacré, il se déroula nominale et avant

même d'être achevé, l'état-major de l'armée de l'Air lançait le programme d'AS30 Laser qui en découlait directement.

Sur ce thème du pilotage en force par impulseurs au centre de gravité, le STET avait encouragé le rapprochement de Brandt et de la SNIAS pour favoriser les synergies techniques correspondantes. Au fil des discussions et des évolutions, le concept se transforma mais conduisit directement au pilotage en force PIF-PAF du missile sol/surface-air ASTER qui a été évoqué ci-dessus.

CHAPITRE 4

MATERIAUX ET PROCÉDÉS (CELLULES ET MOTEURS)¹⁰⁴

1 - MATERIAUX

Après une activité en sommeil pendant la période de la deuxième guerre mondiale, et une phase inévitable de redémarrage des sites et d'assimilation des progrès réalisés à l'étranger pendant le conflit, le dynamisme des industriels aéronautiques (cellules et moteurs) et des producteurs de matériaux permet l'essor de l'industrie aéronautique française stimulée par la forte compétitivité outre Atlantique et outre-Manche. Les acteurs de ce renouveau sont assez nombreux en 1945, ils diminueront au cours des années par le jeu des regroupements et fusions principalement. Il nous paraît, aujourd'hui avec le recul, nécessaire de distinguer deux périodes, chacune possédant des caractéristiques propres :

- la période 1945 - 1970.
- la période 1970 - 1990 / 2000.

1.1 - Période 1945 – 1970

1.1.1 Les matériaux et l'industrie amont

Les alliages d'aluminium

On ne peut manquer de rappeler que la France est le promoteur incontestable de cette famille de matériaux, les deux procédés d'élaboration (chimique et électrochimique) étant des inventions françaises (Sainte-Claire Deville en 1854, et Héroult en 1886), la société Pechiney étant en 1859 le premier fournisseur au monde d'aluminium pendant environ trente ans, avant Alcoa et Alusuisse (qui exploiteront également le procédé Héroult).

Dans le domaine des cellules, l'alliage de référence est en 1945 l'AU4G1 (2024) et les nuances de la famille Al/Zn (AZ5GU) font leur première apparition. Des travaux sont alors engagés sous l'impulsion de Pechiney (centre de recherches de Voreppe), des laboratoires industriels (Sud-Aviation et AMD) et du CEAT avec le soutien du STAé Matériaux sur deux axes principaux :

- Les nuances à hautes caractéristiques mécaniques.
- Le développement de capacités de production de pièces épaisses et de grandes dimensions nécessaires aux nouvelles générations d'avions.

¹⁰⁴ Texte coordonné par Michel Brun (ancien de Turboméca), avec la contribution de Daniel Chaumette (ancien de Dassault Aviation), Alain Habrard, Guy Dresel et Robert Brunetaud (anciens de SNECMA), Michel Armbruster (ancien de l'Aérospatiale) Jacques Veaux (ancien de Messier) et Michel Robert (ancien du STAé/MA). Pour les recherches menées par l'ONERA sur les matériaux pour les cellules, voir également le chapitre Avions de la partie III.

Après des essais malheureux dans les années 1950 sur des réalisations en Zicral (AZ5GU/7075), il est décidé de retenir la nuance A7U4SG mise au point par Péchiney qui présente un bon compromis de propriétés y compris dans les parties épaisses. Cet alliage va être largement utilisé sur tous les avions AMD, du Mirage III au Mirage 2000, tandis que l'AU4G1 bénéficie de diverses améliorations. Dans le même temps, des moyens industriels lourds sont mis en place (bancs d'étirage, presses de matriçage...).

Pour la structure du Concorde, destiné à voler de façon prolongée à Mach 2, il est fait le choix de l'AU2GN (d'origine Rolls-Royce) qui est optimisé par traitements thermiques (Péchiney, Sud-Aviation, CEAT, ONERA). Elle est réalisée à partir de tôles épaisses forgées, matricées et usinées sur les premières machines à commande numérique. D'une façon générale, les alliages d'aluminium règnent en maître sur les structures d'avions, utilisés jusqu'à 80% de leur masse.

Dans la fabrication des turboréacteurs militaires, les alliages d'aluminium s'avèrent également indispensables, mais ils sont cantonnés à des pièces annexes, telles que carter support d'accessoires et carter réducteur. Les alliages de magnésium sont utilisés très largement par la SNECMA dans la fabrication des turboréacteurs de la famille des ATAR et par Turboméca sur certains carters.

Les matériaux composites organiques

Ils font leur apparition dans les années 1960 avec l'avènement de nouvelles fibres de verre à hautes performances, sous l'impulsion de Sud-Aviation (Georges Sertour) pour les applications cellules, de Nord-Aviation pour les applications missiles et de la SEP pour les applications propulseurs. Ces nouveaux matériaux constituent alors un immense espoir pour les structures d'avions et de missiles (enveloppe bobinée en fibre de verre-résine du propulseur Rita pour le deuxième étage du MSBS en 1964), et d'hélicoptères (pale en verre résine sur Gazelle dès 1971).

Les fournisseurs sont alors issus de l'activité lyonnaise dans le domaine textile : ils formulent des résines, des fibres, des tissus, et réalisent des pré-imprégnés. Pierre Genin, fondateur en 1933 de la société Pierre Genin et Cie, fournit les premiers tissus pré-imprégnés pour diverses pièces du Vautour. Il est racheté en 1968 par Stevens (qui entre en 1985 dans le groupe américain Hexcel). De même, la société Jean Brochier et fils (1960) se positionne sur ce créneau porteur et sera intégrée en 1980 à Ciba Geigy qui entre en 1996 dans le groupe Hexcel.

La fibre de bore, première fibre à hautes caractéristiques de qualité industrielle, suscite des applications en vraie grandeur à la fin des années 1960. Des essais technologiques ne sont effectués qu'au début des années 1970 : caisson acoustique, trappe du SN600, panneaux divers de la SNIAS, empennage du Mirage F1 chez AMD.

Les alliages de titane

Le titane apparaît après la Deuxième Guerre mondiale ; le procédé d'élaboration d'éponge de titane par Kroll n'est mis au point qu'en 1944. La branche aciers de la société Ugine se lance en 1948 mais doit rapidement abandonner (1960), face à la concurrence japonaise. Mais le procédé d'élaboration des lingots de titane nécessite la mise en œuvre de technologies nouvelles (four sous vide à électrode consommable). Ugine ne devient opérationnel sur cette filière qu'en 1964.

La conception de nouvelles nuances d'alliages à performances améliorées apparaît rapidement délicate et la compréhension des mécanismes de durcissement complexe. Ainsi, seuls le TA5E et le TA6V constituent jusque vers 1970 les nuances de base utilisées dans l'aéronautique.

La société Ugine Aciers possède de 1953 à 1979, dans son centre de recherches métallurgiques d'Ugine, dirigé par Roland Tricot, une petite activité de recherche et développement sur ces familles de matériaux, pilotée par Léon Séraphin. Les problèmes de maîtrise de la qualité de l'élaboration et du forgeage de ces derniers restent la préoccupation essentielle des industriels en raison de la forte réactivité du titane.

Les alliages de nickel

Le développement des alliages à base nickel (famille Ni /Cr) doit un tribut non négligeable aux travaux de Pierre Chevenard sur le fluage (1922) et sur les mécanismes de durcissement liés aux additions de titane et aluminium (1929) en association avec la société Commentry. D'ailleurs les études sur la compréhension des phénomènes de fluage accompagnent en permanence celles sur les nuances de nickel.

Ainsi apparaissent progressivement les alliages Nimonic 75, Nimonic 80 et 90, et Inco 901 des sociétés Inco (États-Unis) et Wiggin (Royaume-Uni), l'Udimet 700 et 500 de la Société Udimet (États-Unis) devenue *Special Metals*, et ATVS7 de la Société Imphy (États-Unis).

Il est important de comprendre que ces compositions à teneur croissante en éléments d'addition fortement réactifs, ne peuvent voir le jour que grâce à une révolution corrélative des technologies d'élaboration initiée par *Special Metals* en 1960 : élaboration au four à induction sous vide, suivie d'une refusion sous vide à l'électrode consommable.

Dans le même temps, l'évolution des compositions réduit progressivement l'intervalle de forgeage et à la fin des années 1960 commencent à apparaître une butée dans la température maximale d'emploi de ces nuances avec l'Inco 901, l'Udimet 700 et Nimonic 90.

Des alliages sont également développés pour les applications disque de compresseur : A 286 et Inco 901. L'Inco 718 (1968) et le Waspalloy de Wiggin (1970) vont jouer un rôle considérable dans l'industrie des moteurs pour de longues années.

En France, la Société métallurgique d'Imphy (rattachée en 1954 à la SFAC, Société des forges de l'atelier du Creusot, qui se regroupe en 1970 avec la CAFL, Compagnie des ateliers et forges de la Loire pour former Creusot-Loire), et l'entreprise familiale Aubert et Duval, qui se lance dès 1960 dans l'élaboration, la refusion et la transformation des aciers et des superalliages, sont les principaux fournisseurs de ces matériaux.

1.1.2 L'industrie métallurgique aval

A la fin des années 1960, la France dispose d'un ensemble assez complet et diversifié de compétences et de moyens industriels. Nous citerons :

Forgeage : Forges de 20 000 t à Pamiers (1939, Creusot-Loire) et à Issoire (1964, Pechiney-Forgeal), presses d'Aubert et Duval (1926, les Aciéries des Ancizes), de la Société métallurgique d'Imphy, de SNECMA (usine de Gennevilliers avec un marteau-pilon de 80 000 kg, le plus puissant en Europe) et des Forges de Bologne.

Laminage : Société Commentry (aciers, alliages de Nickel et de Cobalt), SNECMA, avec un laminoir circulaire pour la fabrication de couronnes (jusqu'à 4 m de diamètre)

Fonderie :

- sable aluminium : Montupet, Messier (Arudy), SNECMA.
- sable magnésium : Le Magnésium Industriel (LMI), SNECMA.
- titane : Messier (Arudy) selon un procédé graphite original.
- cire perdue : Microfusion (tous alliages sauf titane), SNECMA (Gennevilliers), CIRAL (aluminium).

La SNECMA possède pour ses besoins internes une fonderie sable pour les alliages légers (Al et Mg), et une fonderie à la cire perdue, capable de la coulée sous vide. Mais avant 1960, la France ne dispose d'aucune unité d'élaboration de superalliages par refusion sous vide.

1.1.3 Rôle des constructeurs aéronautiques

Les industriels de l'aéronautique comme Sud-Aviation (1957) et SNECMA (1946) possèdent chacun un laboratoire central et effectuent des travaux de caractérisation et de développement en liaison avec l'industrie amont. Ils collaborent avec l'ONERA mais ne cherchent pas à utiliser les laboratoires de recherches des universités et du CNRS qui sont d'ailleurs peu intéressés à travailler avec les industriels et qui présentent une allergie marquée aux programmes militaires.

Le Laboratoire central de Sud-Aviation issu du Laboratoire central de la SNCASO à Courbevoie est développé par René Lachenaud (1957) puis à son décès (1967) par Georges Sertour¹⁰⁵, qui dirigera le laboratoire central de l'Aérospatiale de 1970 à 1978.

Les Avions Marcel Dassault ainsi que Turboméca, dans le cadre de leurs bureaux d'études, coopèrent également mais plus modestement avec les fournisseurs de matériaux, en orientant leurs travaux et en offrant la possibilité d'essais de pièces à l'échelle industrielle.

La liaison entre les fournisseurs de matériaux et les constructeurs reste forte, épaulée et soutenue par les services officiels, STAé/STPA/MA surtout, et avec le concours du CEAT et de l'ONERA.

Conclusion

A la veille des années 1970, la situation est la suivante :

- Les technologies d'élaboration et de transformation sont en place, même si des progrès doivent être faits sur les procédés pour affronter de nouvelles compositions d'alliages.
- Les compositions des alliages de titane évoluent peu mais l'activité de recherche de l'industrie amont est en pleine mutation et les projets d'applications notamment en pièces de structure sont nombreux.
- Les alliages base nickel, tant pour les applications « disque » que pour les applications « aube », semblent avoir atteint une limite.
- Les compositions et les domaines d'applications des aciers varient peu. En particulier les aciers au nickel-chrome-molybdène sont utilisés depuis le milieu des années 1950 pour les atterrisseurs.

¹⁰⁵ L'IC Georges Sertour (1922-99) avait été auparavant chef de la section matériaux du STAé. A l'époque, il n'était pas rare de voir des ingénieurs de l'Air passer dans l'industrie aérospatiale et y rester. G. Sertour est une figure historique de la technologie des matériaux. Il a terminé (1978-84) directeur du contrôle et de la qualité à l'Aérospatiale.

- Au plan de la connaissance, si les mécanismes d'endommagement par fluage et par fatigue conventionnelle sont mieux connus, ceux relatifs à la dégradation des disques en sollicitation cyclique lente commencent à peine à faire l'objet d'études de base (Manson-Coffin).
- Les industries amont et aval en France sont présentes pratiquement dans tous les domaines et disposent d'un potentiel élevé très concurrentiel.

1.2 - Période 1970 – 1990/2000.

La période 1970 – 1990 apparaît, avec le recul, comme extrêmement dynamique tant au plan de l'évolution de la connaissance que sur celui du développement technologique industriel. Les paramètres qui nous semblent jouer un rôle déterminant sont les suivants :

- La multiplicité et la diversité des acteurs industriels.
- La mobilisation des Industriels vis à vis de la recherche et développement, considérée comme un moteur essentiel de la croissance.
- La relative facilité d'introduction de solutions nouvelles sur le marché en raison de procédures de qualification non encore rigidifiées. Cette remarque ne s'applique cependant pas à la certification des matériaux composites pour cellules, ce changement majeur de matériaux de structures d'avions ayant été accompagné dès le début par des essais lourds
- La croissance du marché aéronautique.

L'introduction de matériaux nouveaux, surtout dans les structures avions, est progressivement conditionnée à la valeur calculée du taux d'échange qui correspond au prix que l'on accepte de payer pour gagner un kilo sur la structure. Il s'agit en fait d'un calcul économique complexe faisant intervenir tous les coûts, y compris ceux de développement et d'utilisation. Ce paramètre a, en particulier, influencé le passage de l'aluminium aux composites, voir au titane ou l'acier.

Les développements se concentrent surtout durant l'intervalle 1970-1990 et fournissent l'essentiel des matériaux encore utilisés aujourd'hui. L'internationalisation progressive de la recherche et les concentrations industrielles affectent, dès les années 1990, les compétences nationales.

1.2.1 Les matériaux et l'industrie amont

Les alliages légers

Dans le domaine des cellules, les années 1970 voient l'apparition d'alliages aluminium/zinc très améliorés, grâce à leur faible niveau d'impuretés et à des traitements thermiques évolués (double revenu). Il s'agit des alliages 7475 et 7050, d'origine américaine et du 7010 développé en coopération européenne. Ces nuances deviennent majoritaires pour les pièces épaisses, le 2024 (AU4G1) et ses variantes restant toutefois préférées pour les éléments très chargés en fatigue sur les avions civils (revêtement de fuselage, intrados de voilure).

Dans les années 1980 et pour contrer les composites, les métallurgistes développent des alliages d'aluminium/lithium. Mais les compositions contenant 3% de lithium initialement étudiées se révèlent trop fragiles et doivent être abandonnées. Plus récemment, des alliages à taux de lithium réduit (environ 1,5%) sont mis au point et ouvrent de nouveaux débouchés.

Malgré toutes ces avancées, le secteur industriel amont est irréversiblement marqué par la cession du groupe Péchiney (2003) à Alcan (Canada), précédée en

1997 par la vente de Howmet à Alcoa (États-Unis) et de Cezus à Timet (États-Unis). Un pan majeur de l'industrie française disparaît ainsi.

Dans le domaine des moteurs, les alliages d'aluminium sont réservés aux pièces dites « froides » (carters, pales de compresseur,...). Le développement de la fonderie stimule l'avènement de nouvelles nuances spécifiques : nous citerons l'AU5NKZr et surtout la remarquable famille AS7G qui se révélera à l'usage particulièrement performante.

Les alliages de magnésium marquent le pas en raison de déboires persistants rencontrés en utilisation (tenue à la corrosion), et des risques de feu¹⁰⁶. L'avènement d'une nouvelle famille d'alliages développée par la MEL (*Magnesium electro limited*) très performante en tenue en température et à la corrosion (WE43 par exemple) fait face à une certaine réticence des industriels, mais s'impose peu à peu sur des pièces ciblées (carters de boîtes de transmission et carters réducteurs pour hélicoptère). Par contre, pour la constitution des principaux carters moteurs, la SNECMA les abandonnera, après la famille des moteurs ATAR, en partie au profit des alliages de titane, que l'on sait maintenant mettre en œuvre par fonderie

Les matériaux composites

Les matériaux composites organiques monopolisent véritablement une part très importante de l'activité recherche et développement des constructeurs et des producteurs en raison de leur impact attendu sur les cellules.

Malgré les travaux encourageants réalisés par AMD et SNIAS sur des pièces composites avec fibres de bore (1971-1974), cette fibre est abandonnée pour des raisons de coût et des difficultés de mise en œuvre (la fibre est cassante et difficile à mettre en forme) au profit des fibres de carbone arrivées à la fin des années 1960 (1966). Après une tentative de fabrication nationale par le Carbone Lorraine et le CERCHAR, il est fait appel à des produits d'origine américaine et japonaise dont la fibre TORAY pour laquelle une unité de production est implantée en France (Lacq).

Différentes réalisations probatoires sont réalisées par :

- Aérospatiale : démonstration au sol d'éléments du Concorde (élevons et trappe de train),
- AMD : gouvernes de direction du Mirage III (vol en 1975), accompagnées par des études sur l'effet de l'environnement sur des pièces secondaires, des structures travaillantes d'avions en composite à résine époxy et fibre de carbone (à haut module) sont expérimentées au titre de développements exploratoires lancés dès 1974 : ailerons de Mirage F1 (en série à partir de 1976), élevons et dérive (dessinée et produite par Aérospatiale) de Mirage 2000 (en série depuis 1978). En 1978, les ailerons de Falcon 50 sont le premier cas au niveau mondial de pièce critique en composite carbone certifiée et produite en série.

¹⁰⁶ En fait, le risque de feu concerne plus les copeaux produits au cours de l'usinage que les pièces finies en cours d'utilisation comme l'ont démontré les essais du CEAT sur les roues de Caravelle (voir l'ouvrage de COMAÉRO sur les trains d'atterrissage).

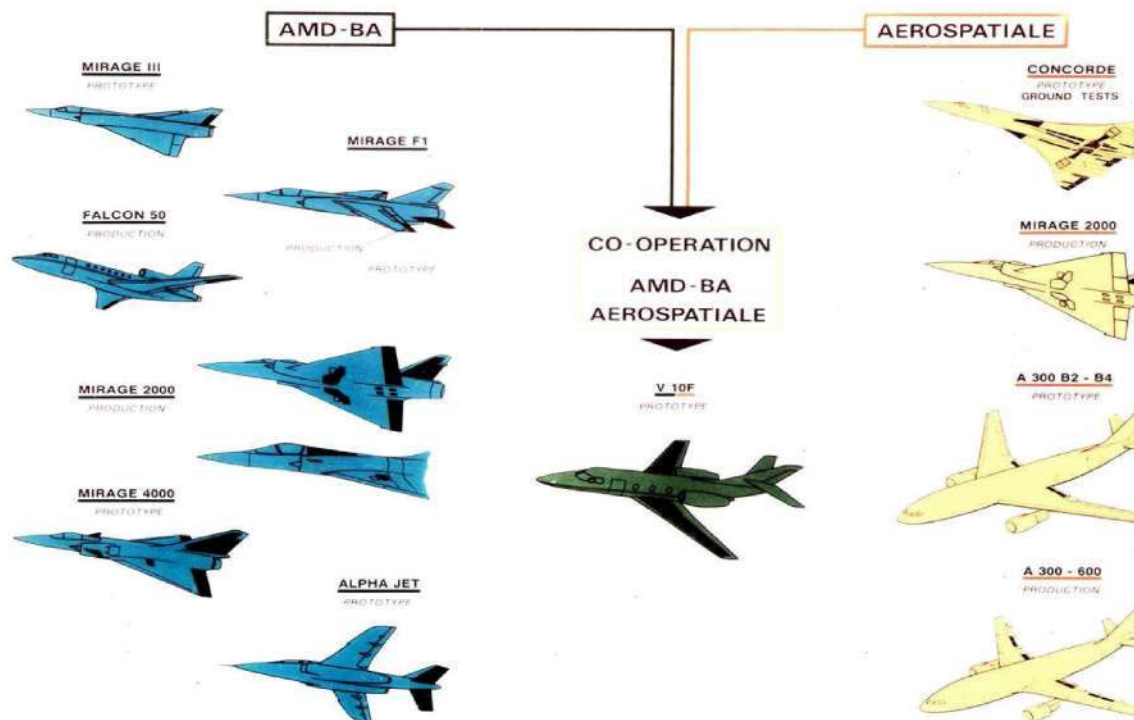


Fig. 43
Genèse du programme V 10 F : réalisations composites Aérospatiale et Dassault Aviation lors du lancement du programme coopératif

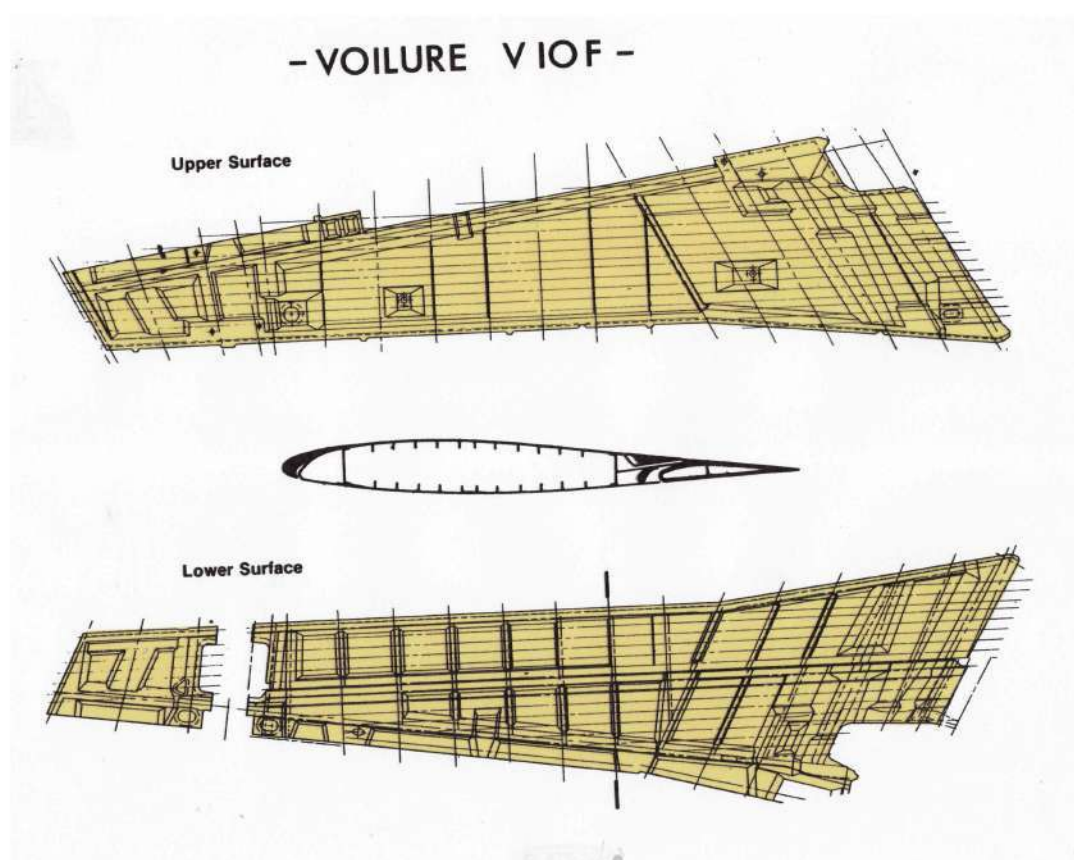


Fig. 44
V 10 F dessin du caisson de voilure en composite

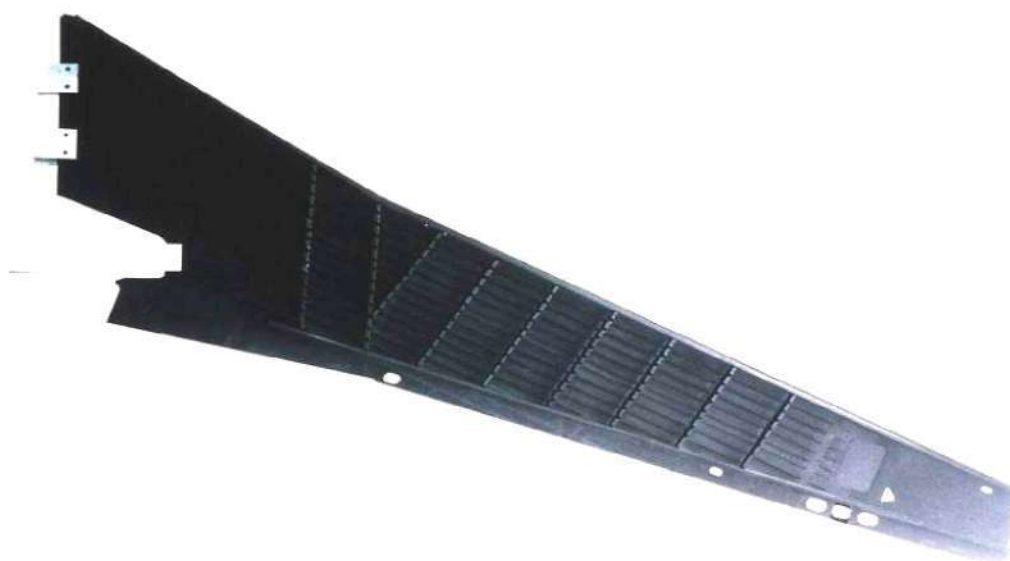
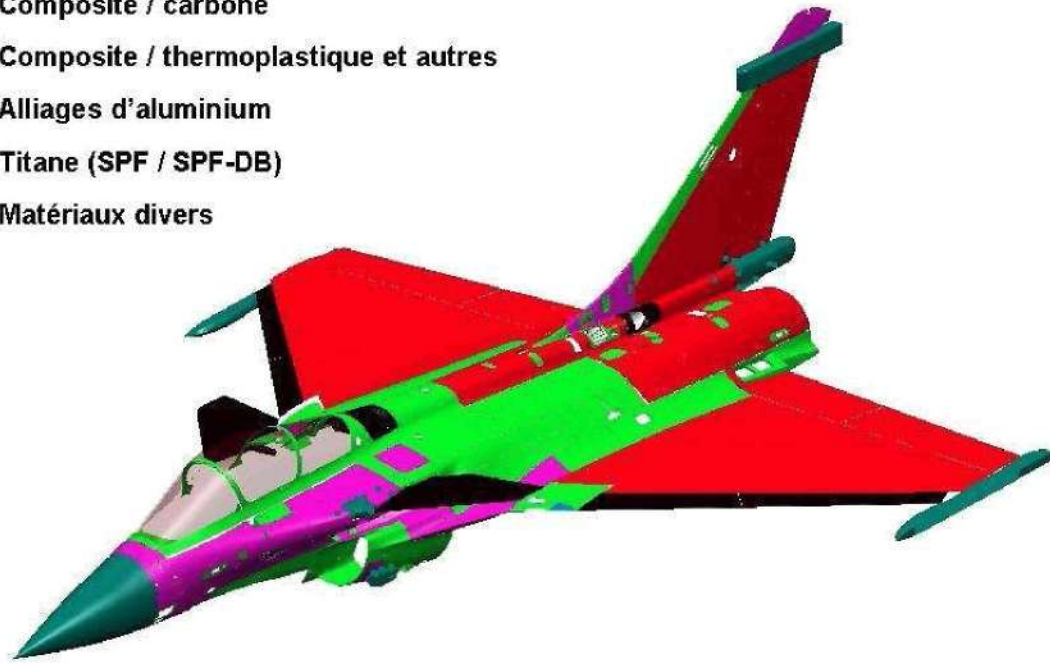


Fig. 45
V 10 F photo du caisson de voilure en composite



Fig. 46
Le Falcon X V 10 F au salon du Bourget

- Composite / carbone
- Composite / thermoplastique et autres
- Alliages d'aluminium
- Titane (SPF / SPF-DB)
- Matériaux divers



- Composite / carbone
- Composite / thermoplastique et autres
- Alliages d'aluminium
- Titane

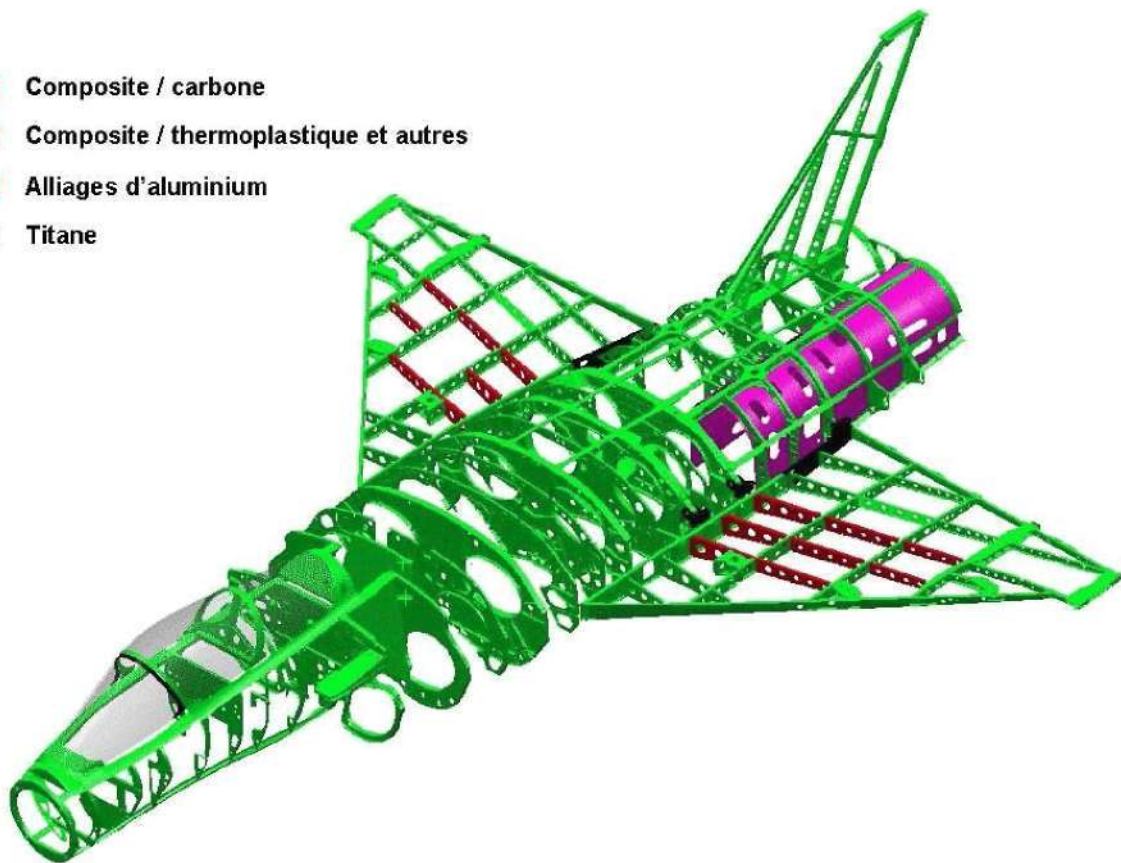


Fig. 47
Répartition des matériaux sur l'avion Rafale (Dassault Aviation)

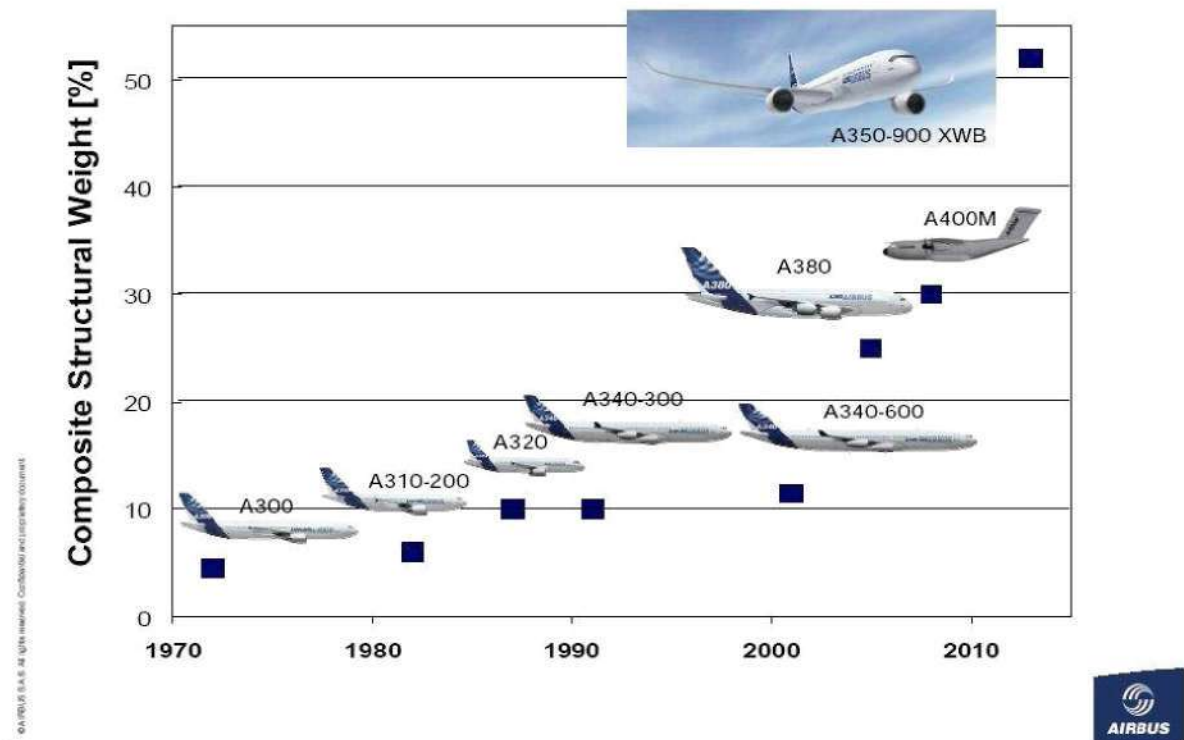


Fig. 48
Évolution de l'application des composites sur les Airbus



Airbus

Fig. 49
Poutre ventrale A340-600 en composites à base de fibres de carbone

Le CEAT, en parallèle, contribue fortement à la qualification de ces nouveaux matériaux grâce à une installation spéciale dédiée aux essais de fatigue et de vieillissement accéléré sur des structures réelles identiques.

En 1979, le vol du prototype Mirage 4000 permet d'expérimenter successivement et avec succès deux conceptions de structure pour la dérive qui est aussi réservoir de carburant. La première dite « multilongérons » qui se retrouve maintenant dans les voilures et dérives du Rafale ; la seconde conception très novatrice, dite « à raidisseurs intégraux » qui servira de base au développement exploratoire du V10F (caisson de voilure de l'avion Dassault Falcon X), et plus tard à la voilure de l'ATR72. L'opération V10F est lancée en mars 1979 dans le cadre d'un DE/DTP (financement commun DGAC/DGA) auprès d'un bureau d'études commun AMD-BA/Aérospatiale (figures 43 à 46). Elle aboutit à un premier vol le 21 mai 1985, une certification en décembre 1985, et une mise en service commercial du Falcon X 10 V10 F, permettant d'acquérir, pendant une quinzaine d'années et plus de 5 000 heures de vol, de l'expérience sur le comportement en opérations d'une telle structure. L'expérience acquise par le STPA lui permet de discuter avec la FAA d'une nouvelle réglementation (*Advisory Circular 20107-A*) sur les composites. C'est à partir de cette coopération industrielle qu'est créé, avec l'aide de l'État, un atelier composite pilote (Aérospatiale et Dassault) destiné à développer les méthodes d'automatisation de la fabrication (drapage, découpe, etc.), ainsi que du contrôle des structures composites ; c'est ainsi que l'ATR 72 devient le premier avion civil à comporter un caisson de voilure extrême en composite, dont le premier vol est de 1988 (cf. figures 15 et 16). Les composites à fibres de carbone (deuxième génération), qui apportent un gain important en résistance et en module par rapport à l'alliage d'aluminium, sont introduits sur le Rafale (25% en masse de structure), voir la figure 47. Les zones d'emploi des composites dans l'avion Airbus se sont développées grâce au DTP CSPC (Caisson de structure primaire en composites) n°2. Des éléments très importants sont réalisés pour les A340-500 et 600 ; il s'agit de la grande poutre ventrale, un élément essentiel de 16 m. de longueur (Figures 48 et 49).

La mise en œuvre de ces nouveaux matériaux nécessite un effort de recherche sans précédent dans l'adaptation des méthodes de calcul, des méthodes de contrôle non destructif (ultrasons et thermographies infrarouges) et des critères de tolérance aux dommages (en particulier tenue aux chocs).

Néanmoins la part des matériaux composites dans les cellules plafonne aux environs de 30% (en attendant les A400 et A350).

Dans le domaine des moteurs, malgré le faible espace d'applications de cette famille de matériaux, différentes pièces sont développées :

- Canal flux froid du moteur Larzac (SNECMA), figure 50
- Canal flux froid du moteur M88 grâce à l'avènement de la nouvelle résine polyimide PMR15 (1970) (composite dit « tiède »).
- Aubes de soufflante (fibre 3D et résine injectée selon le procédé *Resin transfer molding*).

Les composites à matrice métallique (Al, Mg) font leur apparition en forge et en fonderie, le renfort de base étant le SiC (particules ou fibres) sans qu'ils trouvent de véritables applications.

Les composites Ti/SiC font l'objet de travaux importants et prometteurs (SEP, Université de Bordeaux) pendant de longues années sans de véritables succès applicatifs. Mais récemment, selon un procédé original et économique mis au point par SNECMA et le Madylam, des pièces importantes sont en cours de développement (disques et aubes).

Les composites carbone/carbone et les composites céramiques C/SiC sont particulièrement étudiés sous l'égide de la SEP et de l'Université de Bordeaux. Le carbone-carbone SEPCARB¹⁰⁷ mis au point en 1972 par la SEP pour ses tuyères de propulseurs à poudre est utilisé dans les missiles et les disques de freins (avions, trains, voitures de compétition).

Le C/SiC trouvera des applications dans les volets de tuyère du M 88 (figure 50) et dans les chambres de propulseurs liquides.

Les recherches d'applications des composites SiC/SiC de la SEP ont porté dès le début des années 1980 sur diverses pièces moteurs SNECMA et ont été confortées par la maîtrise de l'oxydation interstitielle (principe des matrices auto-cicatrisantes) Nous citerons : système d'accroche-flammes de la post combustion (M 88), volets primaires de tuyère M 88 (figure 50), chambre de combustion annulaire du CFM 56, mélangeurs pour moteurs civils.

Enfin il est à noter que les matériaux *céramiques massifs*, malgré leurs potentialités et les efforts de recherche et développement, ne réussiront jamais leur percée dans les moteurs en raison de leur fragilité rédhibitoire et de leur faible tolérance aux dommages.

Les alliages de titane

Malgré la complexité de ces alliages, la recherche de nouvelles compositions s'intensifie sous la pression des motoristes.

IMI, Imperial Metal Industry (Royaume Uni), se concentre sur les alliages haute température et présente le TA6Zr5D (IMI 685) dans les années 1970, utilisé sur les moteurs Adour et Larzac, puis l'IMI 834 dans les années 1980 ; TMCA, Titanium Metal Corporation of America, apporte sa contribution avec le Ti 6242 (TA6Zr4DE), puis avec le Ti 6246 (TA6D6Zr4E) qui se révélera difficile d'emploi, et enfin le Ti 17 à haute résistance destiné aux étages froids de compresseurs.

En France, la société Cezus, qui est créée en 1971 pour la production d'éponge de Zirconium (à Jarrie, Isère), reprend en 1979 l'activité titane de la société Ugine Aciers et essaie de reprendre la main en développant une nouvelle nuance en coopération avec SNECMA et L'ONERA pour les étages chauds du compresseur du M 88 : le Beta-Cez (TA5Zr4D).

Un groupement scientifique sur les alliages de titane associe en 1987 l'industrie aéronautique (Aérospatiale, SNECMA, Turboméca), CEZUS, l'ONERA et des laboratoires universitaires (Orsay, CNAM, CEMEF, École des mines de Paris) pour, en particulier, mettre au point les traitements thermomécaniques et les gammes de forgeage de ce nouvel alliage. Malgré cet effort, ce dernier ne voit jamais le jour et laisse la place au Ti 17.

Turboméca, très intéressé par les propriétés du Ti 6246 pour ses rouets centrifuges, le remet en scène épaulé par une nouvelle séquence originale de forgeage (forgeage Bêta) développée en coopération avec Airforge.

¹⁰⁷ L'historique du carbone-carbone est décrite par Pierre Béty dans l'ouvrage COMAERO sur les trains d'atterrissage de Jacques Veaux, pages 134 à 139.

En parallèle, des progrès significatifs sur la maîtrise des conditions d'élaboration et de transformation des alliages de titane permettent de régler définitivement les problèmes de défauts métallurgiques. Durant cette période, ces alliages envahissent progressivement le domaine des compresseurs au détriment des aciers.

Dans le domaine des cellules, apparaît le Ti 10-2-3 (Ti-V10Fe2Al3) apprécié pour ses fortes valeurs de $K1C^{108}$, et sa résistance plus élevée que celle du TA6V. Il est utilisé pour des pièces principales d'atterrisseurs du B777 (boggies fabriqués en France à l'usine Messier-Dowty de Bidos).

L'industrie métallurgique française fera aussi les frais de ce décrochage au niveau amont : CEZUS devient en 1995 en raison de ses activités nucléaires, filiale de Framatome ; son activité titane devient en 1997 Timet-Savoie, filiale à 70% du groupe américain Timet et à 30% de Cezus.

Les superalliages.

Ce secteur est marqué par de très fortes évolutions, poussé par l'avènement de technologies nouvelles.

- Alliages pour disques de turbine

Différents facteurs ont milité pour un changement radical de technologie, associé à la nécessaire croissance de la teneur en éléments durcissants :

- La réduction progressive de l'intervalle de forgeabilité.
- La recherche de grains fins pour une bonne tenue en fatigue.
- La chasse aux ségrégations majeures.
- La réduction des coûts de fabrication (pertes matière de 80 à 90% dans la mise au mille).

Une réponse est apportée aux États-Unis par la naissance de la métallurgie des poudres dont les nuances les plus utilisées ont été le René 95 et l'Astroloy. Différents échecs ont conduit à optimiser les séquences de fabrication qui se sont révélées performantes mais coûteuses.

En France, la Société métallurgique d'Imphy, qui devient Imphy SA, met également en place une installation d'atomisation sous Argon et se lance dans l'Astroloy. Puis sous l'impulsion de la SNECMA (Yves Honnorat¹⁰⁹) et avec le concours de l'ONERA et de l'École des mines de Paris, elle engage un programme ambitieux de développement sur une nouvelle nuance d'alliage pour disque (N 18) caractérisée par une très grande résistance aux dommages, qui n'a trouvé aujourd'hui son débouché que sur le M 88 (figure 51).

- Alliages pour aubes de turbine

Les alliages de forge font progressivement place à des alliages de fonderie pour les applications haute température. De 1970 à 1980 apparaît une succession ininterrompue de nouvelles nuances de plus en plus performantes : IN 713, IN 738, IN 939, IN 100, Mar M 200, Mar M 002, Mar M 247, et qui permettent des gains significatifs en terme de température d'entrée turbine (figure 52).

Malgré cette évolution, cette technique ne peut pas être utilisée pour les pièces fortement contraintes en raison des problèmes de coulabilité et de défauts

¹⁰⁸ Facteur critique d'intensité de contrainte, traduit la ténacité en matière de tolérance aux dommages.

¹⁰⁹ Successeur de Robert Brunetaud à la direction du département « matériaux et procédés » de SNECMA.

métallurgiques (porosité, ségrégation, micro-fissures), malgré la généralisation de l'élaboration et de la coulée sous vide.

A la direction scientifique des matériaux de l'ONERA, dirigée (1968-79) par l'IG Maurice El Gammal, l'équipe d'Hervé Bibring, se lance au début des années 1970 dans des solutions très originales avec la famille des eutectiques orientés (COTAC 74 en particulier), qui offre une tenue en température remarquable, mais qui ne peut déboucher industriellement (tenue à la corrosion, fragilité à l'impact, coût de fabrication...). Les progrès faits dans la connaissance des mécanismes de fluage orientent les réflexions vers une nouvelle technologie de solidification des superalliages en plaçant les joints de grain dans le plan de la contrainte de sollicitation : la solidification dirigée (États-Unis) appliquée au MAR M 200, permet un gain de 10°C par rapport aux meilleurs alliages solidifiés de façon conventionnelle (équiaxe).

Ce nouveau gain est vite exploité mais ne peut suffire. C'est alors que filtrent des informations sur des travaux de PWA sur une nouvelle technologie, dite solidification monocristalline, associée à de nouvelles compositions (PWA 1480), l'approche globale étant brevetée.

La SNECMA, appliquant ce concept sur la nuance Mar M 200, et n'ayant constaté aucune amélioration par rapport à la version de solidification dirigée, arrête les travaux sur le concept et travaille sur les pales refroidies.

Turboméca, en 1978, ne pouvant facilement utiliser les techniques de refroidissement interne des pales en raison de leur faible dimension, s'obstine et, malgré le pessimisme ambiant, grâce à ses relations avec la Société Cannon, obtient de celle-ci des échantillons issus de la Nasa (Nasair 100) et d'une nouvelle nuance dérivée conçue par Mr Ken Harris (CMSX2) qui seront transmis à L'ONERA (Tasadduq Khan). Le CMSX2 s'avère tout à fait compétitif au PWA 1480, et est à l'origine des travaux de L'ONERA dirigés par T.Khan¹¹⁰ sur les compositions d'alliages et les traitements thermiques pour monocristaux : AM 1 pour la Snecma, AM 3 et MC 2 pour Turboméca, cette dernière nuance étant la version la plus évoluée. Ces compositions permettront un gain en température d'entrée turbine de 25 à 35° par rapport au MAR M200 DS (figures 53 et 54).

Afin de mieux comprendre les mécanismes de durcissement et d'endommagement de ces nouveaux matériaux (MC 2 surtout), un groupement scientifique est mis en place en 1982, reconduit en 1988, avec le soutien de l'État et des industriels (SNECMA, Turboméca, Imphy, ONERA, CNRS, Écoles des Mines Paris et Nancy)

Snecma utilise l'AM1 sur les aubes du M88, et l'adjonction de techniques de refroidissement interne très élaborées permet d'atteindre des TET de 1580°C.

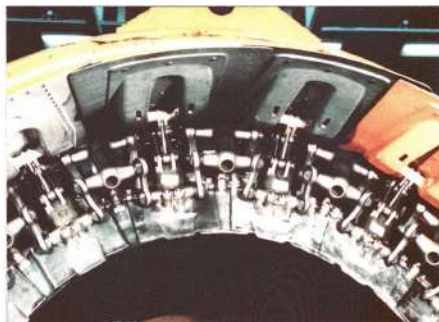
Turboméca effectue des essais moteurs sur le CMSX 2 dès 1983 et équipe progressivement tous ses moteurs de pales mono cristallines (CMSX 2, AM 3, MC 2). Dans les années 1990, une prolongation de cette action est conduite sur de nouvelles nuances qui constitueront très certainement une limite des capacités de cette famille de matériaux (MCNG, monocristaux nouvelle génération).

¹¹⁰ Qui reçoit le prix Science et Défense 1993 pour ses travaux sur les superalliages monocristallins MC2 (application aux moteurs Turboméca) et AM1 (application au moteur M 88).

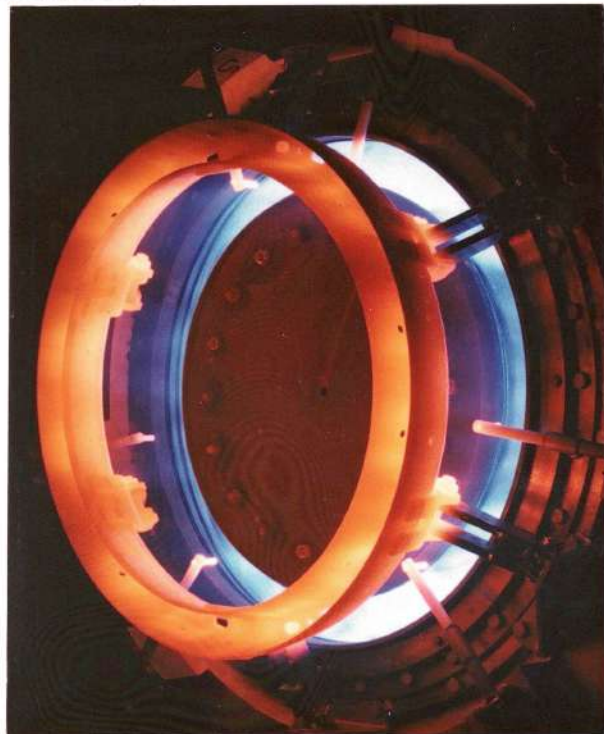
Matériaux composites



Enveloppe extérieure LARZAC



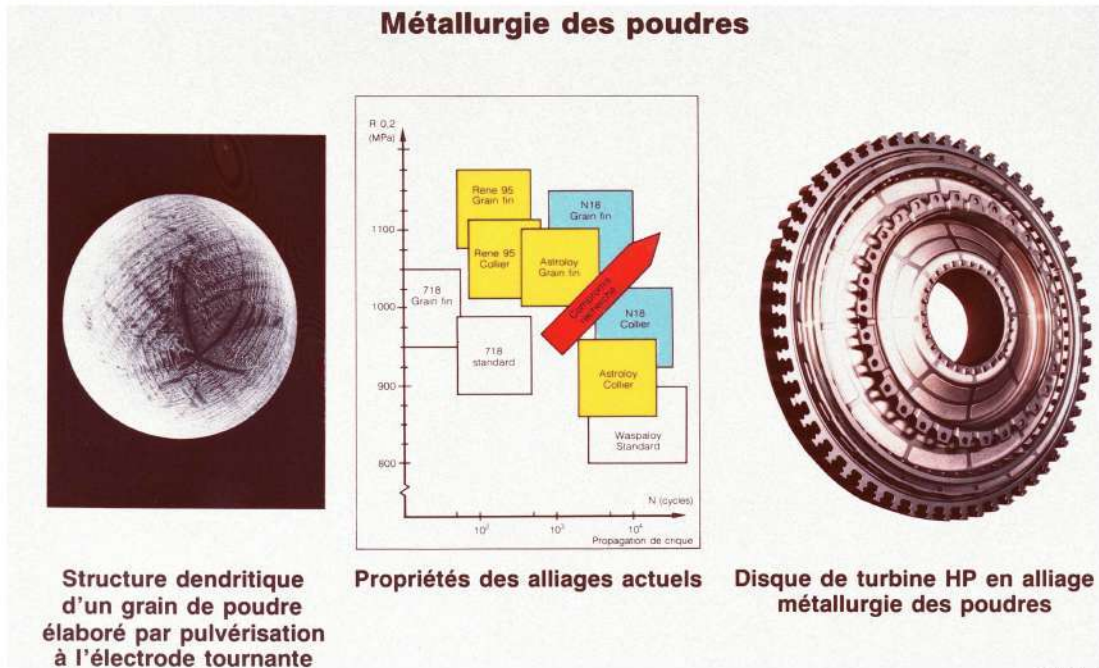
Volets de tuyère M88



Essais en fatigue thermique d'un accroche-flamme en céramique/céramique

Fig. 50

Matériaux composites dans les moteurs : canal flux froid du moteur Larzac, volets de tuyère M88 et accroche flamme SNECMA



SNECMA

Fig. 51
Métallurgie des poudres et alliage N18

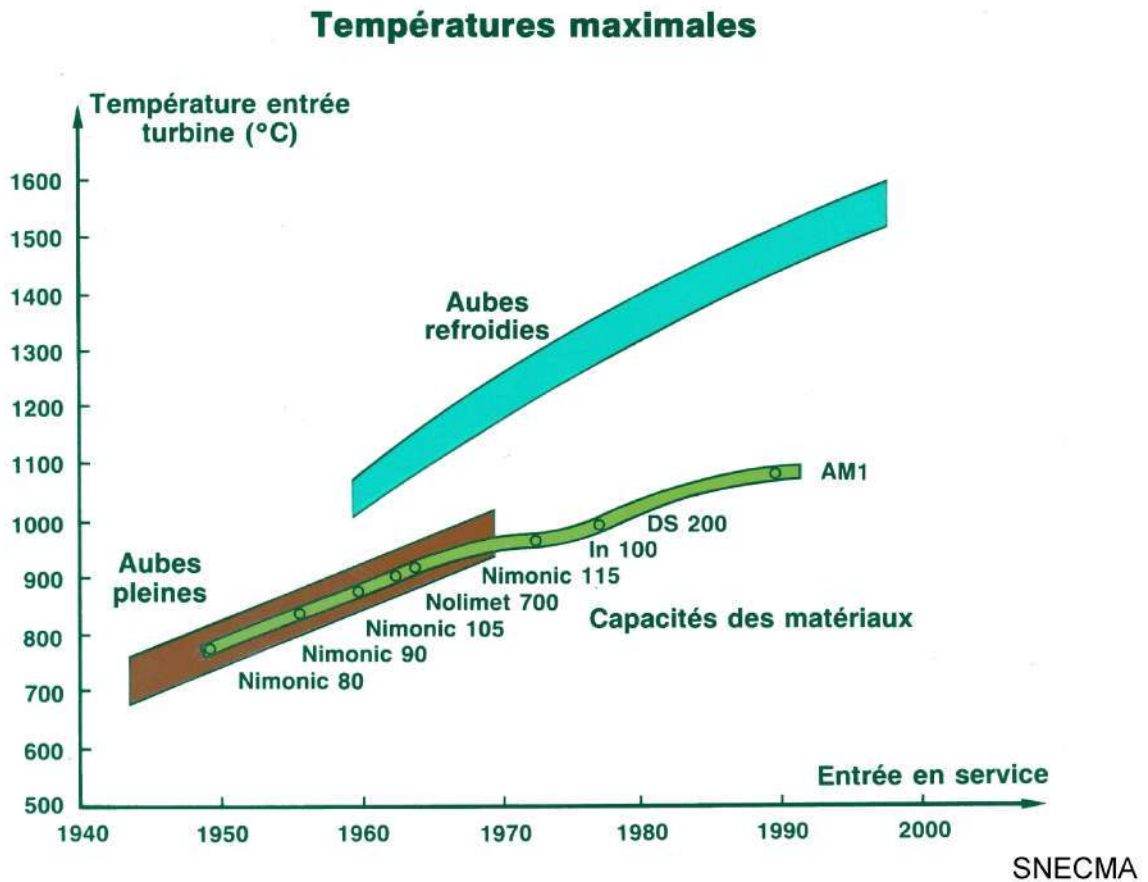
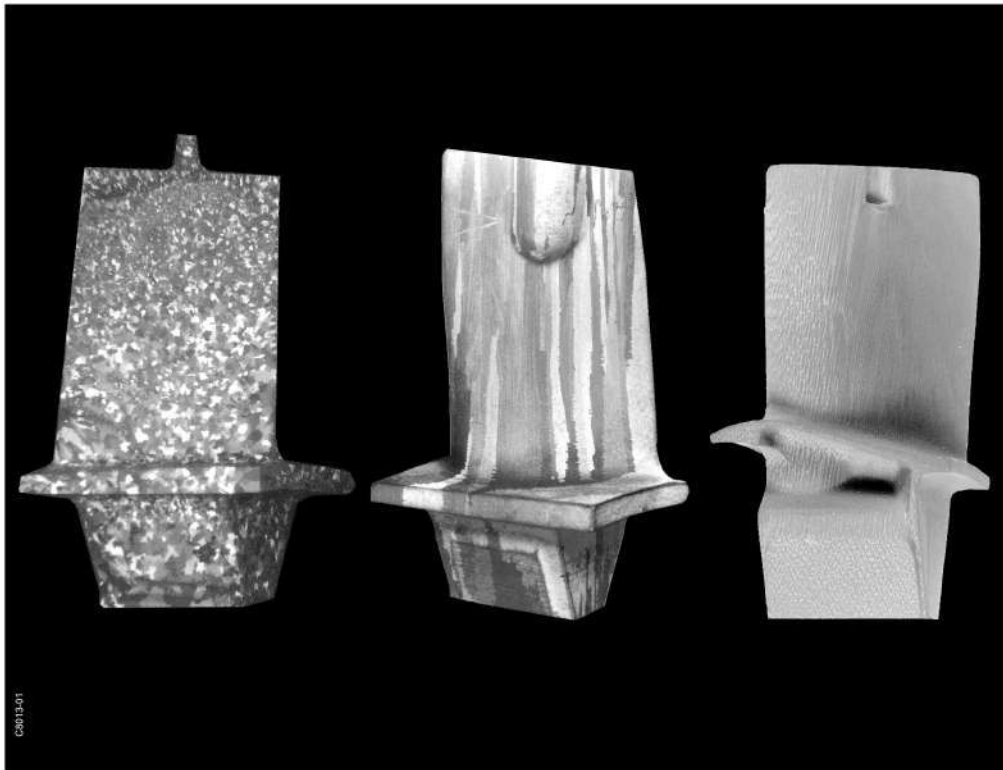


Fig. 52
Progrès dans les températures d'entrée turbine



Turboméca

Fig. 53

Macrostructures des pales de turbine associées aux évolutions des techniques de solidification : à gauche, conventionnelle équiaxe, au centre directionnelle (DS), à droite monocristalline (MC)



Pale de turbine HP Arrius en monocristal:
elle mesure ~3cm
encaisse une charge centrifuge de 3 tonnes
transmet au disque une puissance de ~20CV

Turboméca

Fig. 54

Nota : Péchiney étant revendu à Alcan, Cezus à Timet, il n'y a plus de fabricants nationaux en aluminium ni en titane, ni d'usine d'éponge de titane en Europe. Le groupe Aubert et Duval, intégré dans Eramet est devenu le seul élaborateur de superalliages en France.

1.2.2 L'industrie métallurgique aval

Nous retiendrons les éléments suivants :

Forgeage : Ce secteur subit de fortes modifications ayant des incidences sur toutes les familles d'alliages utilisés dans l'industrie aéronautique (aluminium, aciers, titane, et superalliages). Les presses de Pamiers et d'Issoire (cf. paragraphe 1.2) deviennent insuffisantes pour produire les pièces matricées de dimensions croissantes en aciers à hautes caractéristiques¹¹¹ (pièces d'atterrisseurs¹¹², mâts réacteur Airbus, mât rotor du Puma à quatre branches), en superalliages (disques de réacteurs), en titane (disques de compresseur, pièces de structures) et en alliages légers (éclisses de voilure, cadres forts de fuselage).

A la fin de 1972, sous l'impulsion de Jean Duval, PDG d'Aubert et Duval, et de Maurice Arlet, PDG de Cégédur et Forgeal, les Sociétés Forgeal (40,5%), Creusot-Loire (40,5%), Aubert et Duval (13%) et SNECMA (6%) se fédèrent au sein du Consortium Interforge pour construire à Issoire la plus grande presse à forger du monde occidental (65 000 t). Commandée en avril 1973 à la Russie (NKMZ de Novokramatorsk), elle est inaugurée le 13 janvier 1977¹¹³. En 2001, sont sorties de cette presse, 25 000 pièces matricées, pour l'industrie aéronautique, tous alliages confondus.

Le groupe Aubert et Duval reprend en 1995 les Sociétés Tecphy (1989, filiale de Imphy SA) et Fortech (1991, forges d'Issoire et de Pamiers), et décide l'investissement d'une nouvelle presse de 40 000 t à Pamiers. Cette concentration industrielle se termine par l'intégration de Aubert et Duval dans le groupe minier Eramet en 1999.

Métallurgie des poudres : Tecphy dispose de la seule unité d'atomisation française de superalliages et de leur mise en œuvre par métallurgie des poudres.

Forgeage de précision : cette dénomination est réservée à la fabrication de pièces, par forgeage, près des cotes, de façon à éviter un usinage ultérieur. Avec l'avènement des grands réacteurs civils (famille des CFM 56, CF6-80), cette technique doit être utilisée pour la fabrication des grandes aubes de soufflante. La

¹¹¹ Telles les nuances 35NCD16 pour les trains Messier (cf. ouvrage COMAERO de Jacques Veaux, *Les trains d'atterrissage et systèmes associés*, Paris, CHEAr/DHAr, août 2006), 15CDV6 et 40CDV20 pour les corps ou enveloppes de gros propulseur d'engin balistique, 40CDV12 ou Marval X12 (*Maraging inox AD*) pour les pièces de mât porte-réacteur d'Airbus.

¹¹² La tige principale du Concorde doit, à l'époque, être matricée chez le forgeron américain Wyman Gordon qui possède une presse de 45 000 t.

¹¹³ La DMA/DGA a apporté une aide à l'investissement d'Interforge sous forme d'avances remboursables, comme dans les années 1970-1980 elle apporta, au titre de la politique industrielle, un soutien financier à l'industrie d'amont pour ses gros investissements, et comme le fit auparavant la DTI/DTCA (SMPA/SPAé) dans les années 1950-1960 (exemple du banc de traction de tôles épaisses en alliages légers à Issoire pour Mirage IV en 1955-60).

SNECMA investit dès les années 1980 à Gennevilliers dans une presse à vis de très forte puissance (8 000 tonnes), qui sera la plus importante de ce genre en Europe.

De son côté Forges de Bologne renforce son activité et son savoir-faire dans le forgeage et le matriçage (aubes et disques)

Laminage : Commentry fait désormais partie du groupe Erasteel.

Fonderie :

Aluminium : Messier-Arudy, à la suite d'un parcours chaotique finit par être racheté par Honselwerke. Montupet s'est dissocié du groupe Pechiney, deviendra SFU puis sera intégré dans ALCAN.

Magnésium : le LMI disparaît 1991 après une tentative de reprise par Howmet à Dives. La SNECMA ferme, en 1980, sa fonderie sable de Gennevilliers.

Titane : Messier-Arudy finit par fermer son unité titane non rentable industriellement. PCC, *Precision Castpart Corporation* (États-Unis), installe à proximité (Ogeu) une fonderie titane à la cire perdue.

Superaliages : La SNECMA crée au début des années 1980 une nouvelle fonderie de précision sur son site de Gennevilliers pour faire face à l'industrialisation des CFM 56, et pour être capable de la fabrication d'aubes de turbine complexes, en version monocristalline, avec un atelier de fabrication de noyaux céramiques intégré.

Microfusion, qui a racheté (1991) l'usine du LMI à Dives, la transforme en une fonderie spécialisée dans la coulée des aubes de turbomachines. Elle est rachetée par Pechiney dans le cadre de Howmet, puis revendue à Alcoa (1995). PCC étend son activité aux aciers et aux superalliages.

1.2.3 Rôle des constructeurs aéronautiques

- Les constructeurs (moteurs, cellules) ont tendance à étoffer leurs laboratoires, conscients de la nécessité de ne plus dépendre totalement des données de l'industrie amont :
- La SNECMA choisit une formule originale : l'École nationale supérieure des mines de Paris souhaitant développer ses activités de recherches avec l'industrie et former ses ingénieurs par la recherche, Jean Blancard, président de SNECMA, aménageant en 1967 son nouveau Centre d'Évry-Corbeil, prend l'initiative de mettre à la disposition du directeur de l'ENSMP, Raymond Fischesser, et de son centre des matériaux un bâtiment contigu à son laboratoire « matériaux et procédés ». Cette association originale a été et est encore, un facteur essentiel de réussite et de promotions de solutions nouvelles. Il en est résulté, par ailleurs, un fort courant d'embauches par SNECMA des chercheurs formés à ce nouveau centre de l'ENSMP.¹¹⁴
- Le Laboratoire central de Sud-Aviation, devenue SNIAS en 1970 puis Aérospatiale en 1984, se réunit avec le Laboratoire industriel de Sud-Aviation en 1987 pour former à Suresnes le Centre commun de recherches Louis Blériot.
- La dynamique d'évolution des matériaux est accompagnée par un mouvement de coopération entre constructeurs et laboratoires de recherches, ce qui stimule

¹¹⁴ Jean-Pierre Trottier, directeur du Centre des matériaux de l'École des Mines de Paris depuis 1983, « L'École des Mines de Paris », *L'Aéronautique et l'Astronautique*, n°3, mai-juin 1995, p.66-74 (n° consacré aux matériaux pour l'aéronautique et l'espace). Le Centre des matériaux de Corbeil a pris le nom de son fondateur Jean Marie Fourt (X49, Mines, directeur à Imphy puis à Creusot-Loire, décédé en 1986).

leur développement. Ainsi le Centre de mise en forme des matériaux (CEMEF) est créé en 1976 à partir du Centre des matériaux de l'ENSM et de l'ENSTA, et implanté sur la Technopôle de Sophia-Antipolis. Dirigé par Jean-Loup Chenot depuis 1979, il met au point en 1983 un modèle de simulation numérique appelé code Forge 3 permettant d'optimiser les gammes de forgeage des disques de turbine et de compresseur et qui sera utilisé par l'ensemble de l'industrie mécanique (action concertée du CETIM).

- Fortement incités par les services officiels (DGA, DGAC, Recherche civile...), les constructeurs et les élaborateurs s'associent également dans le cadre de structures coopératives particulières pour des actions spécifiques de recherche et développement. On peut mentionner les groupements scientifiques (titane, superalliages monocristallins) déjà cités, ainsi que le programme de recherches PDNM, Produits de nouvelle métallurgie, centré sur le N 18 et le Beta-Cez, auxquels l'État apporte son soutien financier.
- A ces actions nationales, s'ajoutent dans les années 1980 des coopérations européennes dans le cadre du PCRD (Programme commun de recherche et développement) rassemblant sur de grands thèmes de recherches fédérateurs (sauts technologiques) les industriels (grands groupes, PME et PMI) et centres de recherches européens pendant plusieurs années. Ces opérations soutenues financièrement par l'Europe et les industriels absorbent peu à peu la partie majeure des capacités de recherche et développement nationales.

2 - PROCÉDES

Si les procédés et matériaux sont indissociables dans les conceptions et la fabrication des structures en composites, il n'en est pas de même pour les autres matériaux dont les évolutions apparaissent souvent liées à des avancées technologiques spécifiques pour assurer leur mise en œuvre opérationnelle.

Au cours de la période 1970/2000, une gamme élargie de procédés a également accompagné la naissance de nouveaux matériaux. Sans être exhaustif, il est nécessaire de rappeler les apports les plus marquants.

2.1 - Techniques de mise en forme

Les coûts des nouveaux alliages (titane, nickel surtout), l'accroissement des temps d'usinage associés au renforcement des propriétés d'usage, la complexité croissante des pièces incitent à faire des efforts pour réduire le rapport « masse de matière avionnée/masse de matière mise en œuvre » qui est traditionnellement de l'ordre de cinq voire de six. Les principaux actes de travail ont été les suivants :

2.1.1 La fonderie

La technologie de la cire perdue qui permet la réalisation de pièces complexes à parois minces, réservée d'abord aux aciers et aux alliages d'aluminium, s'étend progressivement aux alliages de titane et de nickel grâce à l'avènement de la coulée sous vide. Elle envahit véritablement l'aéronautique avec des applications spectaculaires tant en petites qu'en grandes pièces complexes (carters, aubes, rotors, etc.). Microfusion, la fonderie SNECMA, et plus tard PCC (*Precision Castpart corporation*, États-Unis) installée à Ogeu, jouent un rôle essentiel.

La technique de compaction isostatique à chaud (CIC) apporte un appui complémentaire précieux pour réduire la porosité et améliorer les propriétés mécaniques. La stéréolithographie, arrivée vers la fin des années 1980, réduit significativement les délais de fabrication des pièces prototypes et des outillages.

2.1.2 Le forgeage

De nombreuses études sur la modélisation des séquences de forgeage conduisent à une meilleure maîtrise du procédé et de la microstructure.

En parallèle, les différentes technologies recouvrant le concept de forgeage en matrice chaude (isotherme ou non) permet des avancées significatives en termes de « mise au mille » et de propriétés d'usage, mais au prix d'une certaine complexité.

2.1.3 Le métallurgie des poudres

Cette nouvelle métallurgie suscite de très grands espoirs tant au plan technique qu'au plan économique. De nombreuses alternatives sont explorées (alliages base Ti et Ni surtout) :

- Compaction seule (voie 1).
- Compaction et forgeage (voie 2).
- Extrusion et forgeage (voie 3).

La première approche appliquée à des pièces très simples se montre cependant peu attractive au plan des coûts. Une autre approche originale portant sur des pièces très complexes (procédés ISOPREC) conduite à travers une action concertée SEP/CEA/TM aborde avec succès la fabrication de rouets flasqués en alliage de titane (turbopompe SEP) mais échoue sur le diffuseur centrifuge de Turboméca.

Finalement seules les voies deux ou trois trouveront des applications en raison des performances très élevées pouvant ainsi être atteintes (disque M 88).

2.1.4 Le formage superplastique

Cette technologie qui autorise de grandes déformations sous des conditions microstructurales et des sollicitations très précises est particulièrement développée sur les alliages de titane. Associée au soudage par diffusion (SPF-DB, *Super plastic forming-diffusion bonding*, 1980), elle s'avère adaptée à la réalisation de pièces complexes, creuses et à parois minces :

- Aigrettes du Mirage 2000, becs de voilure du Mirage 2000 et du Rafale (AMD).
- Aubes de soufflante à large corde (SNECMA).

2.1.5 l'usinage

L'avènement de matériaux à hautes caractéristiques et la difficulté d'obtention de pièces brutes à haute intégrité proches des cotes finies, conduisent les industriels vers des efforts obstinés et continus pour réduire les temps d'usinage. Ils ont porté sur de nombreux paramètres : les outils coupants, la cinématique et la dynamique des machines, l'ensemble amène à des vitesses de rotation et de déplacement de plus en plus élevés.

L'usinage grande vitesse permet des progrès significatifs tant sur les alliages de titane que sur les alliages d'aluminium. Si les résultats obtenus dépendent du matériau et du type d'opération (tournage, fraisage etc.), ils restent considérables, les réductions du temps d'usinage pouvant dans certains cas atteindre un facteur 20 entre 1970 et 2000.

En parallèle, de nouvelles technologies de perçage (BE en 1970 et laser en 1980) ont fait avancer de façon décisive les techniques de refroidissement dans les moteurs.

Les procédés de découpe évoluent également avec l'arrivée de nouveaux procédés : plasma, laser, jet d'eau.

2.2 - Assemblage

La permanente recherche de réduction des coûts de fabrication et d'allègement, l'accroissement de la diversité des matériaux et de leurs performances, les nouvelles exigences de conception sont des éléments fortement incitatifs vers le développement d'assemblages nouveaux mieux adaptés. Nous retiendrons surtout :

2.2.1 Le soudage par bombardement d'électrons (BE) et laser

Par sa rapidité d'action et sa forte concentration énergétique le BE d'abord (1970) et le laser ensuite (1980) se sont rapidement imposés pour des assemblages de précision à hautes caractéristiques (aciers, base nickel, base titane), le premier étant surtout réservé aux alliages fortement réactifs en raison du vide imposé par le procédé. Ces procédés sont aujourd'hui largement employés en aéronautique.

2.2.2 Le soudage inertie et friction

Cette technique qui utilise pour apport de chaleur le frottement l'une contre l'autre des pièces à assembler et qui associe soudage et forgeage se révèle très utile pour assembler des matériaux à résistance élevée ou de natures différentes. Bien que les moyens correspondants et leur mise en œuvre soient relativement lourds, cette technique apporte une solution élégante à des configurations particulières (arbres et tambours de moteurs SNECMA).

Une variante appelée Stir-welding relevant du même principe mais faisant appel à un outil spécifique de frottement, les pièces à souder restant immobiles, est mis au point en 1991 par TWI (UK) et utilisée sur l'A380.

2.2.3 Le soudage diffusion

Bien que ce procédé qui utilise une action combinée de la pression et de la température ait fait l'objet de nombreuses études, son domaine d'emploi est resté très limité.

Turboméca, dans le cadre de son DE (1985) sur une roue de turbine duale (moyeu en métallurgie des poudres, pales de fonderie) n'a pu obtenir des résultats suffisamment satisfaisants au niveau des caractéristiques du plan de joint.

En revanche, en association avec le SPF elle donne lieu à quelques applications remarquables (cf. paragraphe 1.4, le formage superplastique, ci-dessus).

2.2.4 Le brasage

L'assemblage par soudage nécessitant des moyens lourds, les compositions de brasure évoluent fortement à partir de 1980 pour s'adapter aux nouveaux matériaux et aux nouvelles conditions de sollicitation des joints (température, oxydation, corrosion). Une grande variété de nuances sont mises sur le marché pour le brasage des alliages de nickel (base argent, or, palladium, puis base nickel-chrome, bore, silicium...) sous différentes formes (poudre, feuillard) ainsi que des nuances spécifiques pour les alliages de titane (titane-cuivre-nickel par exemple).

Mais un concept entièrement original, applicable aux superalliages voit le jour dans les années 1970-1980, d'abord aux États-Unis, puis en France sous l'égide de la SNECMA : le RBD (*Reactive diffusion bonding*). Le matériau de base est une nuance de nickel à hautes caractéristiques sous forme de poudre intimement mélangée à une poudre de brasure jouant le rôle de liant.

Ce procédé qui donne naissance à des joints de haute résistance et de forte épaisseur si nécessaire, est également étendu au rechargement des pièces après usage en vue de leur réparation (SNECMA, Turbomachine, Chromalloy). Sa mise au point est accompagnée par différentes études (ONERA, École des Mines, SNECMA).

2.3 - Les traitements de surface

Les sollicitations en surface des pièces (usure, érosion, oxydation, corrosion, etc.) étant souvent très différentes de celles en volume (champ mécanothermique), des traitements de surface spécifiques ont dû être développés. L'ampleur et la variété des conditions environnementales d'emploi des matériaux aéronautiques se traduisent dès les années 1970 par une éclosion de procédés et de matériaux susceptibles de répondre à chaque enjeu.

2.3.1 Les traitements thermochimiques

Nous devons rappeler la chromaluminisation en phase vapeur développée par l'ONERA (Philippe Galmiche) au début des années 1970 pour la protection des parties chaudes des moteurs et qui est largement répandue (SNECMA, Turboméca, Microturbo). Différentes adaptations ou modifications sont apportées au cours des années.

Dans un tout autre domaine, des progrès significatifs sont également apportés dans les années 1990 à la cémentation (cémentation sous vide) et à la nitruration (application pignonnerie).

2.3.2 La projection thermique

La projection classique à la flamme est complétée vers 1960 par une technique de combustion sous pression (canon à détonation ou D gun). Des dépôts denses et faiblement oxydés et décarburés sont ainsi obtenus et parfaitement adaptés aux revêtements anti-usure. Ce procédé très lourd est remplacé dans les années 1980 par le HVOF (*High velocity oxyfuel flame*) et prolongé récemment par le ColdSpray.

Dans les années 60 la recherche de dépôts hautement réfractaires favorise le remplacement de la flamme par un plasma généré par un arc électrique entre deux électrodes traversé par un gaz inerte (argon + hydrogène ou hélium).

La SNECMA prend un brevet qui est repris plus tard par la Société PlasmaTechnik. Ce procédé, en raison de ses températures élevées, autorise un large éventail de produits déposés et est très utilisé dans les moteurs (abradables, barrières thermiques, réparations, etc.).

Dans les années 1980, apparaissent des variantes sous vide ou pression partielle (VPS ou *Vacuum plasma spraying*) qui permettent des dépôts non oxydés et aux épaisseurs mieux contrôlées (protection des parties chaudes contre la corrosion, barrières thermiques céramiques, etc.). En France, Chromalloy et SNECMA investissent dans ces nouveaux moyens.

2.3.3 Les techniques PVD (*Physical vapor deposition*)

Il existe de nombreuses variantes de ce procédé (pulvérisation cathodique, évaporation sous vide, *ion plating*) dans lequel les éléments cibles sont déposées par évaporation dans une enceinte. Autorisant une grande variété de matériaux déposés, denses et à épaisseurs maîtrisées, il trouve de nombreuses applications dans différents secteurs.

En ce qui concerne l'aéronautique, il est d'un apport significatif dans les outils de coupe et il s'illustre dans la réalisation des barrières thermiques (EBPVD, EB pour *Electron beam*).

CONCLUSION

De ce large tour d'horizon, nous pouvons sans aucun doute tirer des enseignements multiples. Nous retiendrons surtout les observations suivantes :

- L'évolution des matériaux et de leur mise en œuvre a subi une nette accélération dès le début des années 1970,
- L'avènement de nouvelles technologies est un élément clé des progrès dans les matériaux. Nous citerons en particulier : l'élaboration et la refusion sous vide, les procédés de mise en œuvre des composites organiques, les technologies associées à la métallurgie des poudres (atomisation, compaction isostatique etc.), la solidification dirigée poly et mono-cristalline, le forgeage isotherme, etc.
- Les différents succès qui ont été obtenus sont le fruit d'une coopération marquée et volontariste entre les différents industriels concernés soutenue par les services officiels français qui ont, en particulier, su promouvoir et coordonner les recherches amont (DRME/DRET) et les essais technologiques (STAè/STPA) ou applicatifs. Ils ont été appuyés par une activité de recherche fondamentale structurée et cohérente dont les principaux acteurs ont été l'ONERA, le CNRS et l'École des mines de Paris.

CHAPITRE 5

EQUIPEMENTS

On commence par évoquer les études importantes menées par la DRME/DRET en matière de composants, dont les retombées sur les équipements sont essentielles. On donne ensuite un panorama des études menées par le service technique de la DTCA/DCAé chargé des équipements (section pilotage-navigation-intégration au STAé, devenu en 1980 département avionique générale et intégration au STTE)

1 - COMPOSANTS OPTRONIQUES ET ELECTRONIQUES

Il s'agit des études de composants menées par la DRME/DRET et de leurs applications dans l'aéronautique et les systèmes d'armes.

Sont présentées ci-après, à titre d'exemples, des études de composants relevant spécifiquement des contrats de la DRME/DRET (études très amont et à finalités multiples) ayant donné lieu à des applications diverses dans les programmes d'armement, principalement aéronautiques dans le cas présent.

1.1 - Les lasers

La DRME a contribué aux recherches sur les lasers dès leur apparition. Le premier laser à rubis a été réalisé en 1960, les travaux français d'Alfred Kastler et de Jean Brossel sur le pompage optique à la base du laser étant de 1949. Grâce au laser, l'optique cohérente offre des perspectives scientifiques et des applications militaires inaccessibles par la voie de l'optique classique. C'est ainsi que les lasers à Grenat d'yttrium-aluminium (YAG) émettant à $1,06\text{ }\mu\text{m}$ puis les lasers à CO_2 émettant à $10,6\text{ }\mu\text{m}$ sont utilisés en télémétrie, dans les dispositifs d'illumination et de désignation d'objectifs, et les systèmes de guidage de missiles tactiques ou de bombes larguées d'avion. Le laser CO_2 est à la base du LIDAR¹¹⁵ (ou radar laser) pour la détection de missiles volant à basse altitude, la détection de câbles électriques (application hélicoptère), l'anémométrie laser (id⁹), ou la mesure à distance (mesures non intrusives en soufflerie type DRASC, Diffusion Raman anti-stokes cohérente, mises au point à l'ONERA ; mesures atmosphériques). Les industriels français SAT, CGE, Thomson-CSF réalisèrent d'excellents appareils (lidars ou télémètres) à laser CO_2 . Les recherches menées à l'ETCA sur la sécurité oculaire des lasers pour la télémétrie et l'illumination ont abouti à préconiser, à l'avenir, les sources à $1,54\text{ }\mu\text{m}$.

Le laser utilisé à basse ou moyenne énergie peut aveugler, éblouir, brouiller ou détruire les détecteurs optiques adverses, action qui est de plus favorisée par l'effet « œil de chat » (ondes rétro-réfléchies par les systèmes optiques visés) : son utilisation en tant qu'arme anti-senseurs optroniques a été évaluée en liaison avec

¹¹⁵ Lidar : *Light detection and ranging*.

les directions. Pour la haute énergie, c'est avec un laser CO₂ de type LEDA¹¹⁶ (laser électrique à détente adiabatique), émettant un faisceau de puissance 40 kW pendant 10 secondes, que les laboratoires de Marcoussis de la Compagnie générale d'électricité (CGE) démontrèrent en 1989 la possibilité de détruire à une distance de 700 mètres un iridôme de missile infrarouge.

Les *gyrolasers* pour centrales à inertie : des études de gyromètre laser basés sur le principe de l'interféromètre de Sagnac ont été menées de façon ininterrompue depuis les années 1960 auprès de SFENA, avec la participation de Quantel, et ont permis de réaliser de nouveaux systèmes de navigation à inertie qui remplacent aujourd'hui les centrales à gyroscopes mécaniques exigeant une plate-forme stabilisée. Les systèmes inertiels à gyrolasers de SFENA ou SAGEM se sont ainsi imposés pour équiper les grands programmes Airbus, Rafale (SAGEM), Ariane et Tigre (SFENA, devenue Sextant Avionique).

1.2 - Les composants pour la microélectronique et l'optronique

Au sein du Commissariat à l'énergie atomique, plus précisément de son Centre d'études nucléaires de Grenoble, le CENG, fondé le 1^{er} janvier 1956, il est créé en 1968 le LETI, Laboratoire d'électronique et de technologie de l'informatique (renommé ensuite Laboratoire d'électronique, de technologie et d'instrumentation). Celui-ci est né d'une volonté du Professeur Louis Néel¹¹⁷ directeur du CENG, et de son adjoint Bernard Delapalme (X43, GM), qui confie sa direction à Michel Cordelle¹¹⁸. Celui-ci en fait un grand laboratoire de l'électronique dont le programme tiendra compte des avis et demandes des services officiels, et notamment des services de la DGA.

C'est ainsi que la DRME soutient depuis les années 1960 le développement des composants nécessaires aux matériels militaires : *circuits intégrés* silicium à grande densité (VLSI) pour mémoires et microprocesseurs, circuits intégrés arsénium de gallium (GaAs) pour l'émission et la réception en hyperfréquences, mémoires à bulles magnétiques (transférées vers SAGEM avec soutien SCTI), circuits intégrés CMOS¹¹⁹ sur *Silicon on insulator* (SOI) résistant aux radiations ionisantes, nucléaires, ou spatiales (filiale durcie transférée à Thomson composants-semi-conducteurs, TCS, avec soutien de la DRET, de la DME et de la DEI).

L'imagerie infrarouge passive a fait l'objet de nombreuses études financées dans l'industrie, au CNRS et dernièrement au CEA. Au sein du LETI-CENG, il est mis en place en 1978 sous l'impulsion de la DRET un laboratoire infrarouge, le LIR. Celui-ci a pour mission d'étudier une technologie de détecteurs infrarouges optimisés dans les bandes de transparence atmosphérique 3-5 et 8-12 μm et à circuit de lecture CCD (*charge coupled device*, ou DTC dispositif à transfert de charges). Le choix

¹¹⁶ LEDA : Laser à excitation électrique et détente adiabatique.

¹¹⁷ ENS 24, 1904-2000, physicien du magnétisme, favorise la création des organismes de recherche et d'enseignement supérieur à Grenoble, préside l'INPG à sa création (1969-75), est à l'origine de l'implantation à Grenoble en 1985 du synchrotron européen, membre de l'Académie des sciences (1953), du CASD (1965), prix Nobel de physique (1970), président du jury du prix Science et Défense (1984-91), voir la page 23.

¹¹⁸ Lui succèdera Denis Randet, IGA (FA), X59.

¹¹⁹ Métal, oxyde, silicium.

alors de cette nouvelle technologie IRCCD pour la caméra thermique¹²⁰ (dite de seconde génération) du programme de missile antichar de 3^e génération (AC3G) rend possible en 1986 la création de la société SOFRADIR, filiale de SAT 40%, Thomson-CSF 40%, CEA 20%, qui en assurera l'industrialisation. Ainsi fut constitué un « pôle » de détection infrarouge comprenant le LIR, SOFRADIR, Thomson-CSF (TCS), SAT, de très haut niveau, tout à fait compétitif au plan mondial. Il est à noter que dès 1966 la SAT utilisa la technologie photovoltaïque HgCdTe, fonctionnant à basse température (77 K), qui est à la base de l'IRCCD, qui était unique au monde et provenait d'une retombée de recherches fondamentales du CNRS de Meudon Bellevue. C'est l'IC (Télécommunication de l'Armement) Jean-Louis Teszner qui, au sein de la DRET, contribue de façon déterminante à la création du LIR et prend la direction de SOFRADIR à sa création.

L'imagerie infrarouge apporte un progrès important dans l'avionique de nos systèmes d'armes aéroportés : les caméras thermiques et leur évolution ont permis et permettent de développer les fonctions suivantes : FLIR (*forward looking infrared*) aide au pilotage de nuit en complément avec le radar de suivi de terrain, armement guidé laser à capacité nuit (missile AS 30 laser ou bombe guidé laser MATRA couplé au POD de désignation ATLIS¹²¹, qui utilise les composants du système modulaire thermique, et conçu dès 1984 par TRT-SAT), conduite de tir discrète et insensible au brouillage électromagnétique (veille et poursuite des avions), autoprotection et contremesures (détecteur d'arrivée de missile, détecteur d'alerte laser) ; et dans les missiles : autodirecteur IR à imagerie du missile MICA, senseur à imagerie pour guidage terminal d'un armement guidé laser (supprime la phase d'illumination) ou d'un missile de croisière (cas du Scalp-EG / *Storm Shadow*).

Applications au Rafale : issu du développement exploratoire ASPIC (surveillance et poursuite infrarouge) conduit de 1981 à 1986 par la SAT/SAGEM sur le concept de la veille infrarouge aéroportée (diteIRST, pour *Infrared search and track*), l'OSF, *optronique secteur frontal*, du Rafale est développé de 1991 à 1997 par Thomson-CSF Optronique et SAT/SAGEM : il comprend un capteur multispectral utilisant des détecteurs infrarouge SOFRADIR et est le seul au monde à regrouper dans un faible encombrement les fonctions techniques de veille infrarouge bispectrale, d'imagerie infrarouge avec poursuite, d'imagerie TV avec poursuite et de télémétrie laser, en modes air-air, air-sol et air-mer. Équipement discret et insensible au brouillage électromagnétique, il remplit les fonctions générales de détection, de localisation et d'identification des cibles et des menaces en secteur avant au profit des fonctions d'attaque, de navigation et aussi de celles d'autoprotection et d'identification qui s'intègrent dans le Système de protection et d'évitement des conduites de tir du Rafale, SPECTRA. Les travaux réalisés par Thomson-CSF Optronique et SAT/SAGEM au titre du développement exploratoire SIVAPOT, Système infrarouge de veille, d'alerte et de poursuite omnidirectionnelle tridimensionnelle, lancé en 1986, ont permis d'augmenter la sensibilité du système d'alerte missile SAMIR (système d'alerte missile en infrarouge, type DDM) du Mirage 2000 et de réaliser la fonction détection d'arrivée de missile du Rafale.

¹²⁰ Intégrée dans le viseur de mât de l'hélicoptère antichar franco-allemand Tigre.

¹²¹ Jean Dansac, « Système d'armements guidés laser air-sol », *L'optronique militaire en France*, Actes du colloque CHEAR du 16 mai 2002.

1.3 - Lutte anti-sous-marine

En matière de détection magnétique en lutte anti-sous-marine, le LETI effectue depuis plus de 30 ans avec le soutien de la DRME et de la DTCN et en liaison avec Crouzet (devenu SFENA puis Sextant Avionique), sur le développement des magnétomètres à résonance magnétique nucléaire équipant les MAD (*Magnetic anomaly detection*) hélicoptères depuis 1972 sur Alouette III et aéroportés depuis 1982 sur Breguet Atlantic ATL II. On rappelle *in fine* la carrière de l'éminent professeur Louis Néel, spécialiste entre autres du magnétisme, à l'origine de la création, outre du LETI, de nombreux organismes de recherche et d'enseignement supérieur, notamment dans la région de Grenoble.

2 - AVIONIQUE GENERALE ET INTEGRATION (PNI, AVI)¹²²

Font l'objet du présent descriptif les études amont relatives aux équipements, conduites par la DTCA/DCAé¹²³ au cours de la période 1945-1995, dans les domaines suivants : pilotage (instruments, pilote automatique, commandes de vol, capteurs associés), navigation (centrale de cap et de verticale, anémobarométrie, calculateur, centrale inertielle), intégration (architecture, organisation du poste d'équipage, calculateur central, langage informatique, visualisations) radiocommunication (HF, VHF, UHF, MIDS), radionavigation (RC, VOR, ILS, DME, TACAN, RDN, MLS, GPS), identification (segment bord : répondeur et interrogateur IFF), simulation, maintenance.

Rappel historique (1945-1975)

Au début des années 1950, les instruments de planche de bord (altimètre, anémomètre, variomètre, horizon et conservateur de cap mus par de l'air déprimé) sont à capteur intégré. A la fin des années 1950 et au début des années 1960, chaque capteur a un cadran afficheur dédié : altimètre, anémomètre, horizon, etc. La plupart des systèmes sont électromécaniques (Calculateur de navigation du Mirage IV, centrale aérodynamique du Mirage III...).

C'est la belle époque pour tous les composants tournants (potentiomètres, résolveurs, génératrices, moteurs, moteurs couple, moteurs pas à pas, tout ce qui permettait de faire tourner un axe ou de mesurer la vitesse angulaire ou l'orientation).

Progressivement les transistors remplacent les tubes. A la fin des années 1960, les premiers systèmes électroniques analogiques (amplificateurs opérationnels) apparaissent : calculateurs d'estime, centrales aérodynamiques, pilotes automatiques (Mirage F1).

Les années 1970 sont marquées par l'introduction du numérique. Les premiers microprocesseurs font leur apparition dans les systèmes de pilotage et de navigation (Mirage 2000, Puma, Gazelle).

¹²² Ce sous-chapitre a été écrit par Pierre Samson. Il tient compte des remarques et compléments qu'a bien voulu apporter Jean Carpentier, coordinateur de l'ouvrage COMAERO sur les équipements (2004).

¹²³ STAé/EQ (section Équipements) avant 1980, STTE/PNI (Pilotage navigation intégration) 1980-1986, STTE/AVI (Avionique générale et intégration) 1986-1997.

Ainsi, au cours de 20 à 25 ans, les fonctions de calcul ont été successivement : électromécaniques, analogiques à amplificateurs opérationnels et enfin numériques.

Les possibilités offertes par le numérique, tant en traitement qu'en échange des informations, ont permis, d'une part d'envisager des capteurs plus simples et, d'autre part, de concevoir des architectures système toutes nouvelles : intégration des systèmes (fédération des capteurs et des traitements), concentrations des informations (fusions de données), aide à la décision. Ceci conduisit à une profonde refonte de l'interface homme-système : organisation des postes d'équipage toute nouvelle (écrans multifonction, commandes reconfigurables, etc.). Tous les systèmes et toutes les fonctions furent concernés : pilote automatique, commandes de vol, inertie, radionavigation, conduite de tir etc.

Faits marquants (1975-95)

2.1 - Microprocesseurs et calculateurs

La capacité de traitement de plus en plus importante, complétée par une évolution quasi exponentielle des capacités mémoires permet la réalisation de logiciels de plus en plus complexes et le passage du langage « machine » aux langages de haut niveau (beaucoup plus gourmands en taille mémoire) LTR puis ADA¹²⁴.

La principale difficulté réside dans la validation de ces systèmes numériques complexes.

Par ailleurs, le développement des microprocesseurs et des logiciels associés ainsi qu'une réserve de mémoire toujours croissante ont permis de trouver un compromis entre fiabilité et taux de détection de pannes, sans ajout de composants, ou presque (compromis difficile à réaliser en électronique classique).

A noter que les efforts du SCTI pour développer un ordinateur militaire futur ne permirent pas de réaliser une version aéronautique répondant à l'ensemble des exigences.

2.2 - Les commandes de vol électriques

La sensibilité aux perturbations radioélectriques des CDVE conduisit le STAé/EQ à lancer en 1976 un DE sur les liaisons à fibres optiques dans les CDVE. Ces travaux sont menés par la Division équipements de Dassault Aviation et débouchent sur une maquette (liaisons optiques point à point) qui a volé au Centre d'essais en vol.

La sécurité et sûreté de fonctionnement essentielles aux CDVE ont été obtenues par des voies différentes :

- Dassault Aviation Rafale : trois chaînes identiques de traitement numérique par axe, le logiciel est développé avec des contraintes de qualité extrêmement importantes.
- Airbus (à partir de l'A320, avec application partielle à l'A310) : quatre chaînes de traitement numérique par axe (la certification est obtenue avec trois chaînes, la quatrième ayant pour but la disponibilité en opérations) – chaque chaîne étant autosurveillée, avec l'utilisation de microprocesseurs différents, les logiciels étant développés par des équipes différentes (recherche de

¹²⁴ Langage de haut niveau adopté par l'OTAN et inventé par Jean Ichbiah (X60, PC, PhD MIT, décédé le 30 janvier 2007).

l'élimination des pannes communes et des défauts de programmation). Une méthodologie stricte de développement des logiciels est simultanément mise en œuvre.

Par ailleurs, on a assisté à un déplacement de fonctions dites de pilotage vers les CDVE tant dans le civil que dans le militaire. Il n'y a plus de « pilote automatique » sur le Rafale.

2.3 - Les capteurs

La généralisation du traitement numérique conduit à la recherche de capteurs à sortie numérique directe (fréquence, impulsions) afin d'éviter la conversion analogique-numérique.

Par exemple, les capteurs de pression Crouzet quasi statique qui ont amélioré de façon très significative la précision des mesures d'altitude, de vitesse et de Mach ont été remplacés dans les années 1980 par des capteurs à sortie fréquence, munis d'une mémoire numérique permettant d'effectuer toutes les corrections nécessaires (linéarité et sensibilité à la température) et les magnétomètres statiques Crouzet donnant le nord magnétique (utilisation sur hélicoptères).

Le STAé/EQ a soutenu ces travaux soit en études amont, soit en études communes.

2.4 - Les systèmes inertiels

Rappel sur la famille ULISS¹²⁵

La centrale SKN2400 fabriquée sous licence Singer-Kearfott par la société SAGEM fut retenue en 1973 pour équiper le Super-Étendard. La SAGEM « francisa » cette centrale : nouveau calculateur et composants inertiels français (gyromètre TRG¹²⁶ S 040 et accéléromètre A-310). SAGEM lui donna le nom d'ULISS¹²⁷ (*Ultra light inertial system SAGEM*).

Le succès des centrales inertiels de la famille ULISS fut considérable. SAGEM en utilisa au mieux les possibilités : modularité, fonctionnalités (filtrage de Kalman, pour l'alignement de la centrale au sol ou sur porte-avions, corrélation d'altitude, systèmes intégrés de navigation et d'attaque, etc.).

Émergence des systèmes inertiels liés ou strap-down

Vers le milieu des années 1970, les microprocesseurs disponibles permirent d'envisager de remplacer la complexe plate-forme mécanique à cardans par une plate-forme virtuelle, obtenue par traitement, à haute rapidité de calcul, des données gyrométriques et accélérométriques de capteurs liés directement à la structure de l'avion : ce fut la technologie « inertie *strap-down* » ou à composants liés.

Le STAé/EQ émit un appel d'offres en 1976 afin de lancer des travaux sur les centrales à composants liés pour avion d'armes de la classe un mille marin par heure : ces travaux comportaient deux enjeux :

- Développer des capteurs gyroscopiques ou gyrométriques de grande dynamique. En effet, les capteurs gyrométriques d'une centrale inertielle à

¹²⁵ Cf. COMAERO de Jean Carpentier, *Les équipements aéronautiques* (2 volumes), Paris, CHEAr/DHAr, décembre 2004, volume I, page 107.

¹²⁶ *Tuned rotor gyro* ou *Dry tuned gyro*.

¹²⁷ SAGEM continua à verser des redevances à Singer-Kearfott.

plateforme mécanique étaient fixés sur le cœur de la plate-forme et servaient à la stabiliser dans l'espace. Leur domaine de mesure était très limité. Pour l'« inertie *strap-down* », il fallait donc développer des capteurs capables de supporter la dynamique du porteur (le Rafale peut atteindre une vitesse angulaire en roulis de 400 degré par seconde) tout en fournissant une précision équivalente au TRG de la centrale Uliss, c'est à dire le 1/100 de degré par heure.

- Développer un traitement numérique adapté.

Ces travaux firent l'objet de deux DE : le premier lancé en 1978 sur le système inertiel à composants liés *strapdown* pour avion, et le second lancé en 1980 (idem spécifique au gyrolaser).

- SAGEM proposa une centrale comportant deux GSE (gyroscope à suspension électrostatique) à bille pleine balourdée¹²⁸ de diamètre 1 cm. Si les résultats au LRBA furent satisfaisants, l'impact de la complexité mécanique et électronique sur le prix estimé de série mit fin aux travaux, sans que soit réalisé un prototype embarquable.

De son côté, le STCAN finançait SAGEM sur la réalisation d'une centrale à GSE à billes creuses de diamètre 4 cm à lecture optique de l'axe de rotation et l'ensemble de ces travaux ont débouché sur une centrale inertielle de très haute performance pour SNLE.

- SFENA, associée à Crouzet et s'appuyant sur les compétences, dans le domaine des lasers, de la société Quantel répondit par une centrale comportant trois RLG (*Ring laser gyro*).

La première centrale à gyrolasers (trajet optique de 22 cm) vole au CEV sur hélicoptère Puma fin 1979. Des travaux complémentaires permirent d'effectuer des vols d'évaluation de la centrale TOTEM (gyrolaser ayant un trajet optique de 33 cm) au CEV sur Mirage III et sur Transall en 1986.

La centrale TOTEM fut retenue en 1984 pour le lanceur Ariane 4 et en 1988 pour la rénovation de l'avion Transall¹²⁹.

Dans une version gyrolaser tri axe monobloc (trajet optique de 14 cm) développée par la suite, la centrale TOTEM équipe le Tigre et, avec un trajet optique de 22 cm, rencontre un certain succès à l'exportation...

On peut rappeler :

- que les miroirs sont aux RLG ce qu'ont été les roulements à billes aux gyros mécaniques : deux grandes difficultés à maîtriser (qui furent rencontrées par les industriels !).
- que les gyrolasers ont une zone aveugle, il faut donc les activer (oscillation suivant l'axe de mesure). Ces capteurs ne donc pas purement statiques.

En complément, le STAé/EQ finança les travaux de SAGEM et de SFIM sur des centrales à composants liés à base de DTG avec pour objectif de remplacer la centrale d'attitude (AHRS : *Attitude and heading reference system*) et, complétée par une hybridation (Radar doppler de navigation, GPS), d'en faire une centrale de navigation de moyenne précision.

¹²⁸ Pour la détection électronique de l'axe principal d'inertie.

¹²⁹ A noter, l'échec de coopération dans le cadre de la rénovation des Transall allemands et français : aucune convergence industrielle alors que les besoins opérationnels étaient quasiment identiques.

SAGEM et le gyrolaser¹³⁰

SAGEM, tout en effectuant les travaux sur le GSE et l'AHRs, assurait sur fonds propres une veille technologique sur le gyrolaser, en faisant appel à ses très bonnes relations avec Singer-Kearfott. Devant l'engouement pour le gyrolaser, SAGEM, utilisant ses grandes compétences en optique¹³¹, réalisa des gyrolasers de différentes tailles. Ceci donna naissance à la famille des centrales SIGMA qui succéda à la filière ULISS.

La centrale SIGMA (gyrolasers de 32 cm) fut retenue par Dassault Aviation dans le cadre de la consultation Rafale (prix de deux à trois fois inférieur à celui de la centrale ULISS), la centrale SIGMA (gyrolasers de 16 cm) le fut dans le cadre de la consultation de l'hélicoptère NH90.

Le choix de SAGEM pour le Rafale était dû à la qualité et aux performances de la centrale SIGMA, mais vraisemblablement aussi à son expérience ULISS, et à ses compétences particulières dans le domaine du filtrage de Kalman, issues en particulier de l'alignement de la centrale du Super-Étendard sur porte-avions utilisant la liaison numérique infrarouge Télémir. SAGEM a su faire évoluer le filtre de Kalman pour l'utiliser dans toutes les phases de la mission (alignement au sol, en vol, recalage, navigation).

Enfin il faut noter que, par son principe, une centrale inertielle à composants liés permet de distribuer l'ensemble des paramètres (position géographique, attitudes, vecteur vitesse, vitesses angulaires, accélérations, etc.), c'est-à-dire dans des axes terrestres et dans des axes avions, via le bus numérique aux différents modules du ou des calculateurs (pilotage, mission, conduite de tir). Dans ce cadre, les travaux de SAGEM, effectués au titre d'un DE lancé en 1990 (fonctions gyrométriques des systèmes inertiels à gyrolaser de deuxième génération) lui permirent d'être retenue par Dassault Aviation pour le bloc capteurs redondants des commandes de vol du Rafale (redondance de paramètres avec les centrales SIGMA).

Dans l'Aviation civile, l'intégration des fonctions anémobarométriques et des fonctions inertielles se concrétise dans la réalisation d'un équipement unique : l'ADIRS (*Air data and inertial reference system* – Arinc 738) utilisée sur l'A320.

2.5 - Intégration

Organisation des postes d'équipage

Dès 1976 de nombreux travaux (avions d'armes et avions de transport) soutenus par le STAé/EQ mettaient en évidence l'importance de l'organisation du poste d'équipage. Dans les années 1980, le STTE a lancé différents DE afin de simplifier l'interface « homme-machine » :

- en 1980 OPE, Organisation du poste d'équipage,
- en 1985 APIS, Aide au pilotage par images synthétiques,
- en 1987 EVASIVE, Étude de validation de systèmes de visualisation évolués,
- en 1991 copilote électronique

De ces travaux menés par Dassault Aviation, Sextant Avionique, etc., il résulte de nombreuses applications pour le Rafale : mini-manche, concept « mains sur manette et manche », écrans multifonctions, reconfigurables et tactiles, synthèse vocale,

¹³⁰ SAGEM n'a pas équipé les Airbus civils en centrale inertielle à gyrolaser, mais en revanche devrait équiper l'A400M.

¹³¹ Périscope des SNLE (Sous-marin nucléaire lanceurs d'engins).

commande vocale limitée à quelques fonctions, informations synthétiques, aide à la prise de décision par fusion de données (exemple : Radar, IFF, OSF, L16).

Visualisation

Ce domaine a fait l'objet d'importantes évolutions : instruments planche de bord multifonction (HSI), puis passage aux écrans : tube cathodique à pénétration (Mirage 2000), tube cathodique *shadow-mask* (Mirage 2000 N), puis écran plat LCD (Rafale).

Les industriels Thomson et SFENA rencontrèrent des difficultés d'approvisionnement (importation du Japon) des tubes à *shadow-mask* liées aux très petites quantités : commandes des quelques dizaines ou centaines (Airbus) de tubes aux dimensions « exotiques » face aux énormes commandes pour la télévision.

Cartographie

Le besoin opérationnel du Mirage 2000 N conduisit à rechercher une solution plus moderne pour présenter la carte géographique (carte « papier » Jaguar ou projection sur un écran dépoli d'un film couleur 35 mm Mirage F1 export). Sur une consultation du STAé/EQ, Thomson proposa une solution basée sur l'analyse vidéo en soute d'un film couleur 35 mm, suivi d'un traitement numérique, puis présentation sur un tube couleur *shadow-mask* en tête basse, ce fut l'une des premières applications de tube *shadow-mask* sur avion d'armes.

Bénéficiant de l'existence de mémoire toujours plus importante, la fonction « cartographie » du Rafale est assurée par un stockage dans une mémoire de masse sous forme vectorielle des différentes « couches » d'informations cartographiques y compris l'altimétrie, et par une présentation, après traitement, en tête moyenne.

Systèmes

Parallèlement aux travaux sur l'organisation du poste d'équipage, le STAé/EQ, puis le STTE/AVI ont lancé les DE suivants : en 1976, Intégration d'un système de pilotage navigation visualisation ; en 1982, ITI Intégration du traitement de l'information ; en 1988, BONG (Bus optique nouvelle génération) ; en 1989, A3 Architecture avionique avancée.

Le DE BONG lancé auprès de Dassault Électronique a permis de mettre au point en coopération avec les États-Unis le nouveau standard de bus OTAN : HSDB (*High speed data bus*) ou Stanag 3910, qui combine le bus standard OTAN 1553 à 1 Mbit/s et une fibre optique à 20 Mbit/s.

Le DE A3 a permis de définir en coopération avec la Grande-Bretagne et l'Allemagne, une architecture avionique et un concept de modularité matériel et logiciel. Les États-Unis ont refusé de coopérer, car très en avance dans le cadre du programme F22-Raptor.

Quelques retombées pour le Rafale :

- Le Rafale a adopté le bus HSDB Stanag 3910, et abandonné le Digibus.
- Son calculateur a adopté la modularité et la capacité d'évolution.
- Le langage utilisé est l'ADA et C++, le langage LTR V2 ou V3 est abandonné.

Les études d'intégration, complétées par d'autres dans les domaines de la conduite moteurs, de la conduite de tir, des contremesures, des liaisons de données temps réel, etc., a contribué à la réalisation de « systèmes ». Ces évolutions ont permis au pilote ou à l'équipage d'intervenir au plus haut niveau dans les phases

critiques de la mission : la gestion courante de la plate-forme étant assurée par les « systèmes »¹³².

2.6 - Radiocommunication, Navigation et Identification

Une veille technologique assurée par le STTE et les industriels a permis de suivre les travaux américains menés dans le domaine de l'intégration des fonctions « radio¹³³ » ainsi que des fonctions « guerre électronique¹³⁴ ».

STTE/AVI lança en 1993 un DE FICNIA, Fonctions intégrées de communications, navigation et identification pour aéronefs. Thomson réalisa un certain nombre de travaux : architecture modulaire (émetteur, récepteur, traitement signal, traitement données) mais l'intégration des fonctions CNI fut limitée dans un premier temps à un équipement intégré VOR/ILS/MLS et réalisé pour le Rafale (voir la page suivante).

En effet, aller plus loin aurait nécessité de relever des défis technologiques (composants intégrés AsGa, problèmes de refroidissement et de logiciels de reconfiguration).

Radio communication

Cette période a été marquée par l'adoption par l'armée de l'Air de certains standards OTAN, comme la radio UHF *Have Quick, Have Quick II*, puis SATURN (sauts en fréquence de plus en plus rapide contre le brouillage), ces développements furent financés par le STTE/AVI sur Études communes armée de l'Air.

DE SINTAC (1^{ère} phase lancée en 1976 et 2^{ème} phase en 1979), système intégré d'identification, de navigation, de contrôle de trafic, d'anticollision et de communication : les travaux de Thomson sur SINTAC (récepteur JTIDS¹³⁵ sous la forme d'un rack, peu différent du JTIDS *class 1*¹³⁶), ont débouché sur son interopérabilité avec un JTIDS *class 2*¹³⁷, essais effectués en Grande Bretagne. Ces travaux ont permis à Thomson d'être l'un des industriels majeurs de la coopération MIDS¹³⁸ à cinq pays¹³⁹ (mêmes fonctionnalités que le JTIDS Class 2, mais d'un volume de 15 litres au lieu de 60 !).

L'utilisation de la liaison 16 va modifier profondément l'emploi des avions d'armes, car la mise à jour de la connaissance de l'environnement opérationnel et de l'affectation des tâches s'effectue en temps réel, par transmission entre station de commandement (sol ou AWACS) et avions d'armes et entre les avions d'armes eux-mêmes.

Cette tendance existe également dans l'Aviation civile, les ordres ou consignes sont transmis à l'avion par une liaison numérique : le mode S. D'où, par rapport à la phonie, un gain de temps et une réduction des risques de mauvaise interprétation.

¹³² Voir le chapitre « L'évolution vers les systèmes ».

¹³³ ICNIA : *Integrated communication navigation identification avionic*.

¹³⁴ INEWIS : *Integrated navigation and electronic warfare system*.

¹³⁵ JTIDS : *Joint tactical information distribution system*.

¹³⁶ Équipant les AWACS américains.

¹³⁷ Équipant les F-15 et les AWACS britanniques et français.

¹³⁸ MIDS, *Multifunctional information distribution system*.

¹³⁹ Allemagne, Espagne, États-unis, France, Italie.

Radio navigation

Localisation :

Les années 1980 furent marquées par le lancement aux États-Unis du système GPS/Navstar. Le STTE/AVI finança les premiers travaux de Thomson sur le récepteur GPS PPS (Precise positioning system)¹⁴⁰. Le premier récepteur Thomson avait un volume de plus de 100 litres. Il fallut de nombreux travaux d'intégration, de réalisation de VLSI, etc. pour atteindre le volume des équipements actuels (moins d'un litre). Les industriels Thomson, Crouzet et SAGEM proposèrent des équipements GPS PPS pour avions et hélicoptères. Par ailleurs, le STTE/AVI finança aussi Crouzet, qui possédait un savoir-faire en navigation (calculateur Nadir, et inertiel Totem avec SFENA, sur Transall), pour un récepteur de navigation OMEGA, qui permit d'équiper les Transall et les Atlantique.

Atterrissage :

Des travaux ont été lancés par le STTA, puis le STTE/AVI sur le MLS (*Microwave landing system* - standard Aviation civile) destiné à être un successeur de l'ILS ; car beaucoup moins sensible aux perturbations radioélectriques et permettant en particulier de faire des approches courbes. Thomson a réalisé une station sol, financée par l'Aviation civile, et des équipements de bord : un équipement mixte VOR/ILS/MLS équipe le Rafale (voir la page précédente)

Identification

L'évolution du radar de pointe avant (balayage électronique deux plans) du Rafale a nécessité, pour la fonction identification (IFF), le développement d'antennes à balayage électronique spécifiques (travaux Thomson financés par le STTE/AVI), montées sur la pointe avant en arrière du radôme. Sur le Mirage 2000, l'antenne de l'interrogateur IFF était fixée sur l'antenne mobile du radar (RDI).

3 - LES DEVELOPPEMENTS SYSTEMES DANS LES AVIONS CIVILS¹⁴¹

Le paragraphe précédent traitant surtout des avions militaires, le présent paragraphe est consacré aux développements systèmes dans les avions de transport.

L'Aérospatiale (ou les sociétés qui l'ont constitué au cours des âges) a souvent innové dans la conception des avions de transport.

3.1 - Caravelle

Elle a introduit trois innovations principales :

- Une innovation d'architecture avec les *moteurs à l'arrière*, disposition qui a été retenue ensuite sur le DC9 et sur beaucoup d'avions surtout de capacité modeste.

¹⁴⁰ Mode réservé aux militaires de l'OTAN (P comme pays de l'OTAN ou précision OTAN ?).

¹⁴¹ Par Pierre Lecomte. Pour les avions militaires, les développements systèmes sont abondamment décrits par Daniel Lerouge et Georges Bousquet dans le chapitre 23 du tome II de l'ouvrage COMAERO sur les avions militaires, ainsi qu'au début du tome II de celui sur les équipements.

- Caravelle a été le premier avion civil de transport muni de *servo-commandes irréversibles*, sans secours manuel direct, ce qui conduisait à la nécessité d'efforts artificiels au niveau des commandes et au caractère essentiel de l'alimentation hydraulique, à une époque où les avions américains (Boeing 707 par exemple) étaient équipés de boosters réversibles avec *tabs*, etc. L'histoire a montré que Caravelle définissait la bonne voie. Cette disposition était couramment pratiquée sur les avions de combat, mais les contraintes réglementaires et de sécurité étaient différentes. La certification d'une telle architecture a constitué une première.
- Caravelle a été le premier avion civil à effectuer des *approches catégorie 3* en service commercial normal avec passagers (premier atterrissage à Lyon en janvier 1969). Le système, analogique effectuait des approches et atterrissages automatiques. La sécurité était assurée notamment par le contrôle du mouvement du centre de gravité (détection d'écarts excessifs) mais aussi du mouvement autour du centre de gravité (ampleur des corrections et cohérence des mouvements et des ordres). Par la suite, l'atterrissage tous temps est resté un domaine d'excellence d'Aérospatiale avec des performances accrues sur Concorde et sur tous les Airbus¹⁴².

3.2 - Concorde

Concorde était lui-même une innovation à tous égards.

Les aspects matériaux, aérodynamiques et moteurs ont été traités plus haut.

- L'ampleur du domaine de vol et la variété des problèmes à résoudre ont donné une grande importance aux systèmes. Les diverses régulations et automatismes étaient assurés par des calculateurs analogiques, sauf pour la régulation des entrées d'air assurée par des calculateurs digitaux, développés par le partenaire britannique, BAC.
- Concorde a volé avec des *commandes de vol électriques* à pleine autorité dès 1969 et il a été le premier avion commercial ainsi équipé. Il s'agissait de CDVE analogiques avec un dernier secours mécanique, commandes doublées, mais autosurveillées (donc sans vote entre les chaînes, suivant l'architecture développée à l'Aérospatiale) avec leurs générations électriques propres (1800 Hz) et segmentées en trois ensembles, un pour chaque paire d'élevons, si bien que dans les séquences de pannes, on pouvait éventuellement avoir un passage en mécanique sur une paire, les autres restant en électrique et gardant les fonctions de stabilisation. Le passage total en mécanique avait de ce fait une probabilité extrêmement faible, mais l'avion demeurait néanmoins contrôlable.
- Ce type de commande était en fait une nécessité pour assurer la précision de pilotage et les stabilisations requises. On peut aussi noter que les CDVE étaient utilisées pour le contrôle de certains modes souples.
- De plus, c'est à l'occasion de Concorde qu'a été développée une méthodologie détaillée *d'études de sécurité*, unique alors dans le monde aéronautique et très en avance sur ce qui se faisait "ailleurs". Cette méthodologie a depuis été appliquée sur les avions suivants (les Airbus).

¹⁴² Il est arrivé que, dans des conditions météo exécrables à New York, Concorde ait été le seul avion autorisé à atterrir.

Après Concorde, les recherches et développements systèmes étaient organisés autour de deux thèmes fédérateurs :

3.3 - Les CDVE.

Il s'agissait de définir, de mettre au point un ensemble de commandes de vol digitales sans aucun secours mécanique et, en temps utile, d'être capable de les certifier.

Après de nombreuses études et essais de laboratoire, deux expérimentations en vol ont été conduites. Profitant de l'existence de servo-commandes électro-hydrauliques, une expérimentation a été conduite (1978) sur le Concorde de présérie n°1 où un poste a été transformé avec un système de commande digital et une commande par minimanche, l'autre poste de commande assurant la sécurité. Cette expérimentation a permis une première validation de l'architecture, des algorithmes et des lois de commande. Par la suite, l'A300 n°3, plus représentatif, a été modifié de manière analogue pour expérimentation.

Ceci a permis de faire un pas de plus sur l'A310 sur lequel, les ailerons étant demeurés classiques, les spoilers, ainsi que les aérofreins, sont passés en commandes électriques digitales sans secours mécanique. Le premier vol de l'A310 a eu lieu au printemps 1982.

L'architecture retenue comportait des chaînes auto-surveillées, donc sans comparaison entre les chaînes. Les commandes de vol étant essentielles pour la sécurité du vol, il fallait aussi définir une méthodologie d'écriture des logiciels et une méthodologie pour les « certifier ».

Les avantages des CDVE sont considérables :

- un gain de poids et une simplification importants ;
- une amélioration notable des qualités de vol, avec la possibilité d'avoir des qualités de vol quasi identiques d'un type d'avion à un autre, facilitant la qualification des équipages ;
- combinée avec l'utilisation d'un mini-manche latéral, une amélioration de la visibilité de la planche de bord avec la possibilité d'installer des tablettes devant les pilotes ;
- la possibilité d'introduire dans les calculateurs des fonctions de protection du domaine de vol (vis-à-vis du décrochage, des excursions à des vitesses excessives ou à des inclinaisons latérales excessives, etc.) ;
- la voie ouverte à tout type de CAG, puisque la panne totale des CDVE est exclue et que les coefficients de la mécanique du vol sont déterminés en tenant compte des CDVE.

Le système a pu être totalement certifié sur l'A320. Les A330 et A340 ont été équipés de systèmes du même type. Cet ensemble s'est révélé très en avance sur les concurrents américains et rend partiellement compte de la percée commerciale du 320

3.4 - EPOPEE

Ce programme, fédérateur de nombreuses études, avait deux finalités principales :¹⁴³

¹⁴³ Noter qu' EPOPEE dispose depuis le début de son propre simulateur.

- Améliorer la *sécurité* en réduisant les risques d'erreur d'équipage ou en minimisant les conséquences.
- Traiter correctement *l'équipage à deux* (désir des Compagnies pour des raisons économiques). Les avions antérieurs en service en équipage à deux disposaient d'aménagements consistant plus ou moins en des « replâtrages » de postes conçus pour trois personnes. En revanche, l'idée ici était de réaliser ce qu'on a appelé un FFCC (*Forward facing crew cockpit*) dans lequel les informations et les actions destinées antérieurement au mécano étaient transférés aux pilotes, mais d'une manière qui évite l'encombrement du poste et n'augmente pas la charge de travail des pilotes.

Tirant profit de la disponibilité d'écrans cathodiques avionnables et de « boutons poussoirs intelligents » (voir plus loin), une étude fut conduite d'un système de visualisation multi-fonctions appelé ensuite ECAM (*Electronic centralized aircraft monitoring*). Deux écrans cathodiques situés sur la planche de bord entre les deux pilotes étaient dévolus aux systèmes. En fonctionnement normal sans aucune anomalie, ces écrans présentaient uniquement les quelques informations utiles pour la phase de vol considérée (les pilotes pouvaient toujours faire figurer sur demande et transitoirement les informations concernant un système particulier). En cas d'une anomalie ou d'une panne, ces écrans présentaient le système concerné (généralement sous forme de synoptiques) avec identification de la panne, la check-list correspondant à la situation (avec contrôle de son exécution) et les éventuelles limitations ou consignes pour la poursuite du vol (par exemple, majoration des vitesses d'approche de x knots ou nœuds, message qui réapparaîtra au début de la phase d'approche).

Toutes les commandes des systèmes étaient situées sur un panneau plafond, qui présentait des synoptiques, image de ceux qui étaient figurés sur les écrans cathodiques. Si une action s'avérait nécessaire au titre de la check-list (une coupure de pompe par exemple), celle-ci s'exécutait « dans » le synoptique plafond sous forme d'un bouton poussoir situé à l'endroit *ad hoc* du synoptique, bouton susceptible de plusieurs présentations (couleur, messages... par exemple pour la pompe, le bouton poussoir était situé à l'endroit de la pompe dans le synoptique, illuminé de façon appropriée). On en arrivait à une conception du cockpit « éteint », en situation normale ou correctement traitée. La conduite des systèmes était ainsi grandement simplifiée avec une nette diminution des risques d'erreur.

Par ailleurs, ont été définies les figurations des deux écrans cathodiques présentés devant chaque pilote, le PFD (*Primary flight display*) et ND (*Navigation display*), avec le même souci de présentation synthétique et de minimisation des risques d'erreur par une figuration des vitesses ou altitudes caractéristiques etc.

C'est l'A310 qui fut le premier avion à bénéficier de cette recherche (à l'exception des minimanches). A l'époque de sa sortie, l'A310 était sur ce point très en avance sur ce qui se faisait ailleurs. Avec quelques améliorations, cette disposition a été retenue sur les A320, A330 et A340 (figures 55 et 56).

Cette réalisation, combinée avec les CDVE, facilitait considérablement la qualification des équipages sur d'autres avions de la famille, une fois qualifiés sur l'un d'entre eux.



Fig. 55
poste de pilotage de la Caravelle X



Fig. 56
poste de pilotage de l'Airbus A320

EPOPEE existe toujours mais est bien sûr constamment et profondément évolutif, attestant l'effort permanent pour la conception des postes d'équipage et l'ergonomie, sujets essentiels pour la sécurité.

4 - LES RADARS AÉROPORTÉS DE CONDUITE DE TIR¹⁴⁴

4.1 - Historique

L'évolution des radars aéroportés de conduite de tir et celle des avions de combat sont étroitement liées. Les progrès de l'électronique, d'une part, l'amélioration des performances des avions et des missiles aéroportés, d'autre part, ont conduit à la réalisation de véritables systèmes d'armes capables, grâce aussi à l'utilisation des techniques numériques, d'effectuer des missions multiples, ce qui a complètement transformé la conception et l'emploi des avions de combat modernes.

Du fait que l'avion de combat moderne est devenu un système d'armes, les fonctions du radar de bord n'ont cessé de s'étendre. Elles comprennent :

- l'acquisition et la poursuite automatique de cibles aériennes,
- la recherche et la conduite de tir sur cibles au sol,
- l'aide à la navigation et la cartographie,
- le suivi de terrain et l'évitement d'obstacles pour la pénétration à basse altitude.

L'idéal est un radar de pointe avant, compact et léger, capable d'assurer, avec une seule antenne, ces différentes tâches simultanément, tout en restant aussi discret et aussi insensible que possible aux interférences et aux contre-mesures adverses.

Pour les avions de combat français, on peut distinguer quatre périodes :

- la naissance des premiers radars aéroportés, au cours de la décennie des années 1950
- la décennie des années 1960, qui est celle du radar Cyrano, sous ses différentes versions
- la période des radars Doppler pour Mirage 2000, de 1975 à 1990
- la période du radar à balayage électronique RBE 2, pour le Rafale, à partir de 1990.

4.2 - Les premiers radars aéroportés

En 1952, les avions d'armes qui marquent le renouveau de l'industrie aéronautique française, les Ouragan, Mystère IV, Super Mystère SMB2 de Dassault sont encore des chasseurs de jour, dépourvus de radars (qu'il aurait été, d'ailleurs très difficile à implanter dans des pointes avant réservées aux entrées d'air des turboréacteurs). En 1954, le STTA lance un appel d'offres pour l'étude d'un système complet de veille, poursuite et visualisation du but, destiné à équiper le Vautour, projet de chasseur-bombardier biplace de la SNCASO. La CSF remporte le marché et le premier radar DRAC 25, en bande X, vole en 1955. Sa fonction essentielle est le combat air-air, avec conduite de tir canon sur un point futur calculé à partir de la

¹⁴⁴ Par Jean Carpentier.

distance et de la vitesse radiale données par le radar et des vitesses angulaires relatives données par des gyromètres montés sur l'antenne.

En 1956-1957, le DRAC 26, qui comporte une voie de poursuite missile par alignement sur le faisceau radar, est essayé à Colomb-Béchar. Le radar DRAC 32 est une version du DRAC 25 produite en série, avec une puissance portée à 300 kW crête / 300 W moyens, soit le triple de celle du DRAC 25.

Il faut noter que, au cours de cette période, deux concepts distincts se sont affrontés :

- missile équipé d'une électronique peu coûteuse, guidé par un radar aéroporté doté d'une voie de poursuite missile spécifique (concept soutenu par Nord Aviation et Thomson) ;
- missile équipé d'une électronique plus élaborée, ouvrant la voie aux missiles autoguidés (concept proposé par MATRA et EMD).

Bien que le radar DRAC modifié ait tenu ses promesses pour le guidage par alignement, ce procédé imposait des facteurs de charge importants et exigeait une précision des mesures angulaires incompatibles avec une antenne de faible diamètre. Il fallait passer à la navigation proportionnelle. Celle-ci était réalisée par le missile air-air MATRA 530, équipé d'un autodirecteur semi-actif qui utilisait la réflexion, sur la cible, de l'onde émise par l'avion tireur.

La voie des missiles à autodirecteur actif allait suivre ultérieurement et permettre le « tir et oubli ».

4.3 - Le radar Cyrano

En 1957, il faut équiper le nouvel intercepteur Mirage III C, avec un radar doté des fonctions de veille, poursuite, tir canon et guidage de missiles. La société EMD propose le Super Aïda, dérivé du radar à balayage conique Aïda, réalisé, en 100 exemplaires, pour les Etendard IV de l'Aéronavale. En juillet 1958, l'équipe CSF, menée par Guy Le Parquier, présente une maquette qui comporte de réelles innovations : tube à entretien d'image, maîtrise du diagramme d'antenne, technique de refroidissement. Il s'agit d'un radar monopulse qui a l'avantage de mesurer, à chaque émission, le dépointage en site et en gisement et permet la mesure Doppler, ce que ne faisait pas la technique de scanning de l'Aïda qui nécessitait plusieurs tours pour la mesure de l'écart et interdisait le doppler. La solution CSF est retenue et commercialisée sous le nom de Cyrano. Le Cyrano I est suivi du Cyrano II, sans fonction guidage de missile, mais avec visualisation sol et détection d'obstacles, pour équiper le Mirage III E. Ce radar connaît un grand succès, notamment à l'exportation et est fabriqué en un millier d'exemplaires.

Ultérieurement, le Cyrano III, à transistors et circuits intégrés, est conçu pour se substituer au Cyrano II sans modification de câblage, ni de présentation. Il donne naissance au Cyrano IV qui équipe le Mirage F 1. Il faut obtenir une portée plus grande, pouvoir traiter des cibles de grandes dimensions avec des points brillants très fluctuants, effectuer le tir canon en aveugle, assurer la poursuite automatique des brouilleurs et améliorer l'élimination des échos fixes. Après une période de tâtonnements, la fiabilité est accrue grâce au passage à la technologie numérique qui est appliquée à la fin des années 1970. C'est le Cyrano IV M qui équipe la plupart des Mirage F1 de l'Armée de l'air.

4.4 - Radars doppler pour Mirage 2000

Au début des années 1970, la pénétration à basse altitude s'impose pour éviter les conduites de tir sol-air à guidage radar. Les Américains montrent la voie avec le programme F 14 Tomcat et F 15 Eagle, dotés de radar pulse-doppler et de contre-mesures électroniques, et capables de détruire aussi bien des avions volant à grande vitesse et à haute altitude que des avions volant au ras du sol.

D'autre part, il apparaît que les radars à Basse fréquence de répétition (BFR), conçus pour la fonction de poursuite sur cible unique et utilisant une antenne à réflexion, de type Cassegrain, associée au principe du monopulse, qui faisait en France le succès du radar Cyrano de CSF, ne répondent plus à ce besoin de radars multifonction.

La voie du balayage électronique commence à être défrichée avec le développement exploratoire Abeille (DE 71504, 1^{er} DE DTCA) lancé en 1972 et mené conjointement par Thomson-CSF et par ESD. Il permet d'évaluer une antenne de type *reflect array*, destinée à un futur radar bande X, capable d'assurer simultanément les fonctions de veille 3D, la poursuite automatique sur une ou deux cibles, et la cartographie au sol.

Mais cette avancée paraît prématurée et, pendant deux décennies, les radaristes français privilégient des solutions intermédiaires. La priorité est mise sur le traitement Doppler, avec la mise en cohérence des émissions BFR, au moyen de tubes à ondes progressives (TOP) : le Radar doppler multifonctions (RDM) en 1985. Puis c'est le Radar doppler à impulsions (RDI) en 1996, pour équiper le Mirage 2000. Ce sont des radars Doppler HFR (Haute fréquence de répétition) qui conservent le pointage mécanique de l'antenne. Le RDI est destiné au Mirage 2000 DA de défense aérienne, alors que l'Antilope est choisi comme radar de suivi de terrain pour le Mirage 2000 N (une des composantes aériennes de la FNS) et pour le Mirage 2000 D (pénétration). La maîtrise d'œuvre est partagée entre Thomson-CSF et ESD, ce qui marque la fin d'une longue période de compétition franco-française dans le domaine des radars aéroportés.

Après le lancement du programme Mirage F1, l'Armée de l'air souhaite se doter d'un bimoteur lourd d'intervention. Tout d'abord, on explore la voie de la flèche variable, avec deux prototypes de Mirage G8. Le coût s'annonçant prohibitif, on revient à la voilure fixe avec l'ACF (Avion de combat futur) lancé en 1975, mais il apparaît bientôt que la France ne pourra pas se payer un avion de cette classe (biréacteur de 20 tonnes à vide).

Marcel Dassault, soucieux de conserver la place conquise dans l'exportation, avec les avions multirôles légers, avait, dès 1972, lancé sur fonds propres, l'étude d'un monoréacteur à aile delta, ayant l'allure extérieure des Mirage III, mais disposant du réacteur SNECMA M 53, de commandes électriques de vol, de matériaux composites et d'un système de navigation et d'attaque numérisé, avec digibus. C'est le « Delta 2000 ».

Quatre mois après la décision d'arrêt de l'ACF prise fin 1975, le programme Mirage 2000 est lancé sur la base du Delta 2000. La vocation privilégiée reste la supériorité aérienne, mais une version biplace est prévue pour la pénétration et l'attaque au sol, ainsi que pour l'entraînement à la défense aérienne. En 1979, le lancement de la version biplace pour la pénétration et l'emport du missile nucléaire ASMP est confirmé.

En 1976, le STTA lance le contrat pour le RDI, futur radar du Mirage 2000 DA de défense aérienne. Mais, pour pouvoir proposer un radar doté de capacités de détection vers le bas supérieures à celles du Cyrano IV M, Thomson-CSF lance, sur fonds propres, le Cyrano 500. Celui-ci est, par la suite, baptisé Radar doppler multifonctions (RDM) pour bien marquer la rupture avec les générations précédentes. Il s'agit, notamment, de proposer à l'exportation un avion multirôle ayant, en plus des fonctions de ses prédécesseurs, la capacité de tir des missiles MATRA 530 déjà possédés par certains clients et aussi la capacité de tir vers le bas compatible avec l'emploi du futur missile MATRA Super 530. Ceci conduit Thomson-CSF à choisir le mode BFR (Basse fréquence de récurrence) qui ouvre la voie au traitement Doppler requis pour la détection vers le bas.

Le radar RDM est un radar à basse fréquence de récurrence, en bande X, à émission pilotée cohérente et agile en fréquence. Il est entièrement numérique. L'antenne est de type Cassegrain inversé, comme pour le Cyrano IV. L'émetteur est un tube à ondes progressives à impulsions. Toutes les fonctions sont gérées par un calculateur interne qui associe une unité arithmétique programmable à une unité logique programmable, conférant au radar une grande souplesse pour traiter :

- la fonction air-air, en mode recherche grande portée ou en mode poursuite sur informations discontinues ou en mode sur informations continues ;
- la fonction Combat rapproché ;
- la fonction air-sol, en visualisation ou en découpe iso-altitude ;
- la fonction air-mer, en recherche non Doppler (mer force inférieure à 3) ou en recherche Doppler (mer force supérieure à 3).

Le radar RDM est capable du tir de missiles Super 530 qui nécessitent d'illuminer la cible par radar. Pour le tir du missile Super 530 D à autoguidage semi-actif à traitement Doppler, il faut adjoindre au radar RDM un illuminateur continu. Le radar RDM permet aussi le tir de missiles MATRA 550 Magic à guidage infrarouge, le tir canon et la désignation d'objectifs au missile air-mer Aérospatiale AM 39 Exocet.

Le radar RDI est un radar à haute fréquence de récurrence, optimisé pour la détection et la poursuite à grande distance de cibles rapides en rapprochement, quelle que soit leur altitude. Il présente les mêmes interfaces avion que le RDM, mais :

- l'antenne Cassegrain inversée du RDM est remplacée par une antenne à fentes (avec dipôles IFF) qui présente un meilleur taux de lobes secondaires
- l'émetteur à TOP à impulsions crête 120 kW et 400 W moyens est remplacé par un TOP de 4 kW crête et de puissance moyenne 800 W.
- le pilote à quartz du RDM est remplacé par un synthétiseur de fréquences asservi au déplacement de l'avion par rapport au sol, pour aider à la réjection des échos de sol.

Le radar RDY met à profit les études RACAAS, notamment sur un émetteur bicrête, un processeur programmable, le mode MFR et l'antenne à faible inertie.

C'est un pulse-Doppler multiforme d'onde (HFR, MFR, BFR), qui comporte plusieurs fonctions en modes air-air et air-sol. Il réalise la synthèse des radars RDM et RDI et intègre la technologie des années 1980. En particulier, il fait appel, pour les traitements numériques, aux circuits intégrés conçus à la demande (ASICs, *Application specific integrated circuits*). Il est doté d'un émetteur nouveau à TOP,

capable de modes BFR ou MFR à 32 kW crête et de mode HFR à 4 kW crête. Une voie spécifique pour les « contre-contre-mesures » est ajoutée.

Le RDY équipe le Mirage 2000-5, destiné à l'exportation, qui sort en série en mai 1996 (1^{er} vol en 1990). Il permet au Mirage 2000-5 d'acquérir la capacité multicible avec le missile MICA¹⁴⁵ : son système d'armes a pour cela l'avantage d'avoir pu bénéficier des travaux lancés en 1983, pour le Rafale, sur la conduite de tir multicible (DE lancé en 1983 par le STPA) et la séparation du missile de l'avion porteur par éjection (DE 80503 lancé en 1980). Comme ce sera le cas pour le Rafale, le tir des missiles MICA se fait par éjection à partir des points d'emport sous fuselage, permettant un emport semi-encastré avantageux pour l'aérodynamique et la furtivité, par opposition au tir sur rail (DE lancé par le STPA en 1980, avec essai de modélisation aérodynamique en soufflerie, voir le fascicule Centre et moyens d'essais).

4.5 - Le radar RBE 2 pour Rafale

Aux États-Unis, après que l'*USAF Avionics Laboratory* ait lancé en 1978 le démonstrateur EAR (*Electronic agile radar*), Westinghouse développe, pour le B1-B, le radar multi-fonctions à balayage électronique AN/APQ-164 et en dérive de nombreux éléments communs pour le radar APG-68 destiné au nouveau chasseur F 16.

L'industrie française réagit, à l'occasion du lancement du programme Rafale. Il s'agit d'un avion de combat polyvalent qui nécessite un radar multi-modes assurant les fonctions de veille aérienne, de conduite de tir, de suivi de terrain et évitement d'obstacles, et d'attaque air-sol ou air-mer.

Les études préliminaires de Thomson-CSF, de 1981 à 1988, sur le démonstrateur RACAAS, (Radar de combat aérien et d'appui au sol, DE lancé en 1980 par le STTA) permettent le choix du RBE 2 (Radar à balayage électronique deux plans), dont le développement est confié à un consortium industriel associant Thomson-CSF et ESD. Le RBE 2 utilise une technique originale, mise au point, à partir de 1973, par C. Chekroun, de la société RADANT (contraction de radome antenne), petite société innovante, bénéficiaire de contrats d'études DRET et de deux DE lancés par le STTA respectivement en 1978 et 1981 (la société RADANT rejoignit ensuite le groupe Thomson-CSF).

L'antenne Radant fonctionne comme une lentille-réseau, illuminée par un TOP, elle est constituée de deux galettes croisées. Chaque galette comporte un grand nombre de canaux, dans lesquels sont introduits des diodes PIN. La combinaison des états des diodes successives d'un même canal produit un déphasage qui assure la déflexion du faisceau, comme le ferait un prisme. On obtient ainsi des déphasages très précis, avec des lobes secondaires bas, tout en limitant les pertes d'insertion qui sont le principal inconvénient des déphaseurs à diodes. Une fois maîtrisée, cette technologie nouvelle allait faire du Rafale, en 1991, le premier avion de combat occidental doté d'un radar à balayage électronique qui lui confie une véritable capacité multifonctions.

¹⁴⁵ Le MICA, premier missile à électronique entièrement numérisée, est un missile air-air à autoguidage actif EMD, pulse Doppler, et pouvant être tiré sur coordonnées. Une liaison hyperfréquence avion missile permet aussi de rafraîchir en cours de vol les données de la cible.

Le RBE 2 résulte d'un programme conjoint de l'Aéronavale et de l'Armée de l'Air. Alors que les radars du Mirage 2000 marquaient le passage au traitement Doppler et à la détection des cibles vers le bas à grande distance, le RBE 2 marque le passage au balayage électronique de l'antenne et à l'entrelacement de fonctions multiples. C'est ce que l'on a appelé la « polyvalence élargie ».

Le radar RBE 2 assure :

- les modes air-air et air-surface, du RDM ;
- les fonctions de détection vers le bas, du RDI ;
- la capacité de tir simultané de plusieurs missiles, du RDY ;
- la capacité de suivi de terrain, de l'Antilope IV.

La simultanéité de ces différents modes impose le balayage électronique de l'antenne. Celle-ci, de type Radant, est protégée par un radôme à couches multiples pour permettre le fonctionnement dans une large bande de fréquences. Une préamplification hyperfréquences est réalisée à l'aide de transistors à effet de champ, refroidis pour améliorer le facteur de bruit.

La décision du Ministre date de décembre 1988. Le premier vol du prototype a lieu sur Mystère 20 en 1992. Le premier vol d'un RBE 2 de série est effectué en 1997.

Le radar RBE 2 a été le premier radar à balayage électronique en production de série pour un avion de combat polyvalent. Il a un réel potentiel d'évolution. En particulier, le remplacement de l'antenne Radant par une antenne active permettant d'augmenter la portée pourrait être envisagé sans qu'il soit nécessaire de refaire un cycle complet de qualification.

Pour mémoire

L'aboutissement le plus achevé du concept d'antenne - réseau à balayage électronique dans deux plans est l'antenne active où les éléments de l'antenne ne sont plus seulement des déphaseurs, mais de véritables sources indépendantes qui émettent chacune une fraction de la puissance totale du radar. Grâce à ce nouveau concept, le radar pourrait être réalisé intégralement en technologie état - solide, avec des composants de puissance à base de transistors en Si ou en AsGa.

4.6 - Expérimentation des radars

Les nouveaux systèmes d'armes, particulièrement radars et conduites de tir, font l'objet de simulations chez Dassault Aviation sur ses moyens OASIS à Istres, d'essais de qualification au CELAR au Bruz, d'évaluations pilotées en vol au CEV d'Istres, de tirs de missiles au CEL de Biscarosse, ainsi qu'ensuite d'expérimentations par l'armée de l'Air au CEAM à Mont-de-Marsan et par la Marine au CEPA de Saint-Raphaël. Le système d'armes du Rafale, qui intègre les capteurs multifonction que sont l'OSF, optronique secteur frontal (passif donc discret), le RBE2 et le système d'autoprotection et de contre-mesures SPECTRA, bénéficie largement de toutes ces structures.

Citons notamment les moyens dont dispose le CELAR, établissement de la DMA qui évalue les capacités des nouveaux systèmes d'armes et leur vulnérabilité. Ils comprennent :

- des bancs destinés à évaluer les radars de conduite de tir aéroportés et les autodirecteurs de missiles en ambiance de guerre électronique, simulant

l'environnement complexe réel : BEDYRA, mis en service 1987, pour les radars et auto-directeurs en ondes centimétriques, BEDYSSO, mis en service en 1986, pour les auto-directeurs en infra-rouge, et BEDYMI, mis en service en 1991, pour les auto-directeurs en ondes millimétriques) ;

- des bancs destinés aux mesures des signatures électromagnétiques des missiles et aéronefs (chambre anéchoïque CHEOPS, chambre hyperfréquence pour l'évaluation optimale des signatures, créée en 1972, et base SOLANGE, système orientable lourd pour aéronefs et gros engins).

Pour mémoire : Le CELAR, Centre d'électronique de l'armement, est créé en 1968 au sein du Service central des télécommunications et de l'informatique, direction technique de la DMA créée en 1965, qui prendra en 1984 le nom de direction de l'électronique et de l'informatique (dirigée successivement par les IG Jacques Alberge en 1969, Gilbert Margier en 1984, Pierre Givaudon en 1986 et Michel Javelot de 1990 à 1995). Il bénéficie en 1970 du rattachement des laboratoires du STTA (à Palaiseau et rue de la Convention) qui sont progressivement transférés au Bruz, près de Rennes, où il s'est installé.

5 - ERGONOMIE DES POSTES D'EQUIPAGE : INTERFACE HOMME-MACHINE ET FACTEURS HUMAINS

Les études ergonomiques, qui visent à optimiser l'ensemble du système homme-machine, sont menées, sur le plan étatique, principalement par le Centre d'études et de recherches de médecine aérospatiale (CERMA, organisme de la DCSSA rattaché à l'IMASSA, Institut de médecine aérospatiale du Service de santé des armées, à sa création), le CEV, le LAMAS, Laboratoire de médecine aérospatiale (issu du Laboratoire d'études médico-physiologiques, LMP, créé au CEV à Brétigny en 1957 en même temps qu'on y installe une centrifugeuse humaine et un caisson d'altitude) et le Laboratoire d'anthropologie appliquée (LAA). Elles ont porté sur :

- la définition de normes pour les postes d'équipages résultant des nouvelles techniques de photogrammétrie et de biostéréométrie laser, qui permettent de déterminer avec précision l'espace nécessaire à un sujet tout équipé,
- les techniques de visualisation à base d'optique holographique (études Sextant 1977-1994) : appliquées sur la visu collimateur tête haute ou CTH (utilisée comme instrument de pilotage depuis Jaguar et Étendard), la visu tactique intermédiaire (transition tête haute/tête basse, concept déjà présent sur Mirage 2000-5, appliqué sur le Rafale), le viseur-visuel de casque (intégré au système d'armes du Rafale, il permet de disposer de la symbologie de vol et d'attaque ; développé par Sextant Avionique et Inter technique ; les premiers vols ont eu lieu en septembre 1995),
- les commandes intégrées aux poignées (années 1980) : mini-manche de pilotage et manette des gaz : concept M3, Mains sur Manche et Manette, ou HOTAS, *Hands on throttle and stick*, qui autorise des commandes du système
- la commande vocale (dialogue vocal entre le système renseignant avec une voie synthétique et le pilote), issue des travaux sur la synthèse et la reconnaissance de la parole qui ont démarré dans les années 1970 au LIMSI, laboratoire du Professeur Malavard à la Faculté d'Orsay, non retenue pour le Rafale, mais ayant fait l'objet d'essais dans les années 1990 sur Alphajet et Gazelle.

La définition du cockpit du Rafale est l'aboutissement d'études amont citées ci-dessus et aussi de développements exploratoires lancés par la DGA (DRET et STTE/PNI puis AVI) depuis 1980 auprès de Dassault Aviation et Sextant Avionique : OPE Organisation des postes d'équipage (1980), APIS Aide au pilotage par imagerie synthétique (1985), EVASYVE *Étude de validation de systèmes de visualisation évolués* (1987).

L'étude de l'intégration homme-machine a débuté par la prise en compte de l'ergonomie physique et physiologique, comme on vient de le voir, mais elle concerne aussi l'étude des tâches et des charges de travail. C'est ainsi que la DGA lance dès 1986 des travaux sur le concept de « copilote électronique », système d'assistance au pilote basé sur les techniques d'intelligence artificielle ; avec l'apparition de ces techniques, on peut assister le pilote de façon globale dans les tâches intellectuelles qui induisent une forte charge de travail et l'aider à résoudre les problèmes de prises de décision rencontrés en vol, notamment dans le cas de situations imprévues ou difficiles à analyser. Le STTE poursuit ces études sous forme de DE lancé au début des années 1990, en relation avec un programme du DOD américain sur le « *pilot's associate* ».

L'avènement des techniques numériques dans les années 1980 (avions de type *glass-cockpit*) amène à prendre en compte avec une attention toute particulière l'importance grandissante des facteurs humains, et ce en dépit des progrès en automatisation obtenus sur les équipements. Par ailleurs, dans le transport civil, la réduction de l'équipage à deux pilotes oblige à mieux répartir tâches et charges de travail. Sur le plan de l'environnement opérationnel et des missions, des progrès restent à accomplir¹⁴⁶ sur l'adaptabilité des pilotes à faire face à des situations difficiles ou non prévues, qui, mal gérées, peuvent entraîner oublis ou erreurs. Des études sur le retour d'expérience, l'identification des facteurs d'erreurs et les méthodes d'analyse d'incidents de vol ont été développées depuis le début des années 1980 au profit de la DGAC et des Armées par les IG Jean-Claude Wanner et Pierre Lecomte, en particulier dans le cadre de la société Cinq-Demi qu'ils ont créée. L'ONERA, qui dispose de compétences pluridisciplinaires (il a mené des études dans sa direction des études de synthèse DES sur le comportement du pilote humain ainsi que dans son département DERA du CERT sur le comportement des équipages), et depuis 1992 d'un site au sein de l'École de l'Air à Salon-de-Provence, s'est engagé récemment dans ce domaine de l'ergonomie cognitive, associant la charge mentale à la connaissance du comportement humain, domaine qui a déjà été bien étudié par le département de sciences cognitives et ergonomie de l'IMASSA (médecin-chef des services René Amalberti) et la société EURISCO (*European institut of cognitive sciences and engineering*, créée par Jean Pinet en 1992 et qu'il a présidée jusqu'en 2001, Guy Boy prenant alors sa suite).

¹⁴⁶ « On constate pour les avions de la dernière génération (celle des postes d'équipage à visualisation électronique, ou *glass cockpit*) un taux d'accidents 2 à 3 fois plus faible que pour les avions des générations antérieures, sans pouvoir dire si cela est dû à la plus grande fiabilité des matériels, aux automatismes, ou aux nouvelles méthodes de formation », Jean Pinet, « Facteurs humains : humanisme et éthique en aéronautique », *Annales de l'ANAE*, 1999, page 126.

CHAPITRE 6

EFFETS ATMOSPHÉRIQUES ENVIRONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE¹⁴⁷

1 - LA FOUDRE

La protection contre la foudre s'impose pour tous les véhicules aériens et pour les lanceurs spatiaux. Les programmes d'avions civils Concorde et Airbus, ainsi que les programmes d'avions militaires Mirage et Rafale et le programme Ariane ont bénéficié des résultats des recherches entreprises par l'ONERA, avec le soutien de la DRET et de la DTCA.

L'étude du foudrolement des avions a débuté dans les années 1970. Le CEAT s'y consacre depuis 1973 avec l'acquisition d'un générateur de foudrolement, l'ONERA depuis 1976¹⁴⁸. Ces deux organismes participent aux campagnes d'essais menées, à partir de 1984, sur le Transall A 04 du CEV, équipé spécialement pour la mesure du courant de foudrolement et des champs électromagnétiques associés. Le savoir-faire, au début étatique, passe progressivement à l'industrie. Aérospatiale, aux Mureaux et à Suresnes, s'équipe assez tôt. Le laboratoire très haute tension de l'EDF, aux Renardières, apporte son concours. L'ONERA expérimente en 1986 son système SAFIR de surveillance en temps réel de l'activité orageuse, qui est depuis en service opérationnel au Centre spatial guyanais de Kourou, ainsi qu'au CEL.

Lorsqu'en 1976, à l'initiative de la DGA, l'ONERA aborda l'étude du foudrolement des avions lors des vols dans des nuages à forte activité orageuse, peu d'informations quantitatives étaient disponibles : les protections des avions reposaient sur des mesures obtenues avec des décharges de foudre atteignant le sol, ce qui était peu représentatif des phénomènes en vol.

Un réel approfondissement des connaissances s'imposait, d'autant plus que deux grandes tendances se faisaient jour dans la réalisation des avions :

- l'utilisation de plus en plus importante des matériaux composites, comme matériaux de structure
- l'emploi d'équipements électroniques, comme constituants majeurs d'organes vitaux de pilotage, de navigation et de contrôle moteur. La voie vers l'avion à contrôle numérique était tracée. Tout cela n'était pas possible sans une protection de l'avion contre les agressions électromagnétiques, dont la foudre était la plus fréquente, puisque due aux conditions de vol tout temps des avions et hélicoptères, tant militaires que civils.

Cette constatation amena la DGA à lancer des études de base et à financer d'importants programmes d'essais en vol. Sur le plan théorique, l'étude en laboratoire des décharges électriques de surface permet de progresser dans la compréhension des phénomènes. Sur le plan expérimental, des campagnes d'essais

¹⁴⁷ Par Jean Carpentier.

¹⁴⁸ Voir aussi Partie III, Chapitre 1 Avions, paragraphe 1.5 Electrification. Foudre.

en vol furent menées avec l'avion Transall 04 du Centre d'essais en vol de Brétigny. L'expérience Transall se déroula en trois campagnes (1984, 1986, 1988). Il s'agissait de déterminer les conditions atmosphériques qui conduisent à un foudroiement de l'avion et, en cas de foudroiement, de caractériser l'agression, du point de vue électrique et électromagnétique. Ces campagnes fournirent des résultats de grande qualité, grâce à l'instrumentation spécifique installée à bord, sous le contrôle du CEV. Ils permirent de caractériser les processus physiques, notamment ceux de la décharge bidirectionnelle, découverte lors de ces études, qui survient lors de l'amorçage de la décharge de foudre par l'avion lui-même. Grâce à ces expériences, un processus d'attachement et de balayage d'un arc de foudre sur une structure d'avion fut également observé pour la première fois.

Le programme Transall permet de constituer une banque de données sur 65 événements, dont 60 étaient des foudroiements déclenchés par l'avion, et 5 étaient des foudroiements interceptés par l'avion. Pour les foudroiements déclenchés, l'avion subit des variations rapides et importantes du champ électrostatique : les impulsions ont, typiquement, un temps de montée de 30 nanosecondes et un temps de décroissance de quelques microsecondes, elles se succèdent à des intervalles d'environ 10 millisecondes. La valeur crête du courant est de 20 à 30 kA. L'ensemble de ces études a permis d'optimiser les moyens de protection des avions contre le foudroiement et d'adapter les méthodes de qualification et de certification des équipements aéronautiques vis-à-vis de cet environnement particulièrement dangereux.

En outre, l'ONERA a utilisé les connaissances ainsi acquises pour concevoir le dispositif SAFIR (Système d'alerte foudre par interférométrie radioélectrique). Ce système qui fournit une « alerte foudre » lors des lancements spatiaux, est en service opérationnel au Centre spatial guyanais de Kourou. Il permet de n'autoriser le lancement que dans des conditions atmosphériques qui excluent un foudroiement du lanceur dans sa première phase de vol.

A l'ONERA, pendant une grande partie de la période couverte par le rapport COMAERO, les recherches ont été conduites par une équipe animée par Jean-Louis Boulay dont il faut signaler l'article sur le foudroiement des avions, paru dans le n°148-149 de la revue de l'AAAF (1991-3/4).

Les déperditeurs de potentiel sont destinés à la protection des aéronefs contre l'accumulation de charges électrostatiques en constituant, par effet de pointe, un point de décharge électrique dans l'atmosphère. Les déperditeurs classiques (passifs) s'avèrent suffisants pour les avions, mais la capacité de vol stationnaire dans le cas des hélicoptères pose problème, leur efficacité étant lié au vent relatif.

Il faut noter que la protection du matériel aérospace, surtout militaire, contre la foudre doit être complétée par la protection contre les autres types, non naturels, *d'agressions électromagnétiques*, tels que sont *les champs forts* générés par les émetteurs de forte puissance (radio ou radar ; par exemple émetteurs présents à bord d'un porte-avions), et le cas échéant *l'impulsion électromagnétique d'origine nucléaire* (IEM-N) ainsi que les éventuelles *micro-ondes* de forte puissance. Le Centre d'études de Gramat (CEG) a consacré, dans le cadre de ses missions inter directions, d'importants moyens de simulation à l'étude de la vulnérabilité et du durcissement du matériel vis-à-vis de ces différents types d'agressions. Ses premiers simulateurs IEM-N ont été mis en place, à partir de 1975, sur demande et soutien de la mission Atome de la DGA

L'utilisation grandissante, depuis les années 1970, des matériaux composites dans les structures et d'une électronique fonctionnant avec des intensités de courant de plus en plus faibles rend nécessaire les protections contre les différents types d'agressions électromagnétiques (foudre, champs forts, IEM-N). Doit aussi être prise en compte la compatibilité électromagnétique intra-système, due à l'environnement généré par les équipements du système. La protection fait appel dans tous les cas à une application de quatre processus : faradisation, blindage des liaisons câblées, protections filaires (écrêteurs, filtres), protection des équipements.

2 - LE GIVRAGE DES AERONEFS

Le givrage, sous sa forme la plus fréquente, résulte de la captation et de la congélation de gouttelettes d'eau surfondues présentes dans *certaines nuages* traversés par les aéronefs. Les conditions givrantes sont rencontrées à des altitudes comprises entre 900 m et 7 200 m. Les avions de transport moyen courrier et long courrier ne les rencontrent que dans les phases de montée et de descente, alors que les avions de transport régional et les hélicoptères peuvent les rencontrer durant la totalité de leur vol. Du fait de leur inertie, les gouttelettes heurtent la partie frontale des différentes structures de l'avion ou de l'hélicoptère et engendrent la formation de glace. On distingue deux types de glaces :

- celles qui se forment à une température négative. Les gouttelettes d'eau gèlent. Elles créent des dépôts dont l'importance est maximale près du point d'arrêt et décroît de part et d'autre de celui-ci. Ces dépôts, opaques, sont relativement profilés et ne dégradent que faiblement les qualités aérodynamiques des profils.
- celles qui se forment autour de 0°C. Une part importante de l'eau gèle localement et le reste ruisselle le long du profil et se congèle plus loin en aval. La forme obtenue est dite « en corne ». Cette glace, transparente est très pénalisante, car elle modifie considérablement les profils des voilures, des empennages et des gouvernes des avions ainsi que ceux des pales des rotors des hélicoptères. Pour les moteurs, l'ingestion de glace peut provoquer leur extinction.

La captation croît avec la vitesse de l'écoulement, l'altitude de vol et la finesse du profil (un profil épais capte moins qu'un profil mince). Elle croît aussi avec le diamètre des gouttes contenues dans les nuages. Les stratus, de grande étendue, ont une teneur en eau liquide peu élevée (de 0,1 à 0,9 g/m³). Ils créent un givrage continu, alors que les cumulus, de plus faible étendue, ont généralement une teneur en eau liquide plus élevée, pouvant atteindre 3 g/m³, ce qui crée un givrage important, mais intermittent.

Il existe un autre type de givrage qui se produit *en ciel clair*, lorsque l'aéronef, après avoir traversé des masses d'air à basse température, pénètre dans de l'air plus chaud qui contient de la vapeur d'eau en abondance. Au contact des parties froides de l'appareil, la vapeur d'eau se congèle et produit un dépôt relativement mince qui disparaît quand la structure de l'aéronef est suffisamment réchauffée. Ce type de givrage augmente la traînée des profils, mais ne crée pas de situations catastrophiques. Il pourrait être pénalisant pour les profils laminaires du futur. Aucune protection n'est actuellement prévue contre ce type de glace. Dans ce qui suit, nous ne traiterons donc que de la protection contre le givrage rencontré en zones nuageuses.

Protection contre le givrage

Il existe deux types de protections :

- le dégivrage, qui peut être assuré par des procédés pneumatiques (boudins recouvrant les zones à protéger et gonflés périodiquement pour fractionner la glace qui peut ainsi se détacher) ou par des procédés thermiques (résistances électriques sous le bord d'attaque des pales d'hélicoptères et de certaines entrées d'air).
- l'antigivrage, généralement assuré par de l'air chaud prélevé sur les premiers étages des turbomachines et circulant à l'intérieur des ailes au voisinage du bord d'attaque. L'énergie fournie doit être suffisamment élevée pour produire l'évaporation totale de l'eau (antigivrage sec) ou, au moins, pour en reporter la congélation suffisamment loin du bord d'attaque pour avoir un effet négligeable sur les performances (antigivrage humide).

Certification

Pour être autorisé à voler en conditions givrantes, un aéronef doit :

- être pourvu d'un système de protection minimisant les effets du givre et lui permettant de poursuivre son vol
- être capable, en cas de défaillance de ce système, de se dérouter et de rejoindre l'aérodrome le plus proche, sans que la sécurité des personnes ne soit menacée.

La démonstration de ces possibilités doit être faite par les constructeurs, par des essais en vol, givrage naturel ou en givrage provoqué (nuage artificiel). Cependant, comme les conditions extrêmes ne sont que rarement rencontrées durant les campagnes d'essais en vol, il faut souvent faire appel aux essais en soufflerie. Les conditions givrantes peuvent être naturelles, c'est le cas dans la grande soufflerie S 1 MA de l'ONERA, à Modane-Avrieux, en période hivernale. Elles peuvent aussi être provoquées, par injection de filets d'eau dans l'écoulement d'air refroidi. Les essais en soufflerie présentent l'avantage de pouvoir faire varier les paramètres et de les connaître avec précision. La simulation numérique est la troisième voie. Elle a le grand avantage de pouvoir être utilisée dès la conception. C'est aussi la méthode la moins onéreuse et la plus capable de pouvoir faire varier très largement les paramètres.

L'ONERA a apporté ses moyens d'essais en soufflerie et sa compétence en aérothermique numérique pour assister les constructeurs dans la simulation du givrage. Il s'agissait, d'abord, de comprendre la physique des phénomènes. Une chaîne de calcul bidimensionnelle de captation de glace par un profil d'aile ou de pale a été développée. Elle associe quatre programmes de calcul :

- le champ aérodynamique autour du profil
- la trajectoire des gouttelettes
- l'échange thermique dans la couche limite
- le bilan thermodynamique à la paroi

Les résultats obtenus par cette simulation ont été comparés à des résultats expérimentaux. Les formes de dépôts de glace sont suffisamment proches de la réalité pour que cette chaîne soit reconnue comme un moyen acceptable de certification qui permet de limiter le nombre des essais en vol. L'ONERA continue ses travaux en simulation numérique, avec des codes de calcul en tridimensionnel,

sur des formes correspondant à différentes parties des avions, des hélicoptères et de leurs moteurs.

Il faut souligner que les futurs progrès de l'aérodynamique des avions et des hélicoptères ne seront acquis au plan opérationnel que s'ils sont préservés en conditions givrantes. Il en est de même pour les moteurs. Aussi importe-t-il de poursuivre activement les recherches, telles que les études microphysiques au laboratoire de météorologie physique de Clermont-Ferrand sur les conditions givrantes et celles sur la calibration des souffleries. A l'ONERA, le givrage est étudié par Didier Guffond¹⁴⁹. L'ONERA a porté son effort sur la modélisation numérique et la validation par essais en vol¹⁵⁰.

¹⁴⁹ Cf. article dans la *Revue de l'AAAF* n° 148-149 de 1991-3 et 4.

¹⁵⁰ Voir Partie III, Chapitre 1 Avions, paragraphe 1.5 Givrage.

CHAPITRE 7

IMPACT DU TRAFIC AÉRIEN SUR L'ENVIRONNEMENT¹⁵¹

1 - HISTORIQUE DE LA REGLEMENTATION

Le 7 décembre 1944, était fondée l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) qui était chargée de coordonner le transport aérien au niveau mondial. D'autre part, l'*International air transport association* (IATA), qui avait été créée dès 1919, adoptait en 1945 de nouveaux statuts, avec, pour objectifs, la sécurité, l'efficacité, la rentabilité. Avec le développement considérable du trafic aérien, les contraintes liées à l'environnement sont apparues et ont pris de l'ampleur dans deux domaines :

- les nuisances dont, notamment, le bruit au voisinage des aéroports,
- l'impact sur l'atmosphère, au cours du vol de croisière à haute altitude, ainsi que dans la zone aéroportuaire.

En outre, le bang engendré par le vol supersonique a été considéré comme devant être prohibé au-dessus des zones habitées. Ceci constitua un énorme handicap pour Concorde.

2 - LE BRUIT

Le bruit au voisinage des aéroports fut la nuisance considérée en premier. Il fit l'objet de réglementations de plus en plus sévères (spécifications successives FAR 36-1, FAR 36-2, FAR 36-3, FAR 36-4) sur les avions dont « l'empreinte acoustique » au sol a été fortement réduite.

Période	Réglementation	Niveau de bruit	Type d'avion
1955 – 1969	FAR 36-1	115 EPN dB	B 707, DC 8
1969 – 1976	FAR 36-2	105-110	B 747
1976 – 1990	FAR 36-3	95-102	A320, B 767

La réglementation FAR, chapitre 4 définit le niveau autorisé pour les avions certifiés à partir de 2006, par le cumul de trois mesures normalisées (décollage, travers et survol, approche), exprimées en EPN dB (*Equivalent perceived noise decibel*), dont le total doit être de 10 dB inférieur à celui autorisé par la FAR 36-3.

Cette évolution considérable a été rendue possible par la mise en service des turbo-réacteurs à double flux. Chez ceux-ci, une grande partie de l'air, à la périphérie du flux, subit une compression dans une soufflante de grand diamètre et contourne ensuite le corps central du moteur, sans passer dans le compresseur, la chambre de combustion et la turbine. Cet air dit « secondaire » est mélangé avec l'air « primaire » qui a traversé la totalité du corps central du moteur. Ceci permet de diminuer la vitesse d'éjection des gaz qui peut ainsi être réduite à des valeurs de

¹⁵¹ Par Jean Carpentier.

l'ordre de 450 m/s. En outre, les gradients radiaux de vitesses et de pressions sont diminués. Il en résulte une notable réduction du bruit à la sortie des turboréacteurs modernes qui sont caractérisés par la valeur élevée de leur taux de dilution. Celui-ci est le rapport du débit d'air secondaire au débit d'air primaire. Il est de l'ordre de 0,3 à 1 pour les avions de combat (qui exigent une grande poussée surfacique) mais il est de 5 à 6 pour les moteurs des avions de transport des années 1990 et il atteint des valeurs voisines de 9 pour les moteurs de troisième génération qui sont actuellement mis en service.

L'introduction des turboréacteurs à grand taux de dilution a été très bénéfique, aussi bien pour la réduction du bruit que pour la diminution de la consommation de carburant, comme il sera indiqué ci-après.

Jusqu'à présent, le moteur a été le principal contributeur au bruit, mais les progrès continus dans ce domaine conduisent les aviateurs à chercher à réduire d'autres sources de bruit, telles que celles d'origine aérodynamique créées par la sortie des volets et du train d'atterrissage, dans la phase d'approche. La réduction des nuisances dans les zones aéroportuaires au niveau de 65 dBA constitue un enjeu primordial pour les motoristes et les aviateurs. Les motoristes ont bien identifié les possibilités de gagner 15 EPN dB d'ici 2010. Elles résident dans l'accroissement du taux de dilution qui pourrait atteindre 12 dans les dix prochaines années, ainsi que dans la réduction du bruit à la source (conception optimisée des aubes de soufflantes et de la tuyère), absorption par traitement acoustique des conduits, déviation du jet vers le haut. Ces technologies font l'objet du projet SILENCER, projet européen sous la conduite de SAFRAN.

Les études et les recherches des établissements de la DGA, ainsi que celles de l'ONERA sont rappelées par ailleurs. A noter, en particulier, la soufflerie anéchoïde CEPRA 19, construite et utilisée conjointement par le CEPr et par l'ONERA. Le bruit spécifique des hélicoptères est détaillé dans la troisième partie de cet ouvrage.

3 - LE BANG SONIQUE¹⁵²

Lors du développement et de la mise en exploitation de Concorde, deux autres types de nuisances furent analysés : le bang sonique et l'impact sur l'atmosphère.

Les services de la DMA/DGA, dont, notamment, la DRET, ainsi que l'ONERA et l'ISL, étudièrent le bang sonique produits par les avions de combat et ses effets sur

¹⁵² Bibliographie :

Bang sonique, CEV/Ecole PN, référence EPN n°26, par Jean-Claude Wanner

Rapport ISL n°40/74 revue et synthèse de l'ensemble des travaux effectués sur le bang sonique (1961-74)

Le problème du bang sonique pour de futurs avions de transport à haute vitesse, note technique ONERA 1990-3 par André Auriol, Claude Lecomte et Christian Théry

Le bang sonique, effets sur les structures, synthèse des travaux effectués, cahiers du CSTB, n°186 de janvier-février 1978 ;

Opération « bangavalanches », rapport CEA-CENG-USSTC. Laboratoire ASP 1975 ; présentée par Paul Perroud (CENG) et Claude Lecomte (ONERA) à Davos, 14-19 septembre 1986 (IAHS Publ. n°162, 1987) ;

Opération « Jéricho Carton », essais de focalisation et de superfocalisation de bangs soniques, rapport d'études CEV n°291 (1972), par J.Vallée.

la population, les animaux et les bâtiments ainsi que sur les couches neigeuses instables susceptibles de déclencher des avalanches.

Les études théoriques ont été menées, dès le début des années 1960 par le STAé/Section études générales (dirigée par l'IC Jean-Claude Wanner) et l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (sous la direction de l'IGA André Auriol, et de l'ICA Christian Théry). De nombreuses campagnes de mesures sur l'intensité et la propagation du bang ont été effectuées par le Centre d'essais en vol (Brétigny et Istres) avec le concours de l'ISL qui a apporté ses moyens en calcul et en métrologie. Elles se sont déroulées de novembre 1962 (opération « Jéricho Mirage IV » à Brétigny) à novembre 1969 (opération « Jéricho Carton » à Istres, avec Mirage III B et Mirage IV : essais de focalisation en vol rectiligne accéléré et de superfocalisation en virage). Les mesures avec Concorde ont été faites à Istres en 1969 (Mach 1,3) et 1971 (Mach 2) ainsi qu'en 1973 le long de la côte landaise, près du CEL.

À la fin des années 1960, à la demande du Secrétariat général à l'aviation civile, et sur crédits Concorde, la DRME a lancé, sous la coordination de l'ICA Jacques Balazard, un programme d'études détaillé sur le bang et ses effets. En matière d'effets du bang sur les structures, les études suivantes ont été effectuées par le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) :

- des essais *in situ*, en mars 1971, sur une habitation de style provençal construite, pour la cause, à Saint-Martin de la Crau près d'Istres, destinés à étudier le comportement vibratoire de ses éléments (cloisons, plafonds, vitrages, charpentes...) à des surpressions de crête allant de 1 mb (vol Haute altitude) à 5 mbar (vol Basse altitude), avec un Mirage III (opération Jéricho Casbah).
- des essais de simulation en fatigue, en 1973-75, de cloisons et plafond, au banc du CSTB à Grenoble
- sur une dizaine d'églises de styles différents situées en Bourgogne et en Champagne, choisies par les services des Monuments Historiques, fut entreprise une étude comparative du bang avec d'autres types d'agression (vent, vibrations dues à la circulation routière, tonnerre, orgues,...). Des mesures d'accélération sur clochers, murs, piliers, voûtes..., et de déplacements sur vitraux ont été effectuées en 1971-72, durant huit mois en profitant des bangs produits par les avions militaires au cours de leurs exercices habituels et étaient enregistrées automatiquement (par des CANIBAL, contrôleurs automatiques de niveau de bang local, appareils destinés à détecter, mesurer et enregistrer automatiquement de façon simplifiée et permanente les bangs soniques produits par des avions en vol supersonique dans une région, et fournis par la SESSIA)
- des essais de tenue au bang, au générateur de l'ISL (figures 57 et 58), de cloisons légères type CSTB (seuil de rupture supérieur à 20 mbar), ainsi que de vitraux anciens, réputés fragiles, reproduits par un maître-verrier suivant les techniques de l'époque (endommagement pour des intensités supérieures à 20 mbar)

On peut en conclure que le seuil d'endommagement pour des structures saines se situe bien au-delà du niveau du bang nominal Concorde (intensité de 1 mb, intervalle

de signature de 230 à 300 ms) Mais on ne peut préjuger des désordres qui apparaîtraient sur des éléments de construction mal entretenus ou mal conçus.

Opération bang-avalanches

L'étude de l'effet du bang sur la stabilité du manteau neigeux dans des conditions critiques (déclenchement éventuel d'avalanches) a été confiée au Laboratoire d'Applications spéciales de la physique du Centre d'études nucléaires de Grenoble (CENG/ASP) qui a choisi un site des Alpes, réputé avalancheux tout en étant acceptable sur le plan de la sécurité, le vallon de la Lavey situé dans le massif des Écrins. La trajectoire du survol, effectué par un Mirage III B du CEV d'Istres, a été déterminée par l'ISL (accélération à Mach 1,09 en léger piqué jusqu'à 2 700 m, suivie d'une ressource) et la restitution a été faite par l'ONERA. Quatre vols ont eu lieu (15 mars, 8 avril, 14 et 15 mai 1974), comportant en tout onze passages : seuls les deux passages au cours du premier vol ont provoqué des coulées de neige sous les crêtes de l'aiguille d'Olan, pour une intensité mesurée et calculée dépassant 5 mbars (figure 59). L'expérimentation fut reprise fin 1976 (un vol le 14 décembre) et début 1977 (deux vols les 21 janvier et 25 mars), dans la vallée de l'Arvette (Savoie), suite au classement, entre temps, du massif des Écrins, en Parc National : elle ne donna pas lieu à déclenchement. Au vu des résultats, il semble que le bang se révèle plutôt un mauvais déclencheur d'avalanches.

Ces mesures du bang et de ses effets ont montré la faible importance des bangs « normaux » qui résultent du passage des avions supersoniques en vol rectiligne à vitesse constante, mais, par contre, la valeur notable des « super-bangs » qui résultent de la focalisation des ondes de choc lors des accélérations et des virages. Des consignes très strictes furent données aux appareils de l'armée de l'Air pour éviter la génération de bangs, notamment des super-bangs. Pour l'aviation de transport commercial, le survol en supersonique des régions habitées fut prohibé par le règlement FAR 91-95, édicté en 1973. Cette réglementation fut très pénalisante pour Concorde dont le survol des États-Unis, « coast-to-coast » fut interdit. Par contre, les vols de Concorde, entre Roissy et New York, ainsi qu'entre Heathrow et New York purent être effectués sans problème de bang, le vol supersonique étant effectué au dessus de l'Atlantique.

4 - L'IMPACT SUR L'ATMOSPHERE

L'impact, sur l'atmosphère, du trafic aérien, d'une part en vol de croisière, d'autre part en zone aéroportuaire, est l'objet de préoccupations de plus en plus grandes, du fait de la croissance du trafic aérien ainsi que de la sensibilisation générale aux problèmes environnementaux. Avant d'analyser la contribution aéronautique à ces problèmes, il convient de rappeler l'évolution du trafic aérien et de préciser la nature et la quantité des effluents émis.



ISL

Fig. 57

Vue aérienne du générateur de bang de l'ISL situé sur le terrain d'expériences de Baldersheim (au NW de Mülhouse). Mis en service en 1971, il reproduit des ondes de choc en N, d'intensité entre 0,5 et 50 mbar et de durée jusqu'à 0,3 s, dans une chambre de mesure (section $2,5 \times 2,5 \text{ m}^2$, longueur 3m).

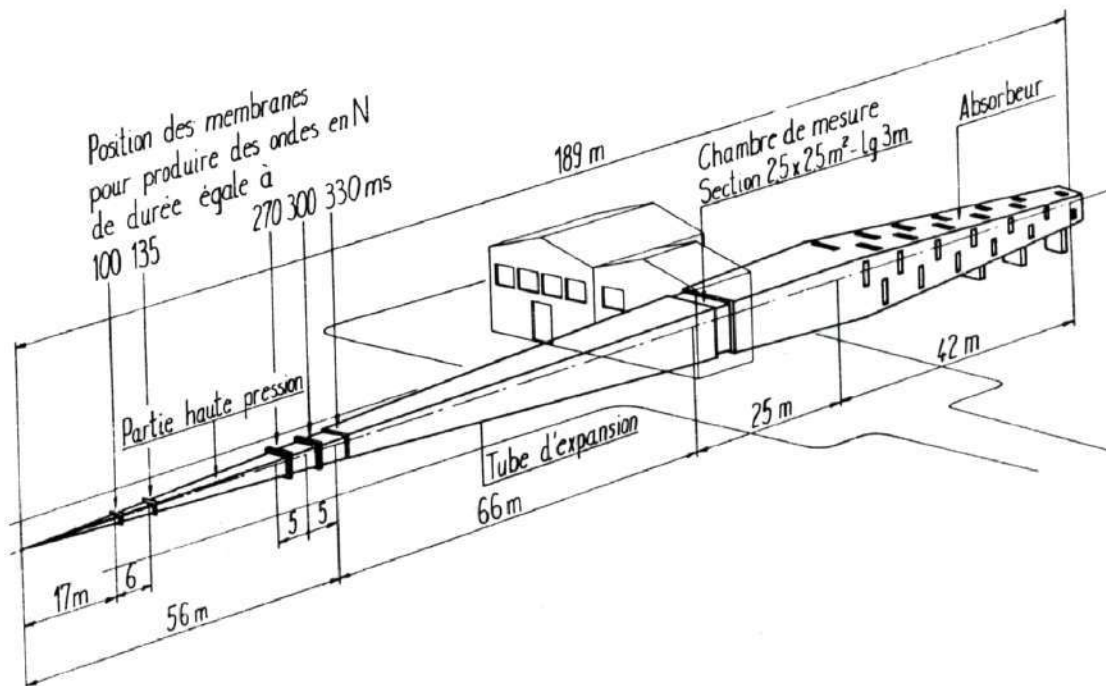


Fig. 58

Schéma côté du générateur de bang, depuis la chambre motrice jusqu'à l'absorbeur

Saint Christophe-en-Oisans

VALLON DE LA LAVEY

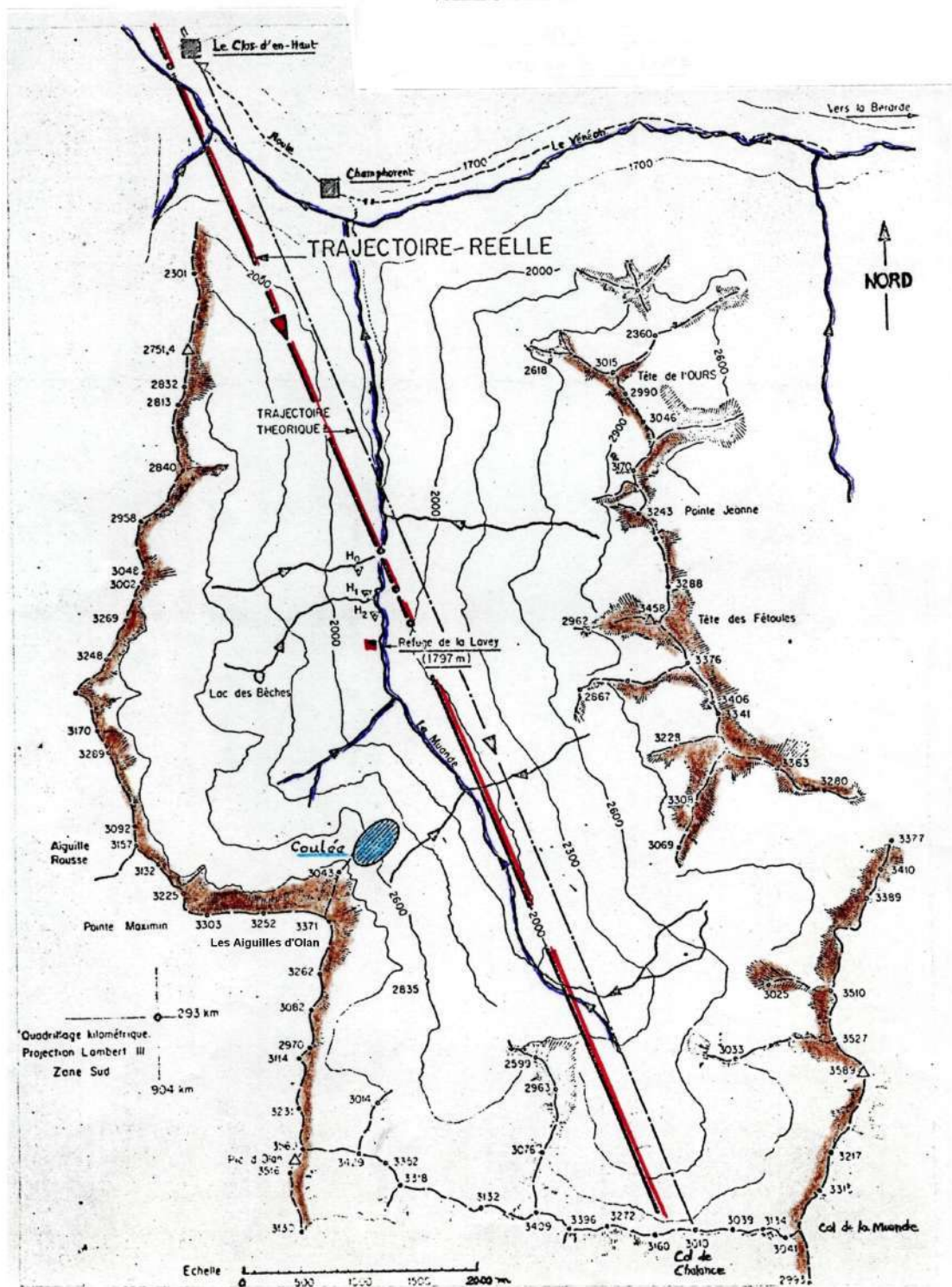


Fig. 59

Effet du bang sur le déclenchement des avalanches : trajectoires de vol théorique et réelle du Mirage III B du CEV dans le vallon de la Lavey, commune de St Christophe-en-Oisans (massif des Écrins). La zone hachurée correspond à la coulée de neige partie de l'aiguille d'Olan à proximité de la courbe de focalisation

4.1 - Évolution du trafic aérien

L'avènement des avions de transport à réaction engendra une croissance annuelle du trafic de :

- 10% à 20% au cours de la décennie 1961 -1970
- 10% au cours de la décennie 1971-1980
- 6% au cours de la décennie 1981-1990
- 5% depuis 1991

Les prévisions qui tiennent compte d'hypothèses réalistes sur la croissance mondiale et sur l'augmentation du prix du carburant, hypothèses qui sont antagonistes, conduisent à estimer que le taux de croissance annuel du trafic descendra à 3% vers 2040-2050. Le taux de progression de la consommation de carburant serait plus faible, en raison des efforts sur les turboréacteurs, sur les cellules d'avions, sur l'avionique et sur la gestion du contrôle aérien.

Le Conseil consultatif pour la recherche aéronautique en Europe, ACARE (*Advisory council for aeronautical research in Europe*) a fixé pour objectif, à l'horizon 2020, une économie de carburant de 50% par rapport à l'an 2000. Cette économie serait répartie comme suit :

- de -20% à -25% pour les cellules d'avions
- de -15% à -20% pour les moteurs
- de -10% pour la navigation aérienne.

Cet objectif est très ambitieux, car il faut rappeler que l'effort déjà entrepris pour maîtriser la consommation de carburant est considérable.

Pour les turboréacteurs, la consommation spécifique, exprimée en kilogramme de kérosène par déca-newton de poussée et par heure était de :

- 1,2 pour les moteurs qui équipaient les premiers avions militaires à réaction
- 1 à 1,2 pour les moteurs des premiers avions civils de transport à réaction (Boeing 707, Douglas DC 8, Caravelle)
- 0,60 à 0,65 pour les turboréacteurs double flux équipant les Boeing 747 et les premiers Airbus
- 0,5 pour les moteurs actuels.

Parallèlement à ces progrès sur les moteurs, des améliorations importantes ont été obtenues sur les cellules des avions de transport. L'aérodynamique de la voilure a été perfectionnée, la masse à vide a été diminuée par l'emploi progressif de matériaux composites.

En outre, l'avionique a été complètement renouvelée, avec les commandes de vol électriques et la conception des planches de bord électroniques qui ont permis d'optimiser le pilotage et la navigation.

Il en est résulté que la consommation du transport aérien, exprimée en kilogramme de carburant par siège- kilomètre, a passé de 0,05 en 1960 à 0,025 en 2000.

Ceci revient à dire que, avec un taux de remplissage de 100%, pour transporter un passager sur 100 km, il fallait, en 1960, 4,15 litres de kérosène, et qu'il suffit de 2,10 litres en 2000.

Ces chiffres montrent la compétitivité de l'avion de transport avec l'automobile. Ils soulignent aussi l'ampleur des efforts qu'il conviendra de faire pour tenter d'atteindre

l'objectif fixé par ACARE qui revient à obtenir une consommation de 1 litre par 100 km-passager en 2020.

L'objectif ACARE est nettement plus ambitieux que celui qui a été retenu dans les rapports de l'ANAE mentionnés plus haut. Ceux-ci se basaient sur une hypothèse de croissance du transport aérien commercial, qui passerait de 4 000 milliards de PKT (Passagers-kilomètres transportés) en l'an 2000 à 10 000 milliards en l'an 2020, et admettaient que la consommation kilométrique par siège passerait de 2,5 à 2,1 kilogramme. Dans ces conditions, le carburant consommé serait de 319 mégatonnes (Mt) au lieu de 162 Mt en 2000. En ajoutant les quantités de carburant consommé par les activités militaires et par l'aviation générale, on aboutit à un total de 345 Mt en 2020, à comparer au total de 191 Mt en 2000. Le carburant aéronautique consommé serait donc 1,8 fois plus important en 2020, alors que le trafic aérien civil aurait été multiplié par 2,5. Si l'objectif souhaité par ACARE était atteint, la consommation de carburant en 2020 serait de 190 Mt. Il y aurait donc stabilisation, les efforts de réduction de la consommation compensant exactement l'accroissement du trafic.

4.2 - Les effluents du trafic aérien et leurs effets

Les effluents des avions sont :

- les produits de combustion complète : gaz carbonique et vapeur d'eau
- les produits de combustion incomplète : monoxyde de carbone et suie
- les hydrocarbures imbrûlés
- les produits de combustion d'une partie du soufre existant dans le carburant (conservé en raison de ses propriétés lubrifiantes)
- les produits de réaction partielle entre les deux principaux constituants de l'air (azote et oxygène) lorsqu'ils sont à haute température : oxydes d'azote NO et NO₂.

4.3 - Les effluents majoritaires (gaz carbonique et vapeur d'eau)

Le dioxyde de carbone (CO₂)

Tous les effluents sont émis proportionnellement à la consommation de carburant des avions, qui est d'environ 3% de la totalité du combustible brûlé du fait des activités humaines (2% si on inclut la déforestation). Il en résulte que leurs effets sur l'atmosphère peuvent être considérés comme relativement faibles (2% à 3% sont dans la marge d'incertitude des variations naturelles ou anthropiques) s'ils ne sont pas spécifiques, mais, par contre, doivent être analysés en détail s'ils sont spécifiques, liés à des effets in situ dans les tranches d'atmosphère où volent les avions. Les effets du gaz carbonique émis par le trafic aérien sont totalement noyés au sein de ceux créés par toutes les autres émissions anthropiques de CO₂. En effet, le CO₂ est parfaitement mélangé dans l'atmosphère naturelle et sa concentration relative ne varie pas sensiblement avec l'altitude (environ 360 ppmv ou 360 10⁻⁶ en volume). Les émissions de gaz carbonique produites par les avions n'ont donc pas un caractère spécifique.

Globalement, le transport aérien commercial émettait 150 g de CO₂ par passager-km en 1970. Les progrès sur la consommation de carburant ont réduit cette émission à 75 g en 1990. Les progrès attendus des recherches en cours conduiraient à une valeur de 50 g en 2010. Ceci est à comparer aux émissions dues à l'automobile. Pour celle-ci, la norme européenne édictée en 1990 était de 170 g/km. Les voitures

sortant actuellement émettent 150 g/km. En 2008, la norme européenne serait de 140 g/km. Ces valeurs montrent que le transport aérien d'un passager est environ deux fois moins polluant que le transport d'une personne en automobile et que, en 2010, il le sera près de trois fois. L'équivalence sera obtenue pour le transport de trois personnes dans la même voiture. Il est évident que cette comparaison postule que le coefficient de remplissage de l'avion est voisin de 100% et que le vol est optimisé, sans attentes au sol et en vol. En contrepartie, les valeurs indiquées pour l'automobile supposent qu'il n'y a pas de congestion du trafic, car les moteurs ne sont pas optimisés pour tourner au ralenti. Enfin, sauf en cas de nécessité, les vols s'effectuent sensiblement en ligne droite, alors que le franchissement de régions montagneuses oblige à des trajets routiers allongés. On peut en conclure que les efforts entrepris pour réduire la consommation, par passager-kilomètre, des avions de transport les mettent au moins au même niveau que la voiture automobile, en ce qui concerne les émissions de CO₂ et leur contribution à l'effet de serre anthropique.

La vapeur d'eau

Par contre, les effets de l'autre effluent majeur, la vapeur d'eau, ne peuvent être considérés seulement d'un point de vue global. En effet, le contenu de l'atmosphère en vapeur d'eau décroît rapidement en fonction de l'altitude, depuis le sol jusqu'à la tropopause. Il en résulte que l'importance relative de la vapeur d'eau émise par les avions de transport subsoniques, en vol de croisière des avions aux altitudes de 8 à 12 km dans la haute troposphère, est plus grande qu'au niveau du sol. Cette importance relative est encore plus grande lorsque le vol de croisière s'effectue dans la basse stratosphère qui est caractérisée par une très faible teneur en vapeur d'eau. C'est le cas des vols aux latitudes élevées, car la tropopause, qui est la limite entre la troposphère et la stratosphère, a une altitude de 8 000 m au-dessus des pôles, alors qu'au-dessus de l'équateur elle se situe à une altitude de 17 000 m. Pour les vols de croisière dans la troposphère, la vapeur d'eau émise se condense en gouttelettes qui croissent rapidement, gèlent et continuent de croître sous forme de cristaux de glace qui constituent des traînées de condensation (*contrails*). L'importance et la durée de ces *contrails* dépendent de la teneur de l'atmosphère en vapeur d'eau : le trafic aérien constitue un excellent hygromètre indicateur de l'humidité de la haute troposphère et peut permettre une prévision du temps à court terme. Si l'atmosphère n'est pas saturée en vapeur d'eau, les traînées se subliment rapidement. Dans les jeunes traînées, les particules de glace sont très nombreuses (concentration supérieure à 1 000/cm³), mais très petites (diamètre de l'ordre du micromètre). Lorsque la traînée se prolonge et dure jusqu'à une heure, la concentration des particules diminue de deux à trois ordres de grandeur, alors que leur dimension croît jusqu'à 10 micromètres, avec des formes compliquées, à l'inverse de la forme sphérique des micro-particules initiales. Les caractéristiques physiques, notamment les propriétés optiques, se rapprochent alors beaucoup de celles des cirrus naturels.

L'effet radiatif des traînées de condensation se compose :

- d'un effet d'albédo : la traînée renvoie vers l'espace une partie du rayonnement solaire, ce qui produit un refroidissement de la surface du sol concernée. Cet effet ne se produit que de jour.
- d'un effet de serre : l'émission thermique de la traînée vers le sol compense, partiellement, le rayonnement infrarouge émis par le sol, de jour comme de nuit

Globalement, l'effet de serre l'emporte sur l'effet d'albédo, de sorte que les traînées de condensation produisent un échauffement du système Terre-Atmosphère.

En conclusion, les traînées des avions produiraient un forçage radiatif positif dont la contribution à l'effet de serre anthropique est très difficile à estimer : selon les auteurs, il varie de 0,01 à 0,03 W/m². Cet effet est à comparer à celui créé par les nuages. Aux altitudes des vols de croisière, ce sont principalement des cirrus. Ceux-ci recouvrent environ 30% de la surface terrestre. Principalement composés de particules de glace, ils laissent passer le rayonnement solaire dans sa partie UV/visible, mais ils réfléchissent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et par les nuages bas. Dans les zones tropicales, le bilan radiatif des cirrus sub-visibles serait de l'ordre de 0,5 W/m².

Outre sa contribution à l'effet de serre, la vapeur d'eau émise par les avions en vol de croisière produit d'autres effets sur l'atmosphère. Elle contribue aux réactions, en phases homogènes ou en phases hétérogènes, à la surface des traînées de condensation et des aérosols formés par les suies et les hydrocarbures imbrûlés. En outre, la présence simultanée d'ozone et de vapeur d'eau conduit à la formation du radical OH, très réactif, qui est à l'origine de nombreuses espèces chimiques.

4.4 - Les effluents minoritaires

Ils comprennent :

- *le monoxyde de carbone et les hydrocarbures imbrûlés*, qui résultent d'une combustion incomplète. Les progrès techniques sur les compresseurs, les chambres de combustion et sur les turbines ont conduit, pour les régimes élevés, à des valeurs très voisines de un pour le rendement de combustion, de sorte que les émissions d'oxyde de carbone et d'hydrocarbures imbrûlés ne sont significatives qu'aux bas régimes, tels que ceux du roulage au sol.
- *les sulfates* qui résultent des traces de soufre dans le kérosène, traces qui sont de l'ordre de 0,4 g/kg de carburant (les spécifications imposent une limite de 3 g/kg). Les sulfates constituent de fines gouttelettes dans le jet et sont des noyaux de condensation pour la vapeur d'eau.
- *les suies*. Les particules de suie (carbone) sont formées dans les zones riches des chambres de combustion. Quantitativement, la production de suie est très faible, de l'ordre de 0,04 g/kg de carburant, mais les particules de suie sont très fines, de 0,05 à 0,5 micromètres et sont très nombreuses. A la suite de phénomènes physico-chimiques à leur surface, elles deviennent des noyaux de condensation pour la vapeur d'eau et les sulfates
- *les oxydes d'azote*

Pour les effluents majoritaires (gaz carbonique et vapeur d'eau), les efforts pour réduire la consommation de carburant ont été et seront toujours directement profitables. Mais certains des procédés utilisés ont été néfastes pour la production des oxydes d'azote. Ceux-ci sont parmi les plus importants effluents minoritaires.

Les oxydes d'azote émis par les avions n'ont pas d'effet direct sur le climat, car ce ne sont pas des gaz à effet de serre. Par contre, ils jouent un rôle important dans la production d'ozone (qui est un gaz à effet de serre) dans la troposphère, par le biais de réactions photochimiques dues au rayonnement ultraviolet du soleil. Ils se mélangent avec les autres émissions d'origine anthropique et contribuent ainsi, très partiellement, à la production d'ozone troposphérique.

Dans la stratosphère, les oxydes d'azote interviennent sur l'ozone selon la teneur de l'atmosphère en composés halogénés : ils peuvent avoir un effet positif en freinant l'action destructrice des composés halogénés ou un effet négatif lorsque ceux-ci sont absents. Le « trou d'ozone » observé dans les zones polaires et principalement au-dessus du continent antarctique est essentiellement dû aux espèces chlorées et bromées agissant, en réactions de chimie hétérogène à la surface des nuages stratosphériques polaires lorsque ceux-ci sont éclairés par le soleil. Il en résulte que les oxydes d'azote provenant du trafic aérien aux hautes latitudes ont un effet qui restera négligeable tant que la teneur en espèces halogénées sera importante, ce qui semble le cas jusqu'en 2050.

4.5 - Effets sur l'ozone

Historiquement, l'impact du trafic aérien sur l'atmosphère resta relativement dans l'ombre jusqu'à la perspective de la mise en service du Concorde en 1976.

L'impact sur l'atmosphère, notamment sur la stratosphère, aux altitudes des vols de croisière des avions de transport conçus pour voler à Mach 2 à 2,2, entre 15 000 et 18 000 mètres, fit l'objet d'une vive controverse qui pouvait mettre en question l'avenir du programme Concorde. En 1971, un rapport américain présenta des conclusions alarmantes concernant l'impact, sur l'ozone stratosphérique, des oxydes d'azote émis par Concorde en croisière supersonique. Aussi un effort de recherche fut-il décidé en France (1972-76) pour l'étude des conséquences des vols stratosphériques (COVOS¹⁵³), sous l'égide du professeur Edmond Brun¹⁵⁴. Les études théoriques et les expérimentations suscitées par le COVOS, dont, notamment, les mesures faites par l'ONERA, en coopération avec l'Institut d'aéronomie spatiale de Belgique (IASB), à l'aide du spectromètre à grille conçu par André Girard de l'ONERA, permirent d'aboutir, en 1976, à la conclusion suivante :

« Une flotte de cent Concorde produirait une réduction d'ozone impossible à déceler. Son incidence biologique serait tout à fait négligeable. Au cas où la flotte stratosphérique se développerait considérablement, on pourrait réduire le taux d'oxydes d'azote dans les effluents, mais la nécessité de modifier la combustion dans les moteurs n'apparaît pas à l'heure actuelle »

La découverte, en 1974, de l'impact, sur l'ozone stratosphérique, des composés halogénés, en particulier des chlorofluorocarbures (CFC) résultant des activités humaines conduisit à relativiser l'effet des émissions d'oxydes d'azote. Ce sont, en fait, les espèces halogénées (brome, chlore et fluor) qui jouent le rôle principal sur la réduction de l'ozone stratosphérique.

Par contre, l'effet des oxydes d'azote sur l'atmosphère troposphérique conduit à la production d'ozone, ce qui contribue à l'effet de serre. En outre, leur effet à basse altitude, comme au sol, est incontestable. Les effets biologiques de l'ozone et les effets propres aux oxydes d'azote (pluies acides) sur les régions survolées, sur la population, les animaux et la végétation conduisirent à des réglementations concernant les vols de croisière et pour les cycles décollage-atterrissage, pour tout

¹⁵³ Comité d'études sur les conséquences des vols stratosphériques.

¹⁵⁴ Docteur ès-sciences, professeur de mécanique des fluides à la faculté des sciences de Paris et directeur du laboratoire d'aérothermique du CNRS à Meudon (1942-70), établit le premier, en 1947, la relation donnant la densité du flux de chaleur au nez d'un missile (aux USA, en 1952). Président de l'IAF (1962-1967), membre de l'Académie des sciences (1969).

type d'avion de transport. Ces réglementations, édictées par l'Annexe 16 (Protection de l'environnement) à la Convention de Chicago de l'OACI (Organisation de l'aviation civile internationale) établie en 1981 et amendée en 1988 et 1993, sont pleinement justifiées pour deux raisons :

- au sol et aux basses altitudes, les oxydes d'azote se combinent partiellement avec l'oxygène de l'air pour former de l'ozone qui, outre ses effets biologiques, est un gaz à effet de serre.
- les oxydes d'azote émis par les avions sont principalement produits aux régimes moteurs élevés, tels que le décollage et la montée.

4.6 - Effets sur l'air aéroportuaire

Mais c'est l'impact des oxydes d'azote sur l'air aéroportuaire qui est le plus préoccupant. En effet, la production des oxydes d'azote (NOx) croît avec la température et la pression au sein de la chambre de combustion. Ils sont principalement produits aux régimes moteurs élevés, tels que ceux du décollage (où la poussée est maximale 100 %) et de la montée (poussée au taux de 85%). L'OACI a depuis longtemps donné la priorité à la réduction des NOx, les normes qu'elle émet sont de plus en plus sévères (CAEP). La production d'oxydes d'azote sur un cycle LTO (*Landing and take off*) est réglementée par l'OACI, sous la forme d'un indice d'émission exprimé en g de NOx par unité de poussée maximale et par classes de poussée (CAEP 4 et 6). Cependant, les mesures dans les aéroports permettent difficilement de séparer ce qui est dû au trafic aérien de ce qui est produit par les activités énergétiques aéroportuaires, par le trafic automobile voisin et de ce qui est lié au climat régional.

Pour diminuer la production des NOx, il faut éviter de créer des zones à très haute température (combustion stoechiométrique) en organisant la combustion soit en mélange pauvre (excès d'air), soit en mélange riche (excès de kérosène), dans tous les régimes du moteur durant son fonctionnement.

Fin 1997, la Commission européenne a établi une directive imposant une réduction de l'émission des oxydes d'azote de 33% par rapport à la norme initiale de l'OACI.

L'objectif ACARE pour les NOx est une diminution de 80% en 2020 par rapport à leur valeur en 2000. Ceci correspond à une diminution de 60% de la production de NOx ramenée à la poussée, ce qui est ambitieux. D'ores et déjà, on peut espérer que, grâce aux recherches en cours, l'indice d'émission des oxydes d'azote, exprimé en g/kg de carburant, qui était de l'ordre de 15 en 1990, descendra à 7,5 en 2010. Le transport aérien serait, en l'an 2010, trois fois plus efficace en carburant et neuf fois moins polluant en oxydes d'azote qu'en 1970.

Cependant, la qualité de l'air aéroportuaire dépend aussi des autres espèces minoritaires produites pendant les phases de roulage, de décollage et d'atterrissage : monoxyde de carbone, suies, hydrocarbures imbrûlés. Les particules fines, en majorité les suies, prennent une importance croissante, en raison de leurs effets biologiques. Il en est de même pour les hydrocarbures imbrûlés qui sont cancérigènes. Il importe donc de réduire la durée des phases à faible régime de rotation des moteurs. La gestion du trafic aérien au sol joue un rôle important, notamment pour la réduction du roulage et des attentes en bout de piste.

4.7 - Contribution du trafic aérien à l'effet de serre anthropique

Aux préoccupations concernant les effets évoqués ci-dessus, s'est ajoutée celle relative à l'effet de serre d'origine anthropique. Le Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (GIEC ou IPCC, *Intergovernmental panel on climate change*) étudie l'impact de l'ensemble des activités humaines, en particulier du trafic aérien, avec plusieurs hypothèses de croissance, en tenant compte des progrès techniques envisageables à l'horizon 2020.

De son côté, l'Académie nationale de l'Air et de l'Espace (ANAE) a rédigé plusieurs rapports sur l'impact du trafic aérien sur l'atmosphère. Dans le rapport le plus récent, le transport supersonique commercial n'a pas été retenu : à Mach 2, la consommation de carburant par passager-kilomètre transporté (PKT) est 3 à 4 fois celle d'un avion de transport subsonique conçu pour le vol de croisière économique à Mach 0,8. Ceci a des conséquences directes sur les émissions d'effluents, notamment de gaz carbonique qui a un impact notable sur l'effet de serre.

De même, l'objectif ACARE mentionné plus haut concerne le trafic aérien essentiellement subsonique dont il est souhaité que son accroissement soit entièrement compensé par la réduction de la consommation de carburant par passager kilomètre.

Comment atteindre un tel objectif ? Il faut poursuivre les efforts et en engager de nouveaux dans plusieurs voies simultanément :

Améliorer la propulsion : ce fut la principale voie d'amélioration qui a permis les gains cités plus haut depuis l'avènement des turboréacteurs. On peut encore accroître le rendement propulsif en augmentant le taux de dilution : des valeurs de l'ordre de 12 sont envisageables, elles sont sans doute à la limite des possibilités du fait des dimensions nécessaires pour les soufflantes. Quant au rendement thermique, l'augmentation de la température d'entrée turbine (TET) exige des matériaux hautement thermorésistants et des techniques de refroidissement des aubes et des disques de turbines encore améliorées. En outre, ces améliorations du rendement thermique se font aux dépens du bruit et de la production d'oxydes d'azote. Il y a donc, pour le rendement thermique, conflit entre les préoccupations économiques et certaines de celles relatives à l'environnement, alors que pour le rendement propulsif, il y a gain sur les deux plans. Le gain sur la consommation spécifique pourrait être, à l'horizon 2020, de l'ordre de 10%, ce qui conduirait à une valeur de 0,45. Pour aller au-delà et atteindre l'objectif ACARE, il sera sans doute nécessaire de passer à une autre architecture, par exemple celle des moteurs à hélice rapide, dont la formule a été testée vers 1990. Mais ceci ne peut convenir que pour des avions court-courriers ou moyen-courriers volant à des vitesses inférieures à Mach 0,8. En outre, le bruit externe et le bruit interne seraient accrus. L'implantation des moteurs sur la cellule devrait aussi être revue.

Améliorer les cellules : des progrès en aérodynamique sont encore possibles, surtout si on les conjugue avec ceux sur les matériaux. Des ailes en composites peuvent avoir un allongement plus grand et donc une finesse plus élevée. Ce gain en finesse aérodynamique est appréciable, notamment si le vol de croisière s'effectue à une vitesse un peu plus faible que la vitesse actuelle. Cependant, le véritable gain en réduction de la traînée aérodynamique sera obtenu avec la laminarisation de la couche limite. Les expérimentations en vol doivent se poursuivre, elles pourraient

aboutir à l'exploitation d'avions ayant des parties d'ailes et d'empennages à écoulement laminaire. Une autre voie prometteuse est celle de la diminution de la masse à vide, par l'emploi généralisé de matériaux composites. La part des matériaux composites dans la cellule, qui est aujourd'hui de l'ordre de 25%, pourrait atteindre 65 %. Le gain en masse (voisin de 20% par rapport aux alliages d'aluminium) entraînerait une réduction de consommation de 5% à 10%.

En ajoutant les gains à attendre des progrès sur les moteurs et sur les cellules, on pourrait donc atteindre, à l'horizon 2020, une réduction de la consommation d'environ 20%, c'est-à-dire la moitié de celle souhaitée par ACARE.

Optimiser la mission : Pour améliorer l'efficacité de la consommation de carburant, on peut jouer sur les caractéristiques de la mission, telles que le rayon d'action, la vitesse, la capacité ainsi que sur l'aménagement intérieur.

Augmenter le rayon d'action réduit le nombre des phases de roulement au sol, de décollage et de montée, qui sont dispendieuses en carburant, mais accroît la surconsommation due à l'emport de carburant et à la masse à vide plus élevée qui en résulte. Pour le passager, fragmenter un trajet de 15 000 km en trois étapes de 5 000 km semble peu attractif.

Diminuer la vitesse de croisière présenterait plusieurs avantages :

- réduction de la traînée de compressibilité
- augmentation du rendement de propulsion
- diminution de la masse de l'aile qui peut avoir des profils un peu plus épais.

On peut ainsi envisager de descendre le nombre de Mach de croisière un peu en dessous de Mach 0,8.

Diminuer la capacité semble avantageux du point de vue de la mission en elle-même, puisque la masse à vide est ainsi réduite. A technologie identique et à même rayon d'action, la consommation unitaire est optimale pour une capacité voisine de 200 sièges, elle croît au-delà. Mais globalement, pour un flux total de passagers vers la même destination, le résultat est différent, aussi bien pour les compagnies aériennes que pour le contrôle aérien et sur le plan des nuisances de bruit et d'impact atmosphérique. C'est tout l'intérêt des avions à grande capacité, tels que l'A380.

Utiliser les progrès de l'avionique à bord pour qui faciliter la gestion des tâches de l'équipage et lui permettre d'échanger, à chaque instant, avec le contrôle aérien, les données nécessaires à la conduite de la navigation

Optimiser la gestion du trafic aérien.

L'organisation Eurocontrol, créée dès 1960, a contribué au développement du transport aérien en Europe. La fin du XX^e siècle a vu la mise en place de la gestion centralisée des plans de vol. Le programme SESAR (*Single European sky ATM research programme*) a pour but de moderniser le système de gestion du trafic aérien (ATM : *Air Traffic Management*) en Europe. Sa mise en place devrait conduire en 2020, malgré un doublement des mouvements, à une réduction de 5% à 12% du carburant consommé. Ceci serait obtenu grâce à :

- l'utilisation flexible de l'espace aérien, en particulier des zones militaires
- l'optimisation des trajectoires et des flux de trafic

Il faut noter aussi que l'introduction d'un marché des émissions de CO₂ devrait avoir un effet positif sur l'efficacité énergétique du réseau de routes européen.

4.8 - Conclusion concernant l'impact sur l'environnement

Le développement considérable du trafic aérien, depuis la mise en service des avions de transport à réaction, a suscité de vives préoccupations concernant son impact sur l'environnement.

Le bruit au voisinage des aéroports a fait l'objet de réglementations de plus en plus sévères. Celles-ci ont pu être respectées grâce à un effort continu des motoristes : l'introduction des turboréacteurs double-flux a permis, avec un taux de dilution de plus en plus élevé, de diminuer notablement le bruit, en même temps que la consommation de carburant.

Pour le bang sonique, les expérimentations menées, par l'ISL et l'ONERA, sous l'impulsion de la DMA/DGA et de la DGAC, ont facilité l'exploitation de Concorde au-dessus de l'Atlantique Nord.

L'impact sur l'atmosphère, moins facile à identifier et à mesurer au sein des variations naturelles et des effets des émissions anthropiques dues aux activités humaines au sol, a fait l'objet de nombreuses études centrées sur les conséquences sur l'ozone atmosphérique, sur l'air aéroportuaire, et sur la contribution à l'effet de serre. Ces études ont été menées conjointement, en coopération internationale, par les laboratoires universitaires, les organismes de recherche et les industriels de l'aéronautique. De nombreuses expérimentations en vol ont été effectuées et ont conduit à une meilleure connaissance de l'atmosphère et de l'impact du trafic aérien. En France, il faut rappeler les travaux du COSEFA (Conséquences, sur l'environnement, d'une flotte aérienne), ceux du Comité avion-ozone, ainsi que ceux de l'ANAE (Académie nationale de l'Air et de l'Espace), effectués en collaboration avec l'Académie des Sciences.

L'impact dans les zones aéroportuaires ne présente pas de spécificité propre à l'aviation et peut être étudié avec les mêmes méthodes que pour les autres sources de pollution atmosphérique au sol. L'effet des oxydes d'azote et des autres effluents minoritaires a été précisé. La réglementation de l'OACI a conduit à une réduction très notable de l'émission des oxydes d'azote émis par les moteurs aux régimes de décollage et de montée.

La spécificité du trafic aérien est due à l'altitude des vols de croisière des avions de transport commercial. Celle-ci se situe entre 8 000 et 12 000 mètres, ce qui correspond, selon les latitudes, à la haute troposphère ou à la basse stratosphère.

L'impact des oxydes d'azote émis par les avions crée un faible accroissement de la teneur de la troposphère en ozone, alors que, sur l'ozone stratosphérique, l'effet est négligeable vis-à-vis de la réduction d'ozone créée par les CFC émis depuis le sol, comme l'a démontré l'étude menée par l'ONERA, sous l'égide du COVOS (Académie des Sciences).

La contribution du trafic aérien à l'effet de serre anthropique a fait, et fait encore, l'objet de nombreuses études qui sont entreprises par les organismes de recherche aéronautique, tels que l'ONERA, en liaison étroite avec les industriels et les laboratoires universitaires. Cette contribution est due à la part de consommation de carburant aéronautique au sein de celle des combustibles fossiles, qui est de l'ordre de 3%. La poursuite des recherches en vue de continuer à améliorer l'efficacité du

trafic aérien devrait compenser l'excédent de la croissance du trafic aérien par rapport à celle de l'ensemble des activités humaines.

De toute façon, il importe, du point de vue de l'impact sur l'atmosphère autant que du point de vue économique, que le développement du trafic aérien s'effectue en continuant à bénéficier des progrès techniques qui ont permis de faire baisser, de plus de la moitié, la consommation de carburant par passager. Les études et recherches en cours, jointes aux progrès sur la gestion du trafic aboutiront à un transport aérien trois fois plus efficace du point de vue de la consommation et neuf fois moins polluant en oxydes d'azote, en 2010 qu'en 1970.

BIBLIOGRAPHIE :

Comité d'études sur les conséquences des vols stratosphériques (COVOS) (Rapport publié par l'Académie des Sciences en 1976).

Espace, Aéronautique et Environnement atmosphérique, Colloque international organisé par l'ANAE (1994).

Impact de la flotte aérienne sur l'environnement et le climat, COSEFA (rapport conjoint Académie des Sciences et ANAE), 1996

Comité Avion-Ozone, « Impact of aircraft Emissions upon the atmosphere », *International Colloquium*, Paris 15-18 Octobre 1996.

Rapport n° 40 de l'Académie des Sciences, en collaboration avec l'ANAE. « Impact de la flotte aérienne sur l'environnement atmosphérique et le climat », décembre 1997.

Dossier n° 13 de l'ANAE (Rapport conjoint avec l'Académie des Sciences) : « Impact des avions et des lanceurs spatiaux sur l'environnement atmosphérique et le climat », 1998.

Dossier n° 24 de l'ANAE : « L'impact du trafic aérien sur l'atmosphère », 2004.

CHAPITRE 8

L'ÉVOLUTION DES RECHERCHES¹⁵⁵

Au cours de la période couverte par le COMAERO, les études et recherches ont subi une évolution en plusieurs phases.

De 1945 à 1960, la renaissance de l'aviation française conduisit à mettre l'accent sur les études à court terme afin d'obtenir des réalisations utilisables rapidement par les armées ou par les compagnies aériennes. Ceci impliqua des prises de licences aussi bien pour les avions que pour les moteurs et les équipements. Cependant, un effort fut entrepris sur la recherche, avec la création de l'ONERA, du LRBA et de l'ISL. Les Instituts de mécanique des fluides furent également mis à contribution. Des démonstrateurs furent réalisés et présentés au Salon du Bourget où s'exprimait un enthousiasme collectif en faveur de l'Aéronautique. Le « terrain » était préparé pour passer à la phase suivante.

La période des années 1960 a été marquée par un véritable tournant en faveur des études amont. Ceci était dû à plusieurs raisons :

- le contexte mondial exigeait un effort pour l'Aéronautique, du fait de la poursuite de la « Guerre froide », ainsi que du fait du développement du trafic aérien civil. En outre, la révélation de l'effort stratégique et spatial de l'URSS, avec le lancement de Spoutnik en 1957 et du premier vol humain réalisé par Youri Gagarine en 1961, obligeait le monde occidental à accélérer son effort de recherche spatiale ;
- l'arrivée au pouvoir du général de Gaulle, en 1958, eut de multiples conséquences sur l'activité aéronautique française qui devint officiellement une activité aérospatiale, avec son double volet : la FNS (Force nucléaire stratégique) et la politique spatiale française.
- les progrès techniques de l'électronique, devenue la microélectronique avec les circuits intégrés, et de l'optique, devenue optronique avec les lasers, eurent très vite des conséquences essentielles sur les études et les réalisations aéronautiques et spatiales. La création de la DMA, en 1961, celle du CNES en 1962 et la conversion de l'ONERA en organisme de recherches aérospatiales en 1963, furent d'importance majeure dans cette mutation de l'Aéronautique française et eurent des conséquences directes sur l'effort de recherche dans ces domaines, aussi bien que pour l'ensemble de la recherche nationale. L'effort de recherche aérospatial français fut considérablement amplifié et surtout focalisé vers des objectifs bien définis, ce qui n'excluait pas de préparer l'avenir à long terme, dont la DRME fut chargée, en liaison étroite avec les organismes de recherche civile.

On peut donc distinguer deux grandes lignes d'efforts de recherches et d'études :

- les recherches participant au développement des systèmes

¹⁵⁵ Par Jean Carpentier.

- les recherches à plus long terme, dont la finalité pouvait être duale, aussi bien civile que militaire, ou encore pouvait englober plusieurs domaines, tels que l'aéronautique et le naval.
- *la période des décennies 1970 à 1990-2000*, qui se prolonge encore actuellement, est celle des mutations du contexte mondial, avec, successivement, les grands chocs pétroliers, la fin de la « Guerre froide », la montée des conflits du Moyen-Orient et des actions terroristes, et la prise en compte, au plan mondial, des problèmes concernant l'environnement. Pour faire face à ces nouveaux problèmes, il fallait que la recherche aéronautique et spatiale se poursuive activement, tout en s'adaptant à cette nouvelle situation mondiale. L'inévitable compétition internationale devait être complétée par une coopération très active, notamment en recherche.

1 - L'EVOLUTION VERS LES SYSTEMES

1.1 - Des équipements de bord aux systèmes

Pendant longtemps, sur les avions, ce fut au pilote ou à l'équipage qu'il revint d'assurer la synthèse des informations fournies, notamment, par les instruments de la planche de bord. Chacun d'eux avait un rôle spécifique et il n'y avait aucune coordination entre eux. Conçus séparément, ils faisaient essentiellement appel à la mécanique de précision. Il n'y avait pas non plus de liaison avec les autres sources d'information, qu'elles fussent internes ou externes à l'avion.

A l'opposé, au tournant du XXI^e siècle, les équipements aérospatiaux font partie d'ensembles intégrés, au cœur de systèmes d'armes ou de systèmes de transport, dont les vecteurs sont les avions, les hélicoptères, les missiles ou les lanceurs spatiaux. A cette panoplie de vecteurs est venue s'ajouter la famille des drones. Cette intégration a été rendue possible par la révolution numérique qui a résulté des progrès fulgurants de la microélectronique et de l'informatique. Les grands programmes aéronautiques et spatiaux, tels que Mirage IV, Concorde, Airbus et Ariane ont également beaucoup contribué à la mutation des équipements et à leur intégration dans des systèmes. Cette évolution s'est menée parallèlement dans le domaine militaire et dans le domaine civil, avec de nombreux échanges entre ces deux domaines.

1.2 - L'aéronautique militaire

Pour réaliser la mission de navigation-bombardement du Mirage IV qui était définie sous forme globale, il fut procédé à une véritable approche système. Pour la première fois en France, on eut recours à un ensemble organisé autour d'un calculateur central qui, associé à un calculateur de bombardement, assurait les liaisons entre les équipements et élaborait les informations pour l'équipage et le pilote automatique.

Un autre grand système fut celui de l'Atlantic qui devait mettre en œuvre, outre les moyens de navigation, un ensemble complexe d'observation et d'attaque.

Cette évolution vers les systèmes se généralisa, en bénéficiant des progrès de la miniaturisation électronique, des circuits intégrés, et de la montée en puissance des calculateurs numériques.

Les principales étapes de cette rapide évolution furent :

- le système analogique de navigation-bombardement du Mirage IV (1959),
- le système analogique de l'Atlantic ATL 1 (1961),
- le système analogique du Mirage III E (1961-1964),
- l'apparition des premiers équipements numériques (sur Jaguar) (1968),
- l'expérimentation, sur Milan, d'une centrale à inertie Litton, avec calculateur numérique de navigation et d'attaque air-sol, et collimateur tête haute (1973),
- l'expérimentation, en vol, de logiciels temps réel de systèmes d'armes,
- le premier système français, monté sur Super Etendard (1974-1977) : Système de navigation et d'attaque SAGEM-Kearfott, boîtier unique intégrant les fonctions navigation et attaque (le calculateur numérique de la centrale à inertie assure également les fonctions d'attaque),
- le premier système numérique centralisé (monté sur Mirage 2 000) (1978-1983), avec digibus, calculateurs centraux, viseurs tête haute et tête basse, contre-mesures, radars de détection air-air basse altitude RDM et RDI.,
- le système numérique de l'Atlantique ATL 2 (1981), avec deux centrales à inertie ULISS (SAGEM), des calculateurs numériques, un ensemble complet de logiciels et utilisation d'un langage de haut niveau LTR2,
- le système du Rafale qui permet à cet avion polyvalent de remplacer tous les avions précédents, pour l'interception à haute, moyenne ou basse altitude, l'attaque au sol et les missions air-mer.

Ainsi, au cours de la période couverte par le COMAERO, on est passé de quelques équipements isolés à des ensembles de plus en plus complexes, mais de plus en plus organisés. Ces ensembles sont conçus en même temps que l'avion, de façon à optimiser l'exploitation par le pilote ou l'équipage. Le concept de système d'armes a pris toute sa signification. A la fin de cette période, on est amené à développer le concept de système de forces qui met en jeu, non seulement d'autres avions, mais aussi de nombreux moyens au sol ou spatiaux qui sont engagés dans une même action rigoureusement coordonnée.

Cette évolution vers les systèmes n'a pu s'effectuer qu'avec le changement des technologies utilisées. La révolution numérique a complètement modifié les méthodes de travail des bureaux d'étude et des unités de fabrication. Elle a aussi changé la nature des relations entre l'avionneur et les équipementiers qui sont devenus des participants très actifs dans la conception de l'ensemble du système.

Le processus d'intégration a connu une extension continue. Parti du système de navigation-bombardement des années soixante ou du système de navigation et d'attaque des années soixante-dix, il gagna les commandes de vol dans les années quatre-vingt, puis la conduite des moteurs et les autres systèmes avion dans les années quatre-vingt-dix. Le traitement de l'information qui en est résulté a nécessité des développements logiciels très importants. La combinatoire des centaines de milliers d'états potentiels du Rafale a exigé un intense effort de définition, de mise au point et de validation de l'interface homme-machine. L'ergonomie a pris une place de plus en plus importante dans la définition de l'avion et de ses systèmes. On est passé progressivement d'une « ergonomie de correction », visant à faciliter la tâche de l'opérateur humain dans des conditions de travail pénibles, à une « ergonomie de conception » qui a pour but d'optimiser, d'emblée, l'ensemble du système homme-machine.

1.3 - L'aéronautique civile

La famille Airbus

Au cours des années quatre-vingt, la technologie numérique a remplacé l'analogique pour la réalisation des principaux calculateurs et les postes de commande embarqués. Le basculement s'est opéré à l'occasion du programme Airbus A310 en Europe et des programmes Boeing 767 et 757 aux États-Unis. Cette nouvelle technologie a permis de réduire le poids, d'accroître la fiabilité et de faciliter la maintenance.

La deuxième étape fut celle de l'Airbus A320. Les fonctions pilote automatique, gestion du vol, contrôle de la poussée furent intégrées dans un même calculateur. Les commandes de vol électriques sont incorporées dans l'architecture multi-processeurs. L'adoption du mini-manche, placé en position latérale, libère totalement la visibilité de la planche de bord qui comporte six tubes cathodiques qui présentent les informations de pilotage et de navigation, les paramètres moteurs, les messages d'alerte et les synoptiques sur l'état de l'avion. Ce système de visualisation, qui a rendu possible le pilotage à deux, est un élément majeur. Il a été reconduit pour la famille Airbus A330/A340, ce qui a réduit considérablement la durée des entraînements des équipages pour passer d'un type d'avion à un autre. L'avènement des écrans à cristaux liquides, qui ont remplacé les tubes cathodiques, a apporté une notable réduction en poids et en volume, une augmentation de la fiabilité et une amélioration de la lisibilité. En outre, le coût de possession a également été réduit.

La famille Falcon

La synergie, chez Dassault Aviation, entre les avions militaires et les avions civils a permis d'utiliser très tôt, des technologies avancées, en particulier, pour les commandes de vol, et des techniques employées sur avion militaire pour mettre le pilote dans la boucle, en garantissant la diminution de sa charge de travail. Les planches de bord ont vu le remplacement des instruments électromécaniques classiques par des tubes cathodiques, dès 1982. Puis les grands écrans à cristaux liquides ont permis aux deux pilotes d'effectuer des synthèses et de pénétrer dans plusieurs couches d'informations grâce à une interface homme-machine intuitive. Tout concourt à placer le pilote dans la boucle et ceci en réduisant sa charge de travail. Ceci constitue un facteur essentiel pour la sécurité, en même temps qu'il contribue notablement à l'agrément de pilotage, à la facilité d'emploi et à la flexibilité d'utilisation.

Conséquences de l'évolution vers les systèmes

Au cours de la période couverte par le COMAERO, le concept « systèmes » s'est généralisé, aussi bien pour les avions civils que pour les avions militaires. Il s'est d'abord appliqué aux systèmes de navigation et de bombardement ou d'attaque qui réalisaient une intégration optimisée des informations des instruments de bord et des radars ou des viseurs, en vue de réaliser, de façon optimale, la mission principale de l'avion. En France, ce concept a pris naissance en 1959, avec le Mirage IV pour la mission de bombardement à haute altitude, puis avec le Mirage III C pour la mission de défense aérienne, avec missile air-air semi-actif. L'intégration était alors limitée aux équipements nécessaires à la mission. Le Mirage III E est le premier exemple de système intégré multi-missions. Ce système, conçu et réalisé en 1961-1964 était lui

aussi encore analogique. Il était orienté vers la mission de défense aérienne et vers celle d'attaque au sol.

La décennie des années 1970 fut marquée par le développement de la numérisation. Elle apportait des avantages considérables :

- accroissement des performances, et, notamment de la précision des calculs de navigation
- optimisation des commandes, pour chaque phase de la mission, et ceci pour chaque mission
- souplesse de reconfiguration et d'adaptation aux changements et aux aléas des missions
- réduction des masses et de la consommation
- aptitude à la préparation et à la restitution des missions.

Ces grandes améliorations apportées aux systèmes n'ont pas amoindri le rôle de l'équipage, elles ont, au contraire, élargi ses possibilités d'intervention. En effet, soulagé des nombreuses tâches ancillaires, celui-ci a pu exploiter pleinement les avantages offerts par les progrès de la technologie des visualisations : collimateurs « tête haute », optiques holographiques, matrices CCD couleur, écrans plats couleur à cristaux liquides. Tous ces progrès furent exploités, notamment sur le Super Étendard (1977) et sur le Rafale A (1986).

L'approche « système » fut aussi développée pour la simulation, depuis le stade de la conception jusqu'à ceux de la fabrication et de l'utilisation des avions, ainsi qu'à ceux de la formation des pilotes et de leur entraînement. La Conception assistée par ordinateur (CAO) et, plus particulièrement le logiciel CATIA, ont conduit au concept d'« avion virtuel ». CATIA, développé par Dassault Systèmes, a vu son emploi se généraliser en aéronautique, civile ou militaire, ainsi que dans de nombreux autres secteurs de l'industrie.

On est ainsi parvenu au concept du système généralisé, qui englobe la totalité de ses constituants, y compris le pilote « dans la boucle », et qui perdure, depuis le stade de la conception jusqu'à la fin de vie des matériels.

Finalement, le concept s'est appliqué à l'ensemble du système de forces mis en jeu pour remplir la mission. Au « segment avion » s'est étroitement associé le « segment sol » indispensable pour assurer la coordination des différents moyens sol et des vecteurs aériens, avions, missiles, hélicoptères et, plus récemment, les drones. Ainsi doit-on aboutir à une optimisation globale valable pour un ensemble de missions relevant de la même finalité opérationnelle.

Les exemples cités ci-dessus appartiennent au domaine militaire. Une évolution analogue s'est produite dans le domaine civil. Le transport aérien est en voie d'un total renouveau, grâce à une meilleure intégration des « segments sol et avion », notamment en transmettant à l'équipage les informations sur le trafic aérien environnant.

Ces informations proviennent des moyens sol, mais aussi des autres avions qui transmettent au sol les paramètres essentiels de leur navigation. L'objectif n'est pas de remplacer le contrôle aérien, mais de permettre à l'équipage d'avoir une meilleure perception de son environnement. Les phases d'approche, d'atterrissage et de roulage peuvent ainsi être optimisées, non seulement pour un même avion, mais aussi pour l'ensemble des appareils qui sont en fin de vol. La fluidité du trafic ainsi

obtenue est un facteur essentiel de sécurité, d'économie de carburant et de respect de l'environnement. Il va de soi que ces nouveaux moyens doivent être testés et mis au point, dans des conditions aussi voisines que possible des conditions opérationnelles, grâce à une simulation de l'ensemble. Ces dispositifs de simulation doivent aussi servir à la formation et à l'entraînement, tant des équipages que des contrôleurs aériens. Pour tous ces personnels, la charge de travail sera diminuée, ce qui leur permettra de faire face plus aisément aux phases critiques pouvant conduire à des accidents, phases dont l'occurrence devrait rester exceptionnelle, en dépit de l'accroissement prévu du trafic aérien.

Ainsi, tant dans le domaine militaire que dans le domaine civil, le concept de système généralisé s'est-il progressivement imposé. Dans le domaine aérien, comme pour toutes les activités humaines, « gouverner, c'est prévoir ». C'est bien ce qui est devenu possible avec le concept système qui permet, dès la conception, d'envisager le maximum de « cas de figures » qui peuvent se produire. L'emploi des matériels est ainsi optimisé et le rôle de l'homme qui reste dans la boucle, mais au plus haut niveau, est pleinement magnifié.

2 - LES ACQUIS DUS AU PROGRAMME CONCORDE

Si Concorde n'avait pas existé, il n'y aurait pas aujourd'hui Airbus ! En effet, le succès de la famille Airbus est la conséquence directe de l'expérience accumulée avec Concorde, comme le soulignent les avancées techniques qui ont caractérisé les premiers produits :

- en 1974, lors de sa mise en service, l'A300, premier gros-porteur biréacteur, tire profit des techniques, en aérodynamique, avionique et structures, développées pour Concorde, ce qui lui confère une nette avance par rapport aux produits concurrents ;
- en 1983, l' A310 prolonge les acquis de l'A300, avec l'introduction de nouveaux concepts testés avec Concorde, tels que l'utilisation plus large des matériaux composites et le contrôle du centrage de l'avion par transfert de carburant ;
- en 1988, l'A320 devient le premier appareil commercial subsonique à commandes de vol entièrement électriques (reprenant ainsi une solution expérimentée avec Concorde). Cette innovation fondamentale ouvre la voie à une nouvelle génération d'avions de transport.

Au delà des technologies de base, les principales avancées, initiées par Concorde et reprises pour Airbus, concernent la maîtrise des systèmes complexes et leur intégration dans une optimisation globale de la gestion de l'avion dans sa mission, tels que :

- la conception du poste de pilotage évoluant vers une intégration de plus en plus poussée de l'interface « homme - machine »
- les systèmes liés au pilotage : le pilote automatique autorisant l'atterrissage tous temps, l'auto-manette de commande des réacteurs, les commandes de vol électriques...
- le système centralisé de gestion des alarmes apportant simplicité et sécurité dans l'exploitation.

Dans le domaine des méthodes et des moyens d'essais, les perfectionnements amenés par Concorde ont été directement utilisables pour les programmes Airbus :

- dans le domaine des essais aérodynamiques et des essais en vol, les principales avancées concernent les méthodes, la sophistication des essais et l'optimisation des moyens de mesure et de traitement des données ;
- le développement et la modernisation des moyens d'essais dans les nouvelles installations du CEAT décidées pour Concorde ont constitué des outils remarquables pour Airbus : essais structuraux d'ensemble, essais de matériaux, essais de trains d'atterrissage, essais de pneus, roues et freins... ;
- la réalisation reprise pour Airbus d'un banc d'intégration complet de l'avion couplé avec un simulateur « *ironbird* » a permis une mise au point anticipée des systèmes et des équipements dans une configuration au sol se rapprochant au plus près de l'avion réel ;
- le développement (par LMT) du simulateur d'études pour Concorde démontra l'importance de cet outil pour la mise au point d'un avion et la préparation des essais en vol : cette expérience féconde se démultiplia avec Airbus. Thomson (repreneur de LMT) est devenu aujourd'hui un des leaders mondiaux pour les simulateurs de bord ;
- le banc de test ATEC, initialement « *Automatic test equipment for Concorde* » renommé aujourd'hui « Appareillage de Test d'Équipements Complexes ») réalisé par Aérospatiale pour Concorde fut extrapolé avec un grand succès aux Airbus, tant pour les essais chez le constructeur que pour la maintenance chez les clients.

En ce qui concerne la réglementation et la certification, la complexité du Concorde et la spécificité de son domaine de vol ont exigé la mise en place d'une réglementation appropriée. Les études de sécurité développées à cette occasion et introduites dès la conception, avec une approche systématique et probabiliste des pannes et combinaison de pannes, ont été reprises pour Airbus. Ces travaux ont été appréciés par les représentants de la FAA et ont ainsi participé à la crédibilité des autorités européennes : ceci a facilité la certification des Airbus par la FAA.

La production d'un avion aussi original que Concorde a exigé le développement de nouveaux procédés de fabrication et la mise en place d'importants moyens industriels ; tous ces investissements ont permis de démarrer la production des Airbus dans un contexte industriel très en avance par rapport à celui de la concurrence.

Le développement industriel du secteur aérospace (avionneurs, motoristes, équipementiers, fournisseurs et sous-traitants) à l'occasion du programme Concorde a été à l'origine d'une participation exemplaire de l'industrie européenne à la réussite des programmes Airbus.

Dans le domaine des équipements, cet apport de Concorde est manifeste : alors que Caravelle n'a été réalisée qu'avec un nombre très faible d'équipements français en raison d'une notoriété insuffisante, les équipementiers français enrichis du savoir-faire Concorde obtiennent une part de production en série supérieure à 50% pour le premier produit Airbus.

Dans le domaine des moteurs, il faut souligner que, sans la participation de SNECMA à l'ensemble propulsif de Concorde, il n'y aurait pas eu de CFM 56 ou il y

aurait eu un CFM 56 très différent, en nombre beaucoup plus faible. En effet, grâce à Concorde, SNECMA a beaucoup appris sur :

- l'organisation et la gestion d'un grand programme
- la certification d'un moteur, face au meilleur certificateur au monde, ARB / CAA
- la pénétration des grandes compagnies de transport aérien

C'est grâce à Concorde que SNECMA a acquis une notoriété internationale telle que *General Electric*, énorme société, a accepté de s'allier. Sur le plan technique, le gain a été limité, mais très significatif. Sur le plan de la production (méthodes, moyens d'usinage, capacité...), le gain fut très important.

3 - LA DUALITE MILITAIRE/CIVILE EN RECHERCHE AERONAUTIQUE

Dans le domaine aéronautique, la recherche militaire et la recherche civile ont été très souvent extrêmement proches – voire même souvent confondues – pour de multiples raisons : mêmes techniques de base (très spécifiques), mêmes industriels /acteurs, marchés complémentaires des industriels concernés...

Née au début du XX^e siècle, l'aéronautique s'est développée initialement dans le seul domaine militaire au cours de la première guerre mondiale. Entre 1914 et 1918, d'énormes progrès ont été accomplis : vitesse, altitude, emport de charge, puissance de feu...

Dans la période 1919-1939, en partie pour survivre, l'industrie aéronautique a recherché des débouchés civils qui ont commencé à se concrétiser vers la fin des années 1930.

La deuxième guerre mondiale a fait accomplir des progrès considérables aux avions militaires (que les Allemands avaient anticipés à partir des années 1930, d'où leur suprématie initiale dans le ciel en 1939-1940). Le lancement du turboréacteur – par les Allemands puis les Britanniques – annonçait une ère nouvelle.

A partir de 1945, la recherche militaire s'est engagée dans la course aux grandes vitesses puis dans les systèmes d'armes complexes et performants et dans des concepts nouveaux (missiles drones, etc.). Le domaine civil a visé aussi les hautes vitesses (Concorde) puis le transport de masse privilégiant les performances économiques, la fiabilité et la sécurité. Militaires et civils se sont associés pour développer un nouveau véhicule, l'hélicoptère...

On passera en revue un certain nombre de domaines en examinant les progrès militaires et/ou civils.

Aérodynamique : c'est la discipline initiale de base, fondée sur des essais en soufflerie, puis sur des calculs (rendus possibles par les progrès théoriques et les capacités des ordinateurs) et des expérimentations/simulations.

Deux exemples de découvertes ayant eu des retombées très importantes :

- en 1951, la « loi des aires » : les avions de combat dépassent $M=2$ en vol horizontal ;
- en 1965 les « profils supercritiques » utilisés sur les avions commerciaux (première utilisation sur Dassault Mystère 50), avec des améliorations sensibles des performances.

A partir des années 1960, dans le domaine militaire, la course à la vitesse est pratiquement stoppée; on améliore la manoeuvrabilité, le système d'armes, les missiles, la furtivité...

Turboréacteurs : l'efficacité d'un turboréacteur militaire ou civil repose sur celles de ses composants : compresseurs, chambre de combustion, turbines, régulation... et les recherches sont totalement « duales ». Des spécificités demeurent dans les mises en œuvre des technologies : les avions de combat exigent des taux de dilution modérés, les avions civils des taux de dilution beaucoup plus élevés (grandes soufflantes avec optimisation de l'intégration moteur/cellule) donnant de faibles consommations spécifiques de carburant et des nuisances – bruit, pollution – réduites.

On doit signaler l'importance des études amont consacrées au moteur M 88 de Rafale, en particulier pour le refroidissement des aubes de turbine, les matériaux de celles-ci et des disques de turbine (ainsi que les technologies de fabrication). Ces travaux, après adaptation, ont été utilisés pour les moteurs civils, en particulier les versions du CFM 56.

Matériaux : les haubans, le bois, la toile... ont été abandonnés pour l'essentiel avant la deuxième guerre mondiale. Les alliages d'aluminium (et de magnésium) sont encore très utilisés avec des caractéristiques améliorées (sur Concorde, AU 2 GN utilisable à 120°C, plus récemment aluminium-lithium...) ainsi que ceux de titane et des « aciers » de plus en plus sophistiqués et spécialisés (à très haute résistance, réfractaires...) nécessitant des méthodes d'élaboration et de mise en forme très complexes (métallurgie des poudres, techniques d'usinage très sophistiquées...).

Les matériaux composites à matrice organique ont été introduits dans les cellules puis les moteurs au milieu des années 1970. Le premier développement exploratoire d'une voilure en composite était civil (Mystère 10 à voilure expérimentale V 10 F). Le composite a largement amélioré les performances et la fiabilité/durabilité des hélicoptères de tous types (moyeux légers, fiables et durables, pales à durée de vie « infinie »...). Un effort de recherche important est actuellement consacré à l'introduction très large du composite dans les fuselages d'avions civils. Les composites à matrice métallique et fibres de carbone ou de carbure de silicium sont de plus en plus utilisés pour des ensembles très chargés et chauds (missiles, moteurs).

Équipements de bord : ils étaient très limités en nombre et en performances sur les avions militaires ou civils des années 1945-1955. La mécanique fine associée à l'électronique analogique a permis d'intégrer les paramètres (système de navigation-bombardement du Mirage IV, pour les missiles stratégiques, pour Concorde) sur les avions militaires ou civils. A partir de 1980, les tubes cathodiques et l'électronique numérique ont bouleversé les postes de pilotage des avions de combat et des avions civils (pilotage, navigation, gestion des systèmes d'armes... avec des présentations « tête haute »). Une nouvelle branche de l'aéronautique était née : « l'avionique » qui fait appel à un large éventail de disciplines scientifiques et techniques ; elle est utilisée dans tout le domaine aéronautique.

Le concept « Contrôle automatique généralisé » (CAG) a révolutionné le pilotage et l'utilisation des avions militaires d'abord, civils ensuite : l'Airbus A320 équipé de commandes de vol électriques, d'un « minimanche », d'une planche de bord à

visualisation interactive... a été le pionnier de l'aviation civile mondiale. L'avion civil est devenu un « système numérique », profitant largement des travaux sur le concept « système » des avions de combat (intégration des données, des fonctions, des détecteurs... avec une présentation synthétique ergonomique pour le pilote).

Au sein de l'avionique, les composants inertiels ont largement équipé les avions militaires, les missiles balistiques ou tactiques et les avions commerciaux, maintenant associés au « *Global positioning system* » (GPS) pour une précision accrue.

L'utilisation d'équipements électroniques dans des aéronefs, comportant de plus en plus d'éléments structuraux en composites obligeait à assurer une protection contre les agressions électromagnétiques dont la foudre était la plus fréquente. Des études associèrent DGA et ONERA avec l'utilisation d'un avion Transall, spécialement instrumenté, recherchant des foudroiements en vol. Ces travaux ont permis d'optimiser les moyens de protection et de définir les moyens de qualification/certification des équipements avant leur intégration.

Hélicoptères : ils nécessitent des études particulières touchant les rotors, les fuselages, les turbomoteurs (souvent de faibles dimensions), les systèmes de pilotage (multicycliques avec commandes de vol électriques).

Calcul et expérimentation : l'aéronautique est née en s'appuyant sur la seule expérimentation. Très vite, les premières théories sont apparues, mais, jusqu'à la deuxième guerre mondiale, les programmes s'appuyaient essentiellement sur des essais en soufflerie – conduits sur des maquettes de plus en plus grandes voire les avions eux-mêmes – et sur des essais en vol présentant des risques non négligeables (conduisant à de multiples accidents).

De 1940 à 1970, les essais au sol – souffleries, bancs (y compris en altitude/vol simulés) de moteurs et de structures, ont été fortement développés.

De 1970 à 1985, l'apparition des grands calculateurs a permis de concevoir des configurations qui étaient affinées par des essais en souffleries.

A partir de 1985, on a assisté à un dialogue et une synergie entre le « numérique » et « l'expérimental » (s'appuyant sur des méthodes d'instrumentation non intrusives), successivement aux niveaux de la recherche fondamentale, de la recherche appliquée, puis de la conception des avant-projets industriels. Bien que le calcul ait fait des progrès énormes, on reste – et restera encore longtemps – tributaire d'essais en soufflerie (telles celles de l'ONERA) et des essais dans les centres étatiques (de moteurs au CEPr, de cellules et équipements au CEAT, en vol au CEV). Ces organismes couvrent les aéronefs militaires et civils, assurant une synergie étroite entre ces deux domaines.

Logiciel CATIA : à partir d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) acheté en 1970 la société Dassault a développé le logiciel CADAM (*Computer aided design and manufacturing*) permettant de réduire le délai de réalisation des maquettes de soufflerie (de 6 mois à 6 semaines). Après adaptation, il a permis de définir les formes d'avions, de concevoir les pièces dérivées de ces formes, d'usiner ces pièces et de les contrôler sur machine à commande numérique.

En 1978, la société a créé le logiciel CATIA, qui, après développement, a été généralisé à l'ensemble des programmes d'avions militaires et civils. CATIA équipe les grands industriels mondiaux de l'aéronautique (à commencer par Boeing), de

l'automobile, des navires... mais aussi beaucoup de concepteurs et réalisateurs de nombreux produits ou concepts : il est devenu universel.

Missiles balistiques et lanceurs spatiaux : les missiles balistiques ont précédé les lanceurs spatiaux (initialement Diamant, ensuite Ariane dans ses versions successives). Les systèmes de propulsion de ces systèmes sont différents : à poudre pour les missiles (pour des raisons de sécurité à bord des sous-marins et d'utilisation opérationnelle), à ergols liquides pour les lanceurs (le liquide ayant une meilleure impulsion spécifique que la poudre). Mais il existe une très grande synergie entre les deux systèmes (pratiquement tous les industriels concernés oeuvrent dans les deux domaines).

Conclusion sur la dualité entre le militaire et le civil

Dans le domaine aéronautique, les recherches à finalité militaire et celles à finalité civile présentent un très large tronc commun, couvrant :

- les technologies de base : aérodynamique, propulsion, matériaux, calcul...,
- des techniques polyvalentes : microélectronique, informatique...,
- mais aussi les équipements et les systèmes complets (observation, communication,...

Cette synergie est fortement accrue par le fait que dans les deux domaines, militaire et civil :

- les industriels sont les mêmes,
- les mêmes services officiels suivent les programmes (sur le plan technique au moins) et les mêmes organismes de recherche spécialisée y participent (cf. ONERA,...),
- les grands moyens d'essais – au sol ou en vol – sont les mêmes.

Quelques particularités demeurent toutefois :

- les armements, les missiles (avec les fusées) sont bien évidemment purement militaires,
- le nombre de Mach des avions civils reste inférieur à 1 (aucun successeur de Concorde n'est encore lancé), alors que les avions de combat restent dans la gamme de Mach compris entre 2 et 2,5. Seuls des missiles dépassent Mach 3,
- le facteur de charge des avions de combat est beaucoup plus élevé que celui des avions civils (avec des conséquences sur la manœuvrabilité, les matériaux...),
- en propulsion, dans le domaine civil les soufflantes sont une composante essentielle très spécifique; du côté militaire on met l'accent sur la « manœuvrabilité » du moteur dans un très large domaine de vol. L'intégration du moteur dans les cellules présente des différences tout en faisant appel aux mêmes techniques,
- pour les avions civils on lutte contre le bruit au décollage et à basse altitude ; pour les matériels militaires les efforts (quelquefois très grands) concernent la furtivité/discretion électromagnétique et infrarouge,
- les deux domaines utilisent des systèmes extrêmement complexes mais les systèmes d'armes des avions de combat polyvalents atteignent un niveau de sophistication particulièrement élevé.

4 - LE TRONC COMMUN ENTRE L'AERONAUTIQUE ET LE NAVAL

Il existe un large tronc commun entre les techniques aéronautiques et les techniques navales, au moins en ce qui concerne les études amont et certains moyens d'essais. De nombreux cas sont signalés dans l'activité de l'ONERA.

Dans ce qui suit, nous présentons des exemples qui résultent de l'action de la DRME et de la DRET, dans deux domaines essentiels : mécanique des fluides et télécommunications-détection.

4.1 - Mécanique des fluides

Dès sa création en 1961, la DRME rassembla des spécialistes de l'aérodynamique et de l'hydrodynamique, ce qui était une innovation au sein de la DMA, mais aussi un pari :

- Innovation, car les domaines scientifiques et techniques de l'aérodynamique, d'une part, et de l'hydrodynamique, d'autre part, étaient explorés séparément par les directions techniques DTCA et DTCN qui avaient, toutes deux, une longue expérience et une vaste compétence dans leurs domaines respectifs.
- Pari, car une approche conjointe se heurtait au fait que les problèmes aérodynamiques et les problèmes hydrodynamiques ont leurs spécificités liées aux milieux et à la disparité entre les vitesses. En 1961, on pouvait craindre que, du fait de l'accroissement prévisible des vitesses des avions et des missiles, ainsi que de l'ampleur des problèmes spécifiques au milieu naval, tels que ceux posés par la cavitation ou la discrétion sous-marine, les aspects distinctifs l'emporteraient de plus en plus sur le tronc commun.

La DRME gagna ce pari. La personnalité de son directeur, le Professeur Lucien Malavard, qui avait une notoriété internationale dans ces deux domaines, était un exemple et un encouragement pour approfondir le tronc commun et développer les synergies.

Le tronc commun comporte l'étude des écoulements incompressibles rencontrés en hydrodynamique navale, mais aussi en aérodynamique subsonique lorsque les vitesses et les variations de température sont assez faibles. Les phénomènes de base, tels que la turbulence, les décollements, les structures tourbillonnaires, les modèles théoriques, les méthodes de calcul numérique, les procédés instrumentaux présentent une grande identité en hydrodynamique et en aérodynamique pour le bas subsonique (Mach inférieur à 0,3).

La transition laminaire-turbulent, avec ses conséquences sur la traînée de frottement, présente des aspects communs à l'aérodynamique et à l'hydrodynamique. La réduction de la traînée de frottement est un objectif aussi bien pour le concepteur d'un navire rapide, d'un sous-marin ou d'une torpille que pour celui d'un avion de transport commercial, d'un avion de combat ou d'un missile. Les enseignements de la bionique, à partir des études sur les dauphins, ont été utiles pour réduire la traînée des torpilles, mais ont aussi trouvé des applications aéronautiques : les « *riblets* », surfaces striées dans le sens de l'écoulement permettent de réduire le frottement dans la zone turbulente de la couche limite, ce qui permettrait de réduire d'environ 5% la traînée de frottement d'un avion de transport tel que l'Airbus A320.

La visualisation d'un écoulement en soufflerie et celle dans un tunnel hydrodynamique font appel à des techniques voisines qui utilisent la photographie ultrarapide et la vélocimétrie laser.

De nombreuses recherches en aérodynamique subsonique peuvent être entreprises au tunnel hydrodynamique et il convient de rappeler que la cuve rhéoelectrique de Pérès-Malavard, basée sur l'analogie des équations régissant les courants électriques et les écoulements des fluides, peut être utilisée pour les véhicules navals aussi bien que pour les véhicules aériens.

En contrepartie, certains coefficients d'efforts hydrodynamiques sur sous-marins ou sur torpilles peuvent aisément être mesurés en soufflerie.

Une approche commune entre aérodynamiciens et hydrodynamiciens a également été fructueuse lors de l'étude de la stabilisation du porte-avions nucléaire qui a bénéficié de l'acquis du centre de Toulouse de l'ONERA sur le pilotage-guidage des avions et des missiles. En outre, le pilotage des sous-marins a fait, avec succès, l'objet d'une étude, en commun, par les aérodynamiciens, les hydrodynamiciens et les automaticiens de l'ONERA-Toulouse. Des lois de pilotage très performantes ont été établies pour la tenue à l'immersion périscopique et l'immersion de lancement des sous-marins des SNA et des SNLE. Enfin, les navires non conventionnels, notamment les hydroptères de deuxième génération ont largement bénéficié des techniques de stabilisation automatique des avions.

4.2 - Télécommunications et Détection

Le Centre d'études théoriques de la détection et des communications (CETHEDEC), créé en 1959, fut rattaché à la DRME, lors de la création de celle-ci en 1961. Dirigé par le Professeur Maurice Bouix, le CETHEDEC a fait entreprendre un ensemble de recherches dans les domaines de la théorie du signal, avec des applications multiples en communication, en détection acoustique navale (Sonar), en détection électromagnétique (Radar) et en discrétion électromagnétique.

De même, le Service des Recherches de la DRME, puis de la DRET lança un programme de recherche ayant un tronc commun entre la détection acoustique et la détection électromagnétique. Ces recherches étaient effectuées en liaison avec les travaux du GRETSI (groupement d'étude sur le traitement du signal) qui rassemblait d'éminents scientifiques, tels que André Blanc-Lapierre, Bernard Picinbono, Ernest Roubine, et des spécialistes du Laboratoire de détection sous-marine du Brusc. C'est ainsi que la détection des sous-marins par ultrasons fut effectuée par la méthode de compression d'impulsion. La culture « traitement du signal » semble s'être d'abord imposée chez les sonaristes, comme Pierre Tournois de CSF et Yvon Fouché de Thomson, avant d'être très largement développée par les radaristes. La technologie analogique des lignes à retard et des filtres à ondes acoustiques de surface fut, elle aussi, appliquée au radar comme au sonar, avant d'être supplantée par le « tout-numérique ». Les progrès des radaristes français ont été, à l'origine, largement dus à la synergie entre les techniques sonar et radar, synergie que la DRME et la DRET ont grandement facilitée.

Ainsi, aussi bien dans le vaste domaine des télécommunications et de la détection que dans celui de la mécanique des fluides, le fait de disposer d'un organisme étatique ayant une vue d'ensemble, comme ce fut le cas avec la DRME et la DRET, constitua un atout considérable qui permit de rattraper le retard par rapport aux États-Unis, leader incontestable dans ces domaines essentiels pour la Défense.

5 - LES PERSPECTIVES

L'expérience acquise dans la conduite des recherches lors de la période couverte par le COMAERO permet de souligner que la recherche aéronautique et spatiale progresse, tantôt d'une façon continue, avec des résultats assez prévisibles, tantôt par sauts, avec des ouvertures vers des réalisations entièrement nouvelles.

Le *premier processus* est la conséquence des efforts des chercheurs et des ingénieurs spécialisés dans des secteurs très pointus.

Ce travail de recherche peut être fondamental ou appliqué.

S'il est de nature *fondamentale*, il peut aboutir à une découverte scientifique qui fait l'objet d'une communication dans un colloque spécialisé ou d'une publication dans une revue de haut niveau.

S'il est de nature *appliquée*, il a pour but un résultat concret qui puisse être transféré à un industriel, après avoir fait l'objet d'un brevet pour préserver la propriété intellectuelle du chercheur ou de l'organisme auquel il appartient.

Le stade suivant est celui du *modèle probatoire* ou du *développement exploratoire* qui ont pour but de vérifier que, si le matériel est réalisé, il tiendra ses promesses en termes de performances et qu'il soutiendra la comparaison avec la concurrence, du point de vue du coût, de la sécurité, du respect de l'environnement. Il convient aussi de vérifier que ce nouveau matériel pourra être fabriqué par des personnels bien formés, dans des délais acceptables et ensuite être exploité par des utilisateurs qui le maintiennent en fonctionnement dans des conditions optimales. Cette phase doit apporter une garantie d'« assurance tous risques », depuis la naissance du prototype jusqu'à la fin de vie du matériel. On n'est pas loin du « développement durable » qui est ainsi le prolongement idéal de l'ensemble des phases recherche fondamentale, recherche appliquée, développement exploratoire, ensemble qui constitue les études amont.

Le *second processus* est d'une toute autre nature. Il s'agit de l'innovation. On peut distinguer trois grands types d'innovations :

- l'innovation technique qui résulte d'une invention ou d'une amélioration technologique. Elle correspond à un besoin existant qui peut être ainsi mieux satisfait qu'avec les matériels déjà sur le marché.
- l'innovation économique qui correspond à une nouvelle application d'un produit ou d'un procédé industriel existant dans un autre domaine
- l'innovation de concept qui consiste en une combinaison nouvelle de matériels ou de moyens existants, pouvant satisfaire un besoin latent, non encore exprimé.

C'est sur ce dernier type d'innovation qu'il convient de porter l'attention, plus particulièrement. C'est, en effet, le plus original, le plus risqué, mais aussi le plus prometteur. Il est, très souvent, pluridisciplinaire, il présente un caractère transversal, de sorte qu'il peut échapper aux spécialistes enfermés dans des voies trop étroites pour penser à tirer parti des progrès dans des disciplines voisines ou a fortiori dans des disciplines éloignées. Ce sont les généralistes, à l'écoute des découvertes et des inventions dans des domaines variés, qui sont les mieux placés pour innover. Il s'agit, le plus souvent, d'une seule personne ou d'une toute petite équipe qui, en procédant par association des avancées ou des découvertes les plus récentes, conçoit un matériel ou un procédé nouveau. Pour déboucher sur le marché, l'innovation doit correspondre à un besoin. Celui-ci peut n'être pas encore exprimé. Il

revient à la petite équipe créatrice d'en pressentir l'existence potentielle, à l'instar de l'image latente en photographie argentique.

A titre d'exemples d'innovations dans le domaine aéronautique, au cours de la période couverte par le COMAERO, citons :

- l'hélicoptère à turbomoteur, où l'alliance entre Turboméca et Sud-Aviation a fait merveille : les turbomoteurs de Joseph Szydlowski montés sur les hélicoptères de Sud-Aviation constituèrent, du fait de leur excellent rapport puissance / poids, une première mondiale !
- le Jaguar, avion d'attaque au sol, dont le *Pod* ATLIS permet au pilote d'attaquer un objectif à distance de sécurité, par des missiles autoguidés sur la cible désignée par laser, sans le concours d'autres avions pour la désignation. Il en résulte une totale autonomie, mais aussi la possibilité de concours avec d'autres appareils, notamment des drones de surveillance du champ de bataille.
- l'Air-Sol-Moyenne-Portée (ASMP) qui est le seul missile au monde, à charge thermonucléaire qui soit propulsé par statoréacteur. Largué d'un avion porteur à Mach 0,8, il atteint Mach 2 en 5 secondes, grâce à un booster à propergol solide. Il est ensuite propulsé par statoréacteur dont la chambre de combustion est l'espace laissé vide par le propergol solide. C'est donc un stato-fusée parfaitement optimisé et bien adapté aux caractéristiques de l'avion porteur (Mirage 4, Mirage 2000 N, Super Étendard) qui peut ainsi attaquer son objectif, tout en restant à distance de sécurité. L'ASMP est l'exemple type d'un concept innovant adapté à un besoin opérationnel majeur et parvenant à une adaptation optimale à l'avion porteur et à sa mission, avec un rapport efficacité/coût excellent. Le coût de l'ASMP, de conception rustique, est, en effet, faible par rapport à celui de l'avion porteur et à celui de sa charge thermonucléaire.
- dans le domaine aéronaval, l'association vedette rapide et missile mer-mer du type Exocet est une réelle innovation. Elle introduit un déséquilibre entre la menace et la protection du bâtiment naval attaqué. Celui-ci est détecté par la vedette avant qu'il puisse, lui-même, la détecter, car sa signature radar est bien plus importante. En outre, il ne dispose pas de moyens efficaces pour détruire le missile mer-mer volant à grande vitesse et à très basse altitude. Ce déséquilibre, entre « le glaive et le bouclier » ou encore entre « l'obus et la cuirasse », est d'autant plus grave que le rapport entre le coût de l'attaqué et celui de l'attaquant est considérable, de l'ordre de 100/1, voire 1000/1, lorsqu'il s'agit d'un « *capital ship* », tel qu'un porte-avions.
- dans l'ensemble du domaine de la Défense, les remarquables travaux de l'ONERA, sous l'impulsion du regretté Jacques Dorey, sur la détection électromagnétique, qui ont conduit à la réalisation de radars opérationnels, tels que Nostradamus et GRAVES (Grand réseau adapté à la veille spatiale) ainsi que ceux relatifs à la furtivité qui ont bénéficié au Rafale.

En conclusion, il importe de poursuivre l'effort de recherche et d'étude qui a été entrepris au cours de la période couverte par le COMAERO, par la conduite simultanée d'un programme de recherches continues et d'une réflexion prospective. Ceci permettra de tirer le meilleur parti des avancées scientifiques et des progrès techniques et de les valoriser pleinement par l'insertion de leurs résultats dans des projets innovants. Ceux-ci seront le fruit de travaux d'équipes pluridisciplinaires qui anticiperont les besoins futurs, tant civils que militaires, en tenant le plus grand compte du contexte environnemental, global ou régional, au cours des prochaines décennies.

RAPPEL HISTORIQUE SUR LES DÉBUTS DE L'ESPACE EN FRANCE¹⁵⁶

LA PHASE PREPARATOIRE

Comme pour l'Énergie atomique et la création du CEA, le rôle du Général de Gaulle fut essentiel pour les débuts de l'Espace en France et la création du CNES. Soucieux d'une plus grande indépendance nationale, il donna, dès son retour au pouvoir en 1958, une nouvelle impulsion à la recherche scientifique.

Le Comité interministériel de la recherche scientifique et technique (CIRST) est créé le 28 novembre 1958. Un an après le lancement de Spoutnik 1, la recherche spatiale n'est pas oubliée. Conscient de l'importance des moyens nécessaires, le gouvernement français souhaite utiliser toutes les compétences et coordonner leurs activités avant de les développer. Il charge Roger Seydoux, directeur général des Affaires culturelles et techniques au ministère des Affaires étrangères, de proposer une instance à cet effet.

Ceci aboutit à la création, par décret du 7 janvier 1959, du Comité des Recherches Spatiales, composé de scientifiques, d'ingénieurs et de représentants des ministères intéressés (Affaires étrangères, Armées, Postes et Télécommunications). Ce Comité dépend du Premier Ministre, par l'intermédiaire de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique (DGRST), laquelle relèvera à partir de février 1960 du ministre délégué à la recherche scientifique et des questions atomiques et spatiales.

Le rôle du Comité des recherches spatiales consiste à :

- recenser les moyens français dans le domaine des recherches spatiales
- présenter des propositions au Premier ministre pour établir et exécuter un programme de recherches spatiales
- diriger la mise en application du programme retenu par le gouvernement

Dès avril 1959, le Comité élabore un programme de recherches pour les six années à venir. Deux aspects se dégagent : la nature interdisciplinaire de l'étude de l'Espace et l'aspect politique, dans l'éventualité d'une coopération internationale.

Les objectifs relèvent de la recherche scientifique :

- étude des phénomènes solaires
- observation des planètes et de leurs satellites
- recherche sur l'ionosphère et les rayonnements
- physique de l'atmosphère et aéronomie
- physique cosmique.

Le développement des fusées-sondes et des lanceurs de satellites est laissé à l'appréciation du ministère des Armées.

¹⁵⁶ Par Jean Carpentier.

Le 16 novembre 1959, Pierre Auger, professeur à la Sorbonne et directeur de recherches au CNRS, qui avait été à l'origine, en 1954, de la constitution du Conseil Européen pour la recherche nucléaire (CERN) est nommé président du Comité des recherches spatiales. Le 23 mai 1960, il expose au CIRST le nouveau programme de ce Comité, en insistant sur l'importance de la coopération internationale. Désormais, l'Espace fait partie des actions concertées du CIRST, mais son budget est défini séparément.

Différents laboratoires et organismes français souhaitent participer aux recherches spatiales coordonnées par le Comité :

- le CNET, dirigé par Pierre Marzin, qui utilise une famille de petites fusées-sondes à poudre, de mise en œuvre facile, Béliet et Centaure
- le laboratoire de physique de l'atmosphère de la Faculté des Sciences de Paris, dirigé par le professeur Vassy
- le laboratoire de physique cosmique du CNRS, avec les professeurs Auger, Maze et Fréon
- le Service d'aéronomie du CNRS, avec le Professeur Blamont
- les services de la Météorologie nationale, avec l'ingénieur général Viaut et l'ingénieur en chef Facy
- les observatoires astronomiques de Paris-Meudon et du Pic du Midi, dirigés par MM. Danjon, Muller et Rosch
- le laboratoire d'aérothermique du CNRS, du Professeur Brun
- les laboratoires du CEA, dont le Président est Francis Perrin
- le laboratoire de biologie spatiale du Centre d'enseignement et de recherche de médecine aéronautique (CERMA) dirigé par le Médecin général Grandpierre
- l'ONERA, dirigé par Maurice Roy, qui réalise deux fusées quadri étage à poudre : Antarès (non pilotée) et Bérénice (avec un premier étage piloté)

Il faut noter l'absence d'un autre organisme ayant une grande compétence dans le domaine de la propulsion des fusées : le Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques (LRBA), chargé du programme des fusées Véronique qui devaient propulser un matériel de 100 kg à l'altitude de 300 km. (cf. Chapitre 1 paragraphe 8, Le LRBA)

Le Comité des recherches spatiales organise des campagnes de tir de Véronique, Béliet et Centaure en 1959, 1960 et 1961. Il étudie, avec le ministère des Armées, la possibilité d'utiliser des fusées-sondes capables d'atteindre des zones de 600 à 1 000 km.

Il fait adopter, dans le cadre de la loi de programme de recherche scientifique et technique du 31 mai 1961, un plan pluriannuel qui prévoit des budgets cumulés de 130 millions de francs pour les activités spatiales nationales, de 1961 à 1965. Le 3 juillet 1961, un décret porte de 9 à 22 membres l'effectif du Comité afin d'y associer les représentants des services publics intéressés par les questions spatiales.

Pour réaliser ses programmes, le Comité des recherches spatiales bénéficie d'un atout majeur : l'effort important consenti par le gouvernement dans le domaine militaire. En effet, le lancement des études d'un engin balistique stratégique a conduit à établir un programme de fusées utilisables pour des expériences spatiales et à réaliser d'importants investissements au CIEES. Des propulseurs solides et des

propulseurs liquides sont développés en parallèle, ce qui offre à la recherche spatiale une gamme souple et variée de fusées-sondes.

D'autre part, l'outil industriel est restructuré : le 17 septembre 1959, la SEREB (Société pour l'étude et la réalisation d'engins balistiques) est créée avec la participation de Nord Aviation et de Sud Aviation. Dès 1960, le Service technique de l'aéronautique fait étudier la propulsion hydrogène-oxygène par la SEPR (Société d'étude pour la propulsion à réaction).

Toutes ces études bénéficient de l'expérience française dans les techniques de propulsion et de guidage de petits missiles. Mais il reste à acquérir deux techniques essentielles : celle des gros propulseurs et celle du guidage inertiel. Tel est l'objet de la mise au point de la famille des « pierres précieuses » : Agate, Topaze, Émeraude et Saphir.

L'état d'avancement du programme de la Force nucléaire stratégique (FNS) permet d'envisager, dès 1961, le lancement, à moindres frais, d'un satellite. La fusée Diamant, constituée du véhicule d'essai Saphir surmonté d'un troisième étage, doit permettre de satelliser une masse de 80 kg. Le premier tir est prévu pour le début de 1965.

Le 29 novembre 1961, un protocole, signé par Pierre Messmer, ministre des Armées et Pierre Guillaumat, ministre chargé des questions atomiques et spatiales, permet l'utilisation, à des fins civiles, du CIEES (Centre interarmées d'essais d'engins spéciaux) créé en 1947 et implanté au Sahara, et du CERES (Centre d'essais et de recherches d'engins spéciaux) créé en 1952 et situé à l'île du Levant.

Parallèlement à cet effort national, un accord de coopération à long terme est signé le 21 mars 1961 entre la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), la DGRST et le Comité des recherches spatiales, représentés respectivement par Hugh L. Dryden, Pierre Piganiol et Pierre Auger. Pour l'essentiel, cet accord porte sur le lancement d'un satellite en projet (qui deviendra FR-1) par une fusée américaine. Cet accord prévoit aussi l'envoi de personnels français pour formation dans les centres de la NASA.

Mais l'ambition du programme national et l'ampleur prise par les organisations européennes dépassent les possibilités du Comité des recherches spatiales et celui-ci étudie la création d'une agence française de l'Espace qui regrouperait les activités dispersées dans de multiples organismes.

Plusieurs personnalités jouent alors un rôle essentiel :

- Pierre Piganiol, Délégué général à la recherche scientifique et technique
- Pierre Auger, Président du Comité des recherches spatiales
- le Général Robert Aubinière, Directeur technique et industriel de l'aéronautique
- Jean Pierrat, secrétaire du Comité, auquel succède Michel Bignier, en septembre 1961
- le Professeur Jacques Blamont, Directeur adjoint du Service d'Aéronomie du CNRS

LA CREATION DU CNES

Pierre Piganiol demande au secrétaire du Comité des recherches spatiales de préparer un schéma de statut pour un établissement public doté de l'autonomie financière. Ce projet est soumis au Conseil interministériel réuni à l'Élysée, le 22 juillet 1961. Il obtient l'accord du Général de Gaulle qui y voit une possibilité d'asseoir les ambitions internationales de la France. En outre, placer un satellite en orbite à l'aide d'un lanceur français permettrait de prouver la crédibilité de la FNS, « force de frappe » nationale.

Pierre Guillaumat, fort de son expérience au CEA, élabore la structure du futur organisme que Pierre Auger avait dénommé CNES « *parce que cela sonnait bien* ». Il décide que le Conseil d'administration sera présidé par une haute autorité scientifique, nommée en Conseil des ministres et que le poste de directeur général sera confié à un ingénieur qui aura autorité sur l'ensemble du personnel et qui sera responsable de la préparation du budget ainsi que du bilan annuel du CNES.

Le 19 décembre 1961, le Général de Gaulle signe la loi créant le CNES et Michel Bignier rédige le décret d'application, daté du 10 février 1962.

Le CNES, établissement public scientifique et technique, à caractère industriel et commercial, doté de la personnalité civile et de l'autonomie financière, est placé sous l'autorité du Premier Ministre.

Le 24 février 1962, le général de division aérienne Robert Aubinière est nommé Directeur général du CNES, à compter du 1^{er} mars. Il occupera ces fonctions pendant dix années, les imprégnant de sa forte personnalité.

Le 23 mars 1962, Pierre Guillaumat, dans *Le Courrier du Parlement*, évoque les applications économiques et militaires des satellites pour les télécommunications, la télévision et la navigation.

Dès le départ, le CNES s'est voulu un organisme de structure légère, soucieux de mobiliser les énergies nationales, pour « faire-faire » plutôt que pour « faire » lui-même.

Il s'est appuyé sur deux piliers :

- en amont, les laboratoires de recherche des universités ou du CNRS, que l'on appela « laboratoires sélectionnés »
- en aval, l'industrie spatiale, que le CNES contribua à développer et qui était chargée de réaliser les lanceurs et les satellites.

Lors de la deuxième rencontre de l'Institut français d'histoire de l'espace, les 22 et 23 octobre 2001, le Général Aubinière, ancien Directeur Général du CNES, rappela que l'année 1962, marquée par le vol orbital de John Glenn (8 mois après Gagarine), fut aussi très importante pour l'Espace en France, avec la création du CNES, de l'ESRO et de l'ELDO.

Le Général Aubinière posa ensuite la question :

« Que se serait-il passé si l'on n'avait pas créé le CNES ? »

Tous les participants à cette rencontre soulignèrent qu'il fallait créer un organisme opérationnel, doté des crédits nécessaires et pouvant traiter les activités spatiales, à l'instar du CEA pour les activités nucléaires. Au cours des années 1950, les activités

françaises à finalité spatiale étaient très limitées, mais, dès le début des années 1960, le Général de Gaulle voulut placer la France au troisième rang mondial pour l'Espace. Avec ses propres moyens, notre pays put lancer ses satellites, à partir de 1965. Ce succès fut dû à la symbiose entre les services officiels et les industriels. Des trois organismes à finalité spatiale créés en 1962, c'est bien le CNES qui a le mieux réussi, car il avait des missions précises et une politique industrielle claire. La NASA avait servi d'exemple : agence civile, elle fut, dès sa création, rattachée directement au Président des États-Unis et fut portée par l'enthousiasme de l'opinion publique américaine qui était profondément marquée par l'avance de l'URSS, dans le domaine spatial.

La direction du CNES était formellement opposée à procéder elle-même à des réalisations. Elle les confia à des industriels qui exécutèrent les programmes suivant les spécifications du CNES. Celui-ci gardait la responsabilité de l'intégration des satellites. Les participants ont estimé que le CNES avait pleinement rempli la mission qui lui avait été confiée en 1962. Il a réalisé des programmes nationaux parfaitement réussis et il a été à l'origine de tous les grands programmes spatiaux européens, lanceurs et satellites.

Les présidents du CNES ont été successivement : Pierre Auger, Jean Coulomb, Jean-François Denisse, Maurice Lévy, Hubert Curien, Jacques-Louis Lions, René Pellat, André Lebeau, Alain Bensoussan, Yannick d'Escatha

Les directeurs généraux ont été successivement :

Robert Aubinière, Michel Bignier, Yves Sillard, Frédéric d'Allest, Jean-Marie Luton, Jean-Daniel Levi, Gérard Brachet

Dans son discours d'ouverture du colloque organisé le 18 décembre 2001, pour célébrer les quarante ans du CNES, le Président de la République, Jacques Chirac, rendit hommage aux fondateurs et aux dirigeants du CNES.

Parmi les personnalités les plus marquantes de l'histoire du CNES, le Président de la République cita, deux d'entre elles qui nous ont quittés en 2001, dans les termes suivants :

- « le Général Robert Aubinière, Directeur général de 1962 à 1971, qui a démontré la capacité de la France à concevoir, construire, lancer et exploiter sur orbite des satellites et qui a conduit tous les projets ouvrant la voie aux grands programmes spatiaux français et européens.
- le Professeur Jacques-Louis Lions, Président du CNES de 1984 à 1992, mathématicien exceptionnel, visionnaire qui s'est impliqué intensément dans des projets dont la maturité ne serait atteinte que dix à vingt ans plus tard »

Dans cet hommage rendu plus particulièrement à ces deux éminentes personnalités décédées en 2001, le Président Jacques Chirac montrait implicitement la complémentarité qui a existé, dès la création du CNES, entre le président et le directeur général. Les présidents successifs ont été des scientifiques de très haut niveau, alors que les directeurs généraux furent toujours choisis parmi les ingénieurs dont le talent d'organisateur et de gestionnaire était unanimement reconnu. Ces personnalités étaient donc parfaitement complémentaires et, dans la grande majorité des cas, leur entente fut exemplaire. Venant de milieux différents, ils pouvaient apporter des compétences et des réseaux de relations qui se complétaient et s'enrichissaient mutuellement.

Cette caractéristique du CNES était aussi celle du CEA, qui fut créé en 1945, avec à sa tête, un Président et un Administrateur général. Sans doute a-t-elle inspiré les créateurs du CNES en 1961. Il est intéressant de comparer ces deux créations. Lorsque le Général de Gaulle fonde en 1945 le Commissariat à l'énergie atomique, il signe une ordonnance qui détaille clairement les cinq missions de cet organisme. Seize années plus tard, la loi de décembre 1961 qui institue le CNES lui donne pour seul objectif de « développer et orienter les recherches scientifiques et techniques dans le domaine spatial ».

Comme le soulignait le Général Aubinière, le CNES s'est efforcé d'amener progressivement l'industrie nationale à accroître sa compétence. *« Il devait éviter de concurrencer le secteur privé, en construisant lui-même les matériels qui lui étaient nécessaires ».*

De même, les responsabilités respectives du CNES et des laboratoires scientifiques reposèrent sur la séparation des rôles. Ce sont les Laboratoires qui devaient proposer, réaliser et exploiter les expériences scientifiques. Il appartenait au CNES de susciter ces propositions et de financer ces projets, ainsi que de développer et de mettre en œuvre les moyens de lancement et de collecte des informations. Le CNES ne se réservait que les activités nouvelles encore inconnues des laboratoires industriels, pour ensuite les transférer intégralement à l'industrie. C'est ainsi que, pour les premiers satellites, le CNES a joué le rôle de maître d'œuvre, réalisant lui-même les premiers sous-systèmes et les équipements embarqués.

Lors de sa première réunion, le 27 février 1962, le Conseil d'administration présidé par Pierre Auger, définit l'organisation du CNES et fixe les attributions des responsables :

- la Direction scientifique et technique (Jacques Blamont), chargée de développer l'ensemble des activités du CNES, avec cinq divisions (satellites, programmes, mathématiques, fusées-sondes, équipements au sol) et un établissement technique situé à Brétigny-sur-Orge
- la Direction des affaires internationales (Michel Bignier)
- la Direction administrative et financière (Edouard Sallé)
- le Service de l'information et de la documentation (Louise Blosset)
- le Service des relations universitaires (Michel-Yves Bernard).

Jacques Blamont, qui avait ainsi les principales responsabilités, s'est exprimé comme suit :

« Mes préoccupations, en tant que directeur scientifique et technique d'un organisme naissant, à vocation incertaine, étaient multiples :

- délimiter clairement le territoire du CNES, c'est-à-dire établir son autorité sur tout ce qui était spatial, vis-à-vis d'organismes qui avaient des prétentions, mais n'avaient pas la mission qui était confiée au CNES par la loi (DMA, ONERA, CNET).
- procéder, non seulement aux tirs du Diamant, mais surtout à l'établissement de tout ce qui les entourait : recueil des données (poursuite, télémesure, trajectographie), constitution d'une industrie française de satellites, par transfert de technologie des États-Unis vers la France, grâce à mes relations avec les scientifiques américains, élaboration d'une communauté scientifique française d'utilisateurs de l'Espace.

Le CNES s'est ainsi donné son propre mandat. Il a su forger sa mission et créer ses modes de fonctionnement ».

Le 10 février 1962, le Comité des recherches spatiales devient le Conseil de l'Espace. Présidé par le Président du CNES, il est chargé d'examiner l'ensemble des projets de recherche relevant de la compétence du CNES, avant que le conseil d'administration n'arrête ses programmes. Le CNES bénéficie aussi de l'aide du sous-comité scientifique du Comité des recherches spatiales qui prend le nom de Comité des programmes scientifiques du CNES. Son premier président est le Professeur Danjon, directeur de l'Observatoire de Paris, auquel succède, en 1963, Jean-François Denisse.

LA CROISSANCE DU CNES ET LES PREMIERS GRANDS SUCCES

Les expériences spatiales soulèvent des problèmes techniques dus aux conditions d'environnement (vide, température, vibrations) ainsi qu'aux faibles masses et volumes disponibles. Ces problèmes avaient déjà été étudiés par des établissements publics (CEA, CNET, ONERA) et dans l'industrie aéronautique et électronique. Pour rentabiliser ces efforts, il est créé, le 1^{er} juin 1962, le Comité des programmes techniques, présidé par l'Ingénieur en chef des Télécommunications Jean Voge, du CNET.

Pour mener à bien ses missions, le CNES dispose, dès sa création, de ballons développés par le Service d'aéronomie du CNRS, de fusées-sondes provenant du LRBA (Véronique), de Sud Aviation (Bélier et Centaure), de l'ONERA (Antarès), ainsi que des bases de lancement que le ministère des Armées met à sa disposition depuis la signature du protocole du 29 novembre 1961.

Le 9 mai 1962, une convention est signée entre le CNES et la Direction technique des engins (DTEN), de la DMA, qui est chargée de la mise au point et du lancement de la fusée civile Diamant-A, issue des réalisations militaires. La SEREB doit en assumer la maîtrise d'œuvre et le CNES en assurer le financement.

Le 4 juillet 1962, le Ministère des Armées décide de construire le Centre d'essais des landes (CEL) qui devient opérationnel en 1965.

Le 15 octobre 1962, le CNES installe à Brétigny-sur-Orge son centre d'opérations, son centre de calcul et ses moyens d'essai. Le 31 juillet 1963, le Comité Interministériel décide la construction du Centre technique de Toulouse destiné à remplacer celui de Brétigny.

Le 14 avril 1964, un Conseil ministériel restreint approuve le choix du site de Kourou en Guyane pour les futurs lancements spatiaux.

L'un des premiers objectifs du CNES fut de définir les problèmes posés par la conception et la réalisation d'un satellite. Pour cela, il souhaita bénéficier de l'expérience des États-Unis. Ceci fut fait dans le cadre d'un programme d'expérimentation sur la magnétosphère, au moyen d'ondes à très basse fréquence. Un protocole d'accord fut signé avec la NASA, le 18 février 1963, pour lancer deux fusées-sondes *Aerobee* 150 A, destinées à mettre au point l'instrumentation, et pour lancer le satellite FR-1 par une fusée américaine *Scout*. La responsabilité du projet fut confiée à l'équipe du CNES qui avait effectué un stage au *Goddard Space Flight Center*. Le CNES était maître d'œuvre du programme et le CNET fut, en tant que responsable de l'expérience scientifique, chargé des études, de la fabrication et des essais du satellite, ainsi que du dépouillement et de l'analyse des données scientifiques. Sur les quatorze firmes industrielles qui participèrent à la fabrication du satellite, sept étaient françaises.

Le 30 avril 1965, un Comité interministériel fixe les objectifs du CNES, dans le cadre du Ve Plan (1966-1970) qui est le premier Plan à traiter de l'Espace :

- lancement d'un satellite par an
- réalisation du Centre spatial guyanais
- installation d'un centre technique à Toulouse

Le même Conseil demande expressément que les activités de recherche spatiale fassent l'objet d'une coopération avec les autres pays européens.

Le 26 novembre 1965, le lancement de la première fusée Diamant-A, emportant le satellite A-1, depuis la base Brigitte à Hammaguir, permet à la France de devenir la troisième puissance mondiale, derrière l'URSS et les États-Unis. Ce succès est complété par la mise en orbite de FR-1, depuis le *Western test range* (Californie), le 6 décembre 1965. En outre, le 17 février 1966, le premier satellite scientifique D-1 est lancé par une fusée Diamant-A. Il s'agit d'une étape importante dans le programme du CNES qui comporte également une série d'expériences originales, comme le lancement de deux fusées-sondes Titus de l'ONERA, en Argentine, lors de l'éclipse totale de Soleil, le 12 novembre 1966.

Tous ces brillants succès placent le CNES au premier rang de l'actualité, en France, et lui confèrent une notoriété internationale, ce qui sera très utile pour instaurer de nouvelles coopérations.

Mais, devant l'importance des tâches, une réorganisation fut décidée le 1^{er} mars 1966. Elle comporta :

- la création d'une Direction des programmes et du plan (André Lebeau)
- la création d'une Direction du développement (Pierre Chiquet)
- le regroupement des relations extérieures, des affaires internationales, de l'information, de la documentation et des affaires universitaires (Michel Bignier)
- la création d'une Inspection, rattachée directement à la Direction générale et chargée, en particulier, des enquêtes relatives aux incidents de lancement (Jean-Albert Dinkespiller)
- l'accroissement de l'initiative aux échelons subordonnés, de façon à soulager la Direction générale des problèmes d'exécution. C'est ainsi que le Centre spatial de Brétigny (Jean-Pierre Causse) devint un établissement à compétence technique et administrative.

Le Professeur Jacques Blamont resta Directeur scientifique et technique.

Les modalités de la coopération entre le CNES et les Armées furent réglées au cours de réunions régulières du « Comité de haut niveau » où siégeaient le Délégué ministériel pour l'Armement et le Président du CNES.

Pour faire face à l'accroissement de ses attributions, le CNES obtint l'autorisation d'augmenter ses effectifs. Il put ainsi étoffer ses équipes de réalisation de satellites et d'affaires confiées à l'industrie pour les équipements au sol, les fusées-sondes, les ballons et le génie civil (construction des centres techniques et de la base de lancement de Kourou).

En octobre 1967, le Président Jean Coulomb fut remplacé par Jean-François Denisse, directeur de l'Observatoire de Paris, qui resta en poste jusqu'en 1973.

LE ROLE SPATIAL DE L'ONERA

Ce rappel des principales étapes de la création et de la croissance du CNES montre clairement les choix qui ont présidé à l'organisation de cet organisme. Il n'est pas douteux que l'arrivée au pouvoir du Général de Gaulle en 1958 a beaucoup facilité la création du CNES, à partir des propositions du Comité des recherches spatiales et lui a donné les possibilités de développement qui ont conduit aux succès des lancements de 1965 et des décennies suivantes.

Ce furent, principalement, des spécialistes de l'aéronomie et de l'astronomie, de niveau international, qui firent ces propositions, dans le but de réaliser un programme comportant aussi bien des expérimentations scientifiques que des applications techniques. Pour cela, il parut normal de confier la présidence du CNES à un scientifique et la direction générale à un ingénieur. Ces deux personnalités étaient d'accord pour « faire-faire » plutôt que « faire ». Il fallait donc que le CNES soit une agence et non pas un établissement de recherche, tel que l'ONERA. Du fait de l'importance des programmes scientifiques et des applications civiles, il paraissait souhaitable de placer le CNES sous la tutelle d'un ministère civil, alors que l'ONERA était sous la tutelle du ministère des Armées. D'autre part, la nomination du Général Aubinière au poste de directeur général facilitait les relations du CNES avec l'industrie aéronautique qui allait rapidement acquérir la vocation aérospatiale.

Cependant, l'ONERA n'était pas au cœur du dispositif spatial français ainsi conçu. Nombreux, parmi ses chercheurs et ses ingénieurs, furent ceux qui eurent l'impression d'avoir été oubliés. Ils pensaient que l'exemple des États-Unis qui avaient transformé le NACA en NASA aurait pu être suivi, en transformant l'ONERA en agence ou en en faisant l'organisme central du CNES. Certes, on ne refait pas l'histoire qui, d'ailleurs, fut brillante. Cependant, il est intéressant de se poser la question :

Les motivations qui ont alors prévalu conduisaient-elles obligatoirement à délaisser l'ONERA ?

Pour tenter d'y répondre, on peut rappeler quels étaient les atouts de l'ONERA en 1961.

La compétence des équipes de l'ONERA dans le domaine de la propulsion des fusées était indéniable. Elle remontait à la création de l'Office en 1946. Une figure emblématique était celle de Marcel Barrère. Celui-ci avait entrepris un important effort de recherche sur la combustion des ergols liquides, puis des lithergols (hybrides solide-liquide) et des propergols solides. Marcel Barrère devint un des rares spécialistes au monde qui dominait l'ensemble de la propulsion chimique. Il n'était pas seulement un éminent scientifique, il était aussi un grand ingénieur qui, pour la réalisation d'un lanceur spatial, insistait constamment sur la nécessité de viser trois objectifs : la fiabilité, le coût, les performances. Du fait de sa compétence unanimement reconnue, le CNES fit appel à lui pour résoudre les problèmes d'allumage et d'instabilité de combustion des différents étages des lanceurs Ariane.

Dans le domaine des fusées, l'ONERA avait acquis une expérience notable, sous l'impulsion de son Directeur général, Maurice Roy, membre de l'Académie des Sciences. Cet éminent scientifique était aussi un visionnaire : avant la Deuxième Guerre mondiale, il avait pressenti le développement rapide des missiles d'intérêt militaire ou scientifique. Nommé Directeur général de l'ONERA en 1949, il constitua

progressivement, à la Direction de la physique, une équipe de tir d'engins destinés à l'étude de l'aérodynamique supersonique et hypersonique.

Maurice Roy, en plus de ses activités de directeur général et de Directeur des recherches à l'ONERA, exerçait un enseignement très scientifique dans plusieurs grandes Écoles, dont SUPAERO. Il fut, avec Von Karman, co-fondateur de l'AGARD et de l'ICAS. Il fut aussi président du Comité international de recherches spatiales (COSPAR) et de nombreux autres organismes internationaux. En 1956, il exerça la présidence de l'Académie des Sciences, lors des cérémonies de son troisième centenaire. Et pourtant, Maurice Roy ne joua pas un rôle important lors de la création et de l'organisation du CNES.

En 1958, Maurice Roy et son adjoint, l'Ingénieur général Robert Legendre, invitent Pierre Contensou à les rejoindre pour développer l'effort de l'ONERA dans les missiles. L'Ingénieur général Pierre Contensou avait, de 1945 à 1958, participé très activement aux études et réalisations de la Direction centrale des constructions et armes navales (DCCAN), dans le domaine, alors nouveau, des engins spéciaux. C'est à Pierre Contensou que l'on doit, notamment, le remarquable essor des recherches de l'ONERA sur la propulsion par statoréacteur. A l'époque, l'objectif était l'étude de l'hypersonique. L'engin expérimental Staltex (1960-1965) franchit à plusieurs reprises Mach 5 et établit ainsi des records mondiaux.

Le succès du lancement de la fusée Antarès, à quatre étages, amenant une ogive à Mach 7 en 1959, aurait pu constituer un atout majeur pour l'ONERA. Antarès était la première fusée spatiale française pour l'étude des phénomènes aérothermiques et électromagnétiques à la rentrée dans l'atmosphère. À cette époque, les équipes de l'ONERA disposaient d'un savoir-faire incontestable pour le lancement de fusées expérimentales, avec tous les moyens de trajectographie et de télémesure associés. Mais le contexte décisionnel n'était pas favorable à l'ONERA. Le Directeur général Maurice Roy était considéré comme un éminent scientifique, mais, bien qu'ayant fait ses preuves d'excellent organisateur dès sa nomination en 1949, il ne semblait pas le mieux placé pour créer un organisme jeune, dynamique et ouvert vers l'extérieur. Il s'agissait de constituer une agence spatiale et non pas un organisme de recherche. D'ailleurs, il ne semble pas que la Direction technique de l'aéronautique, qui exerçait la tutelle de l'ONERA, ait envisagé sérieusement la possibilité de transformer cet organisme de recherches aéronautiques en une agence spatiale.

Il faut aussi souligner que c'est en 1961 que fut créée la Délégation ministérielle pour l'Armement (DMA) et que la tutelle technique de l'ONERA fut transférée à une nouvelle direction, la Direction des recherches et moyens d'essais (DRME). Tous ces changements majeurs au sein du Ministère de la Défense ne permettaient pas à celui-ci d'élaborer, à cette époque, une politique spatiale militaire avec la même vigueur que celle qu'il déploya pour l'armement nucléaire.

Maurice Roy, très sensible aux critiques de personnes insuffisamment informées de son action prévoyante et de ses vues à long terme, décida, en 1962, de démissionner. Il fut remplacé par le Professeur Lucien Malavard, aérodynamicien de stature internationale qui connaissait parfaitement l'ONERA, mais qui, venant d'être nommé Directeur des recherches et moyens d'essais, ne souhaitait pas conserver longtemps cette fonction supplémentaire à la tête de l'ONERA. Aussi proposa-t-il bientôt d'être remplacé par le Professeur Paul Germain, lui-même éminent spécialiste d'aérodynamique théorique et ancien conseiller à l'ONERA. Le Professeur Paul Germain prit ses fonctions après la création du CNES.

Le « créneau de tir » qui aurait pu permettre à l'ONERA d'être l'acteur majeur français pour l'Espace s'était refermé depuis plus d'un an !

Cependant, le programme d'étude de la rentrée atmosphérique se poursuivait à l'ONERA, avec la réalisation et le lancement de fusées à plusieurs étages, qui amenèrent une ogive à Mach 12 et 15 (Bérénice 1962-1967) et Tibère (1971-1972). Il faut aussi mentionner l'expérimentation des fusées Titus, lancées toutes deux avec un plein succès, à quelques minutes d'intervalle, pour observer l'éclipse totale de soleil, en Argentine, en 1966. Ces brillants succès, ainsi que celui du satellite Castor équipé du micro accéléromètre CACTUS, sont dus à la Direction des études de synthèse de l'ONERA, alors dirigée par Pierre Contensou. Celui-ci mena également une activité d'enseignement de la Mécanique et de ses applications spatiales, à l'École Polytechnique, à l'École nationale supérieure du Génie maritime, à l'École Centrale et à l'École nationale supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace. Dans celle-ci, il créa, en 1963, une année de spécialisation en mécanique aérospatiale. Ainsi, par son activité créatrice à l'ONERA, comme par son importante contribution à l'enseignement, Pierre Contensou, nommé Directeur général de l'ONERA en 1973, joua un grand rôle pour le développement spatial français.

Un fait notable est à signaler qui montre bien la compétence et l'esprit d'entreprendre des équipes de l'ONERA. Lors de la réunion du Comité des programmes scientifiques du CNES, le 20 avril 1963, l'ONERA présenta un projet de satellite miniature, appelé SATMOS. D'un poids de 3,5 kg, il pouvait être lancé par une fusée Bérénice modifiée, sur une orbite de 250 km de périgée et de 1 800 km d'apogée. Le premier tir aurait pu avoir lieu en 1964, soit un an avant le tir prévu par le projet Diamant. Le Comité des programmes scientifiques se montra très réservé sur l'utilité de cette opération, dont le succès paraissait incertain, et qui entraînait en concurrence directe avec les projets du CNES. Le projet de l'ONERA fut abandonné, la politique spatiale de la France ne pouvait pas dépendre de deux organismes en compétition nationale.

Le 7 octobre 1963, le ministre d'État chargé des Affaires atomiques et spatiales, Gaston Palewski, demanda, lors d'une visite à l'ONERA, à son directeur général, qui était alors le Professeur Paul Germain, d'éviter désormais toute rivalité avec le CNES. La Direction générale de l'ONERA observa ensuite scrupuleusement cette directive, en se conformant au texte du décret de 1963 qui élargit sa mission des recherches aéronautiques aux recherches aérospatiales.

Les activités de l'ONERA dans le domaine spatial, pendant la période couverte par le COMAERO, sont présentées dans le volume II. Effectuées en étroite collaboration avec le CNES et les industriels, elles correspondent bien à la vocation de l'ONERA, établissement de recherches pluridisciplinaires, à finalité aérospatiale.

Pour conclure, rendons hommage aux créateurs du CNES, et, notamment, à Pierre Auger, Président du Comité des Recherches Spatiales et premier Président du CNES, ainsi qu'à Jacques Blamont, en rappelant le témoignage du Ministre Claude Allègre, le 18 décembre 2001, lors des cérémonies célébrant les quarante ans du CNES :

« Jacques Blamont a été le fer de lance du CNES, avec une idée fondamentale : ne jamais séparer la science et la technologie. Je crois que la grande caractéristique du

CNES et de l'aventure spatiale est d'avoir maintenu à la fois la science et la technologie sans les opposer l'une à l'autre. »

Permettons nous d'ajouter que cette caractéristique est aussi une de celles qui ont fait la renommée de l'ONERA.

BIBLIOGRAPHIE

Armement, recherche et industrie :

« Aperçus historiques sur la recherche de défense, première partie », *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, n°54, 2001-4 (numéro spécial).

BONGRAND Jacques, *Les chemins de la Défense*, Paris, France-Empire, 2006.

CARPENTIER Jean, « La DRME et la DRET », dans « Aperçus historiques sur la recherche de défense, première partie », *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, n°54, 2001-4, p. 77-123.

CAVÉ René, *Centres de recherches : le Laboratoire central de l'armement*, Paris, CEDOCAR, 1999 (Comité pour l'Histoire de l'armement terrestre, tome 3.1).

« De l'IMFL [Institut de mécanique des fluides de Lille] à l'ONERA Lille », *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, n°56, 2002-2 (numéro spécial).

« La direction des recherches études et techniques », *L'Armement*, n°65, avril 1981 (numéro spécial 20^e anniversaire de la DRME/DRET, sur la recherche de Défense, la programmation des études amont, la DRET et ses établissements : ONERA, ETCA, ISL...).

FAYOLLE, *Centres de recherches : les autres centres de recherche*, Paris, CEDOCAR, 1999 (Comité pour l'Histoire de l'armement terrestre, tome 3.2).

GIOVACHINI Laurent, *L'armement français au XX^e siècle*, Paris, Ellipses, 2000.

Les ingénieurs militaires et l'émergence d'une nouvelle industrie française de l'armement, 1945-1960, Paris, CHARME-CHEAr/DHAr, 2000 (plusieurs témoignages dont ceux de Marc Pélegrin et Jacques Stern).

LEMAIRE B., « Un témoignage sur l'histoire de la DAM du Commissariat à l'Énergie Atomique », dans « La recherche de Défense et son environnement », *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, n°58, 2002-4, p. 39-55.

L'optronique militaire en France, 1945-1985, Paris, CHARME-CHEAr/DHAr, 2004.

ROBERT Michel, « 30 ans de composites : mon vécu à la DGA », *10^{ème} Conférence Technique du Chapter Français du SAMP*, 22 novembre 2001 (l'importance des DE et DTP vue au travers de la maîtrise des matériaux composites)

Les sciences mécaniques et l'avenir industriel de la France, rapport de l'Académie des sciences au Président de la République, La documentation française, septembre 1980 (rapporteur Paul Germain, secrétaire perpétuel l'Académie des sciences).

Politique et recherche aéronautique :

ANDRÉ Pierre, « Les turboréacteurs de grande puissance en France et la contribution des ingénieurs allemands après la guerre », *Revue Pégase*, n°111, 4^e trimestre 2003.

CALMON Jean, « Baptisé M88 », dans « Aperçus historiques sur la recherche de défense, seconde partie », *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, n°55, 2002-1, p. 101-110.

CALMON Jean, « La politique française des moteurs d'avions de combat », *Revue Pégase*, n°74, juillet 1994.

CARPENTIER Jean, n° spécial « La recherche aéronautique et les progrès de l'aviation », *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, n°40, 1998-2.

CARPENTIER Jean, « Recherches et progrès aérospatiaux : le quarantième anniversaire de l'ONERA », *La Vie des sciences, comptes rendus de l'Académie des sciences*, série générale, tome 4, n°5, septembre-octobre 1987, p. 405-436.

CARPENTIER Jean, « Les techniques aéronautiques et l'évolution de l'aviation militaire des origines à 1940 », *La recherche de Défense et son environnement, Revue Scientifique et Technique de la Défense*, n°58, 2002-4, p. 63-106.

DELOR Bruno, « De l'Ouragan au Rafale », *Revue Pégase*, n°70, juin 1993.

Hommage au Professeur Lucien Malavard, rendu le 13 mars 1991 au MRT, plaquette éditée par l'ONERA.

LECOMTE Pierre, SOISSONS Jean (dir.), *Sup'aéro 1909-1984*, Toulouse, CEPADUES-EDITIONS, 1984.

Livre d'Or de l'École nationale supérieure de l'Aéronautique – cinquante années d'existence 1909-1959, impr. SDIT, 1959.

POISSON-QUINTON Philippe, « Chalais-Meudon : la naissance de l'ONERA - le rôle de Pierre Rebuffet », *Les nouvelles de l'ONERA*, 14 juillet 1989.

POISSON-QUINTON Philippe, « De l'aérostation à l'espace », *Les nouvelles de l'ONERA*, 14 juillet 1989.

POISSON-QUINTON Philippe, « Le rôle de l'ONERA dans le programme Concorde », *Revue L'Aéronautique et l'Astronautique*, n°157, 1992-6,

QUÉRISEL Jean, *Albert Caquot (1881-1976), savant, soldat et bâtisseur*, Marne-la-Vallée, Presses des Ponts et chaussées, 2001.

SOISSONS Jean (dir.), *L'industrie aéronautique et spatiale française 1907-1982*, Paris, GIFAS, 1984, 3 tomes.

SOISSONS Jean, *Le corps de l'aéronautique 1924-1968*, Paris, Publications de l'Armement, 1988.

SOISSONS Jean, « Les relations entre l'État et l'aéronautique », dans « Aperçus historiques sur la recherche de défense, seconde partie », *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, n°55, 2002-1, p. 49-60.

SOISSONS Jean, « La politique spatiale française dans les années 60 », *Revue Pégase*, n°111, 4^e trimestre 2003.

PIERRE Marcel, *Le Centre d'essais de l'ONERA à Modane-Avrieux*, ONERA, 1987-1996, 3 tomes.

Sur les radars :

AAAF, n°1, 1996 (articles sur RBE2).

AAAF, n°3, 1996 (articles sur Mirage 2000-5 et Mica).

L'Armement, n°37, Paris, ADDIM, 1993 (numéro spécial).

BLANCHARD Yves, *Le radar 1904-2004. Histoire d'un siècle d'innovations techniques et opérationnelles*, Paris, Ellipses 2004.

BARATAULT Pierre (dir.), *Les radars de Thalès. Volume 2 : Radars aéroportés*, Éditions Thalès, 2002.

ROUSSEAU Gérard, « RBE2 : le radar du Rafale », *L'Armement*, n°47, Paris, ADDIM, 1995.

Sur les réacteurs :

ANDRÉ Pierre (dir.), *A propos de l'ATAR*, Burovit, 1995.

ANDRÉ Pierre, « Les turboréacteurs en France et les ingénieurs allemands », *Revue Pégase*, 4^e trimestre 2003, n°111.

BODEMER Alfred, LAUGIER Robert, *L'ATAR et tous les autres turboréacteurs français*, J.D. Reber, 1996.

DECÔME Guy, *Joseph Szydlowski et son temps, l'aventure de Turboméca*, Toulouse, Printech, 1998.

Sur la coopération internationale :

L'Aéronautique et Astronautique, 1991-1, n°146 (Sur la recherche et les programmes européens).

Les Nouvelles de l'ONERA, Hiver 1992, n°97 (Sur les relations internationales).

POISSON-QUINTON Philippe, « La recherche aéronautique à l'heure européenne », *L'Aéronautique et Astronautique*, 1989-3 et 1989-4, n°136-137.

QUEINEC Alain, « Le projet de soufflerie transsonique européenne », *Revue L'Armement*, octobre 1987, NS-N°9, p.108-131.

Brochures sur l'ONERA à l'occasion de ses anniversaires :

20 ans, n°7 juin 1966, numéro spécial des Nouvelles de l'ONERA.

40 ans, ONERA, 1946-1986.

50 ans de recherches aéronautiques et spatiales, ONERA, Paris 1997.

Publications institutionnelles et professionnelles :

Publications scientifiques et techniques du ministère de l'Air : le n°1 (1930) est relatif à une communication de Maurice Roy sur le moteur à réaction, le n°296 (1955) aux actes du colloque CNRS tenu en 1952 à Marseille sur les instituts de mécanique des fluides (évoqués au chapitre II du présent ouvrage de COMAERO).

Revue bimensuelle de l'AFITAE : « Techniques et sciences aéronautiques » (1943-55), « Techniques et sciences aéronautiques et spatiales » (1956-72), puis de l'AAAF : « L'Aéronautique et l'Astronautique » (1972-93), « Nouvelle revue Aéronautique et Astronautique » (1993-98) : nombreux numéros (exemple du stato dans le n°153 1992-2).

Informations SUP'AERO, revue de l'association des anciens élèves de SUPAERO, sur les matériaux (12/1990), la propulsion (12/1987), l'aérodynamique (7/1995), l'ergonomie « homo aeronauticus » (1/1995), le travail aérien (5/1992), les essais en vol (12/92), l'électronique embarquée (12/91).