

COMAERO
COMITE POUR L'HISTOIRE DE L'AERONAUTIQUE

UN DEMI-SIÈCLE D'AÉRONAUTIQUE EN FRANCE
CENTRES ET MOYENS D'ESSAIS

Ouvrage coordonné par Jean-Pierre Marec

TOME II

Ouvrage COMAERO édité par l'Onera/Service de l'information scientifique et technique
et de la documentation

La mise en forme de cet ouvrage a été assurée par Jean-Pierre Marec

TABLE DES MATIÈRES DU TOME II

| | |
|---|----|
| RAPPEL : EXTRAIT DE LA TABLE DES MATIERES DU TOME I..... | 8 |
| CHAPITRE 7 : LE CEL (CENTRE D'ESSAIS DES LANDES)..... | 11 |
| 1 – Le CIEES..... | 11 |
| 2 – Le développement des moyens techniques à Hammaguir..... | 12 |
| 3 – La création du CEL..... | 13 |
| 4 – Les sites techniques..... | 14 |
| 5 – Dixième anniversaire..... | 16 |
| 6 – La maturité..... | 17 |
| 7 – L'évolution préparatoire aux essais du M4..... | 17 |
| 8 – L'activité dans les années 1980..... | 18 |
| 9 – La nouvelle génération des engins tactiques..... | 19 |
| 10 – Les adaptations majeures des années 1990..... | 19 |
| 11 – Les essais des missiles tactiques en développement en 1995..... | 20 |
| 12 – L'entraînement des forces en 1995..... | 21 |
| Bibliographie..... | 21 |
| Remerciements..... | 22 |
| Figures..... | 23 |
| CHAPITRE 8 : LE CEM (CENTRE D'ESSAIS DE LA MEDITERRANEE)..... | 29 |
| 1 – Introduction..... | 29 |
| 2 – Origine..... | 29 |
| 3 – Création du CERES..... | 30 |
| 4 – Développement du GTES..... | 31 |
| 5 – Rattachement du GTES à la DRME..... | 32 |
| 6 – Rattachement du polygone de La Renardière au GTES..... | 32 |
| 7 – Création du CEM..... | 32 |
| 8 – Développement des moyens d'essais et de mesures du CEM..... | 33 |
| 8.1 – 1950-1960 : premières campagnes d'essais..... | 33 |
| 8.2 – 1960-1970 : essais balistiques – augmentation des moyens de mesure..... | 33 |
| 8.3 – 1970-1980 : essais mer-mer et sous-marins – TREMAIL – COSMAR..... | 35 |
| 8.4 – 1970-1980 : développement du CEM comme base repli ASMP..... | 36 |
| 8.5 – 1980-1995 : amélioration du TREMAIL et des moyens d'essais..... | 37 |
| 9 – Les moyens d'essais navals du CEM..... | 37 |
| 9.1 – L'île d'Oléron..... | 37 |
| 9.2 – La Combattante..... | 38 |
| 9.3 – Bâtiments de surface : La Tourmaline..... | 38 |
| 9.4 – Cibles marines de surface..... | 38 |
| 9.5 – Cibles sous-marines..... | 38 |
| 10 – Les moyens d'essais aériens du CEM..... | 39 |
| 11 – La vie sur le Centre et sa logistique..... | 39 |
| 12 – Les campagnes de lancement..... | 41 |
| 12.1 – Les campagnes pour la Marine..... | 41 |
| 12.2 – Campagnes pour les organismes externes à la Marine..... | 42 |
| 12.3 – Les autres campagnes d'essais..... | 43 |

| | |
|--|----|
| Bibliographie..... | 43 |
| Remerciements..... | 43 |
| Figures..... | 45 |
| | |
| CHAPITRE 9 : LE CAEPE (CENTRE D'ACHEVEMENT ET D'ESSAIS DE PROPULSEURS ET D'ENGINS)..... | 49 |
| 1 – Les origines..... | 49 |
| 1.1 – <i>Moulin-Bonneau : centre d'essais</i> | 49 |
| 1.2 – <i>Bois de Candale : centre d'achèvement</i> | 50 |
| 1.3 – <i>Création du Centre d'achèvement et d'essais des propulseurs et engins</i> | 51 |
| 2 – Activité essais, missiles balistiques..... | 52 |
| 2.1 – <i>Etudes balistiques de base et essais</i> | 52 |
| 2.2 – <i>Première génération de missiles</i> | 53 |
| 2.3 – <i>Missile M4</i> | 54 |
| 2.4 – <i>Développements exploratoires</i> | 53 |
| 2.5 – <i>Missile Hadès</i> | 54 |
| 2.6 – <i>Missile S45</i> | 54 |
| 2.7 – <i>Missile M51</i> | 54 |
| 2.8 – <i>Bancs d'essais balistiques</i> | 54 |
| 3 – Activité essais, missiles tactiques..... | 56 |
| 3.1 – <i>Essais de vieillissement</i> | 56 |
| 3.2 – <i>Essais de sécurité</i> | 56 |
| 3.3 – <i>Essais de caractérisation de jets</i> | 57 |
| 4 – Les mesures..... | 57 |
| 5 – Ariane 5 et CAEPE..... | 57 |
| 6 – Activité achèvement..... | 58 |
| 7 – Effectifs..... | 59 |
| Bibliographie..... | 59 |
| Remerciements..... | 59 |
| Figures..... | 61 |
| | |
| CHAPITRE 10 : LE LRBA (LABORATOIRE DE RECHERCHES BALISTIQUES ET AÉRODYNAMIQUES)..... | 69 |
| 1 – Introduction..... | 69 |
| 2 – Implantation domaniale..... | 69 |
| 3 – L'acquisition des connaissances techniques..... | 69 |
| 4 – Les premiers grands projets..... | 71 |
| 5 – La situation des organisations étatiques industrielles..... | 75 |
| 6 – Maturité de l'expertise technique, d'abord l'inertie et les systèmes stratégiques..... | 76 |
| 7 – La qualité, les essais et l'environnement..... | 80 |
| 8 – L'aérodynamique au LRBA..... | 81 |
| 9 – Vers de nouveaux horizons..... | 82 |
| Annexe : Les directeurs du LRBA..... | 83 |
| Bibliographie..... | 83 |
| Remerciements..... | 84 |
| Figures..... | 85 |

| | |
|---|-----|
| CHAPITRE 11 : LE CEG (CENTRE D'ETUDES DE GRAMMAT)..... | 89 |
| 1 – Le CEG de 1947 à 1980..... | 89 |
| 1.1 – <i>La création du CEG (1947)</i> | 89 |
| 1.2 – <i>La deuxième naissance du CEG (1955)</i> | 89 |
| 1.3 – <i>La Convention CEA-DEFA : 7 ans de collaboration (1962-1969)</i> | 91 |
| 1.4 – <i>Le CEG de 1970 à 1980</i> | 92 |
| 2 – Le CEG de 1980 à 2000..... | 93 |
| 2.1 – <i>Les années 80 : la majorité</i> | 93 |
| 2.2 – <i>Une reconnaissance de performance officialisée</i> | 94 |
| 2.3 – <i>Des équipements expérimentaux et informatiques toujours plus performants</i> | 95 |
| 2.4 – <i>Une nouvelle menace électromagnétique : les micro-ondes</i> | 95 |
| 2.5 – <i>La place de plus en plus importante des numériciens</i> | 96 |
| 2.6 – <i>Un passage obligé pour les bonnes décisions</i> | 96 |
| Bibliographie..... | 96 |
| Remerciements..... | 97 |
| Figures..... | 99 |
| | |
| CHAPITRE 12 : LE CELAR (CENTRE D'ELECTRONIQUE DE L'ARMEMENT)..... | 105 |
| Introduction..... | 105 |
| 1 – Le SCTI..... | 105 |
| 2 – La création du CELAR..... | 106 |
| 2.1 – <i>Les missions du début</i> | 106 |
| 2.2 – <i>L'implantation</i> | 107 |
| 2.3 – <i>Le personnel, son accueil et son logement</i> | 108 |
| 2.4 – <i>Le chantier des bâtiments</i> | 109 |
| 2.5 – <i>Les premières équipes et le démarrage des activités</i> | 110 |
| 3 – Création du CCSA..... | 110 |
| 4 – Les années 1970..... | 111 |
| 4.1 – <i>Recentrage des missions</i> | 111 |
| 4.2 – <i>Activités transférées depuis la région parisienne</i> | 112 |
| 4.3 – <i>Les réalisations nouvelles</i> | 113 |
| 4.4 – <i>L'évolution de l'organisation du Centre</i> | 114 |
| 4.5 – <i>Les effectifs</i> | 115 |
| 5 – Les années 1980..... | 119 |
| 5.1 – <i>Le départ du fondateur et la nomination de ses successeurs</i> | 116 |
| 5.2 – <i>Une nouvelle organisation</i> | 116 |
| 5.3 – <i>L'évolution des activités</i> | 117 |
| 6 – Les années 1990..... | 119 |
| 6.1 – <i>Les directeurs</i> | 120 |
| 6.2 – <i>La fin du CCSA et de la simulation pilotée</i> | 120 |
| 6.3 – <i>Conséquences des réorganisations de la DGA sur le rattachement, les missions et l'organisation du Centre</i> | 120 |
| 6.4 – <i>L'évolution des activités</i> | 121 |
| 7 – La suite..... | 121 |
| Bibliographie..... | 122 |
| Figures..... | 123 |

| | |
|--|-----|
| CHAPITRE 13 : L'ONERA (OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE RECHERCHES AEROSPATIALES)..... | 133 |
| Introduction..... | 133 |
| 1 - Les grandes souffleries et les bancs d'essais..... | 134 |
| 1.1 – Introduction..... | 134 |
| 1.2 - Centre de Chalais-Meudon..... | 135 |
| 1.2.1 – Introduction..... | 135 |
| 1.2.2 – Soufflerie S1Ch..... | 135 |
| 1.2.3 – Soufflerie S2Ch..... | 138 |
| 1.3- Centre de Modane-Avrieux..... | 139 |
| 1.3.1 – Introduction..... | 139 |
| 1.3.2 – Soufflerie SIMA..... | 140 |
| 1.3.3 – Soufflerie S2MA..... | 148 |
| 1.3.4 – Soufflerie S3MA..... | 151 |
| 1.3.5 – Soufflerie S4MA..... | 154 |
| 1.3.6 – Caisson S4B..... | 156 |
| 1.3.7 – Soufflerie de grilles R4.3..... | 156 |
| 1.3.8 – Bancs de dynalpie à gaz froid (BD 1) et à gaz chaud (BD 2)..... | 157 |
| 1.3.9 – Bancs d'étalonnages dynamométriques..... | 157 |
| 1.3.10 – Moyens informatiques..... | 157 |
| 1.3.11 – Réseaux d'air comprimé..... | 158 |
| 1.4- Centre du Fauga-Mauzac..... | 159 |
| 1.4.1 – Introduction..... | 159 |
| 1.4.2 – Soufflerie F1..... | 159 |
| 1.4.3 – Soufflerie F4..... | 162 |
| 1.4.4 – Réseaux d'air comprimé..... | 164 |
| 1.4.5 – La direction des Grands moyens d'essais (GME)..... | 165 |
| 1.5- Centre de Palaiseau..... | 167 |
| 1.6- Centre de Lille (IMFL)..... | 168 |
| 1.6.1 – Introduction..... | 168 |
| 1.6.2 – Moyens du groupe de mécanique du vol..... | 168 |
| 1.6.3 – Moyens du Groupe de mécanique des fluides appliquée..... | 171 |
| 1.7- Autres souffleries ou moyens..... | 172 |
| 1.7.1 – Soufflerie de Cannes..... | 172 |
| 1.7.2 – Station d'essais de givrage du Mont-Lachat (Savoie)... | 173 |
| 2- Les moyens d'analyse modale ONERA-SOPEMEA..... | 173 |
| 2.1- Introduction..... | 173 |
| 2.2- Les moyens de l'ONERA..... | 174 |
| 2.3- Les moyens de la SOPEMEA..... | 176 |
| 2.4- Le moyen commun ONERA-SOPEMEA : l'installation MIMOSA..... | 178 |
| 2.5- Conclusion..... | 179 |
| 3- L'ONERA et les centres d'essais de la DCAé..... | 179 |
| 3.1- Introduction..... | 179 |
| 3.2- L'ONERA et le CEV..... | 179 |
| 3.3- L'ONERA et le CEAT..... | 182 |
| 3.4- L'ONERA et le CEPr..... | 183 |

| | |
|--|-----|
| Bibliographie..... | 184 |
| Remerciements..... | 185 |
| Figures..... | 187 |
| | |
| ANNEXE : DISSUASION NUCLEAIRE ET MISSILES BALISTIQUES..... | 239 |
| | |
| BIOGRAPHIES DES AUTEURS..... | 243 |
| | |
| SIGLES..... | 249 |
| | |
| INDEX DES NOMS..... | 259 |
| | |
| CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES..... | 265 |

RAPPEL : EXTRAIT DE LA TABLE DES MATIERES DU TOME I

PRÉFACE

AVANT-PROPOS

INTRODUCTION

- 1 – La place des centres d'essais et leur évolution
- 2 – Historique succinct de quelques établissements
- 3 – Chronologie

CHAPITRE 1 : LE CEV (CENTRE D'ESSAIS EN VOL)

Préambule

- 1 – Introduction
- 2 – Les missions du CEV
- 3 – Organisation
- 4 – Les personnels
- 5 – Moyens matériels du CEV
- 6 – Les activités du CEV
- 7 – Gestion du CEV
- 8 – Conclusion

Sources

Remerciements

Figures

CHAPITRE 2 : LE CEAT (CENTRE D'ESSAIS AERONAUTIQUES DE TOULOUSE)

- 1 – Historique
- 2 – Les missions du CEAT
- 3 – Les activités

Annexes

Bibliographie

Remerciements

Figures

CHAPITRE 3 : LE CEPR (CENTRE D'ESSAIS DES PROPULSEURS)

Avertissement

- 1 – Les origines du CEPr
- 2 – De la création jusqu'aux années 70 : la mise en place de l'outil
- 3 – Les années 70 : la consolidation, les grands programmes
- 4 – Les années 80-95 : la rénovation
- 5 – Au-delà des moyens, des hommes et des femmes
- 6 – Conclusion

Annexes

Bibliographie

Remerciements

Figures

CHAPITRE 4 : LE CAP (CENTRE AEROPORTE DE TOULOUSE)

- 1 – Introduction
 - 2 – Historique
 - 3 – Implantation – Moyens d’essais
 - 4 – Les missions du CAP
 - 5 – Nouvel avion, nouvelle approche
 - 6 – Evolution du Centre d’essais
 - 7 – Nouveau parachute d’arme et moyens d’instruction associés
 - 8 – Equipements pour sauts à ouverture commandée
 - 9 – Le système d’arme lié au Transall C160
 - 10 – L’amélioration des méthodes de largage
- Bibliographie
Figures

CHAPITRE 5 : LE CIEES (CENTRE INTERARMEES D’ESSAIS D’ENGINS SPECIAUX)

- 1 – Introduction
 - 2 – Missions et organisation du Centre
 - 3 – Les implantations du CIEES
 - 4 – Les moyens techniques du CIEES jusqu’aux années 1959-60
 - 5 – Les essais de la DTIA
 - 6 – Les essais de la DEFA
 - 7 – Les fusées-sondes
 - 8 – La gestation du champ de tir pour engin balistique
 - 9 – Du projet initial à la réalisation
 - 10 – Les équipements du champ de tir pour engins balistiques
 - 11 – Le déroulement des essais du programme d’engin balistique
 - 12 – Le CNES, Diamant et le premier satellite
- Annexe
Bibliographie
Remerciements
Figures

CHAPITRE 6 : LE SECT (SERVICE DES EQUIPEMENTS DE CHAMPS DE TIR)

- Introduction
- 1 – Première partie : Historique du service et de sa succession
 - 2 – Deuxième partie : Les domaines techniques où le SECT, puis le CTME sont intervenus
- Annexe
Bibliographie
Remerciements
Figures

CHAPITRE 7

Le CEL (Centre d'essais des Landes)¹

Le CEL, comparable aux plus réputés centres d'essais de missiles dans le monde, doit beaucoup au CIEES (Centre interarmées d'essais des engins spéciaux) qui en fut le prototype saharien.

1 - LE CIEES²

Créé en avril 1947, le CIEES devient le site des lancements des premières versions de la fusée sonde Véronique du LRBA (Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques) de Vernon (d'où le nom de « Véronique »), qui y sont effectués dans le cadre de l'année géophysique internationale de 1957 à 1958.

Les tirs de Véronique sont alors largement commentés par la presse locale l'« Echo d'Oran » en 1959. C'est en effet l'année marquante des recherches en haute atmosphère menées par le Service d'aéronomie dirigé par le professeur Jacques Blamont. Les observateurs du moment ont certainement conservé l'image fameuse des nuages de sodium au soleil couchant.

Le général Maurice Guérin, président du CASDN (Comité d'action scientifique de la Défense nationale), accompagné de Wolfgang Pilz, ancien des équipes allemandes V1 et V2, assista à un lancement en mars de la même année.

C'est encore en 1959 que fut créée la SEREB (Société d'études et de réalisations d'engins balistiques), intégrée plus tard dans l'Aérospatiale, et la naissance du besoin d'un grand champ de tir balistique. C'est ainsi qu'il fut décidé de créer le champ de tir du Sahara à partir du CIEES de Colomb-Béchar et de sa base d'Hammaguir.

En 5 ans, de 1961 à 1966, plus de 50 vecteurs aux noms précieux, Agate, Topaze, Émeraude, Rubis, Saphir, embraseront la base de lancement Brigitte d'Hammaguir. Ces études balistiques de base seront à l'origine des composantes de la force française de dissuasion.

La portée des tirs, importante pour l'époque, nécessita la mise en place de réceptacles à 1 500 km dans la région de Djanet dans le Tassili et à 2 100 km entre Agadez et Niamey (ça fait encore rêver !), dotés de moyens de communication précaires avec Hammaguir.

Parallèlement, Diamant A était développé, dérivé directement de Saphir. En mai 1962, le CNES (Centre national d'études spatiales) avait confié la direction de programme du lanceur à la DMA (Délégation ministérielle pour l'armement), la SEREB assurant la maîtrise d'oeuvre générale, maîtrise d'oeuvre reprise par le CNES pour les Diamant B. Ainsi vola Astérix, premier et modeste satellite français de

¹ Par Michel Lecomte.

² Voir également le chapitre 5 (CIEES) de ce document.

39 kg, le 16 novembre 1965. Mais enfin, ce petit objet donnait à la France son rang de 3^e puissance spatiale et rendait crédible aux yeux du monde sa capacité de construire une force de dissuasion. Entre 1952 et 1967, plus de 160 tirs de fusées-sondes, dont 74 Véronique et autres sondes ou vecteurs technologiques de Sud-Aviation et de l'ONERA - aux noms évocateurs comme Bélier, Centaure, Dragon, Dauphin ou Antarès - ont laissé une signature éphémère dans le ciel saharien.

Le CIEES fut un site d'expérimentation unique où se concrétisèrent des choix technologiques fondamentaux et nécessaires pour acquérir une maîtrise forte des lanceurs et plus généralement des techniques du spatial.

De cette époque il faut aussi garder le souvenir d'un pouvoir politique qui sut mettre les moyens à la hauteur des enjeux, gage de la réussite qui suivit.

Les lancements, en février 1967, des Diamant 3 et 4 mirent un point final à l'activité balistique d'Hammaguir et le site fut remis aux autorités algériennes le 1^{er} juillet 1967 conformément aux accords d'Evian.

2 - LE DEVELOPPEMENT DES MOYENS TECHNIQUES A HAMMAGUIR

La dimension saharienne du site se prêtait à une disposition optimale des moyens d'essais et des bases de lancement convenant aux portées des missiles balistiques de l'époque. Le SECT³ (Service des équipements des champs de tir), implanté au fort de Montrouge, sous l'autorité de la DRME (Direction des recherches et moyens d'essais), fut chargé des études et du développement des moyens d'essais et de l'architecture générale du Centre comprenant les différents sites de mesures et de contrôle des tirs. La SEREB eut dans le même temps à créer la base de lancement balistique et les pas de tir adaptés aux propulseurs à poudres et à liquides.

Le CEL bénéficie alors des expérimentations et des prototypes développés pour le CIEES ; quelques exemples sont évoqués plus loin pour la trajectographie et les télémessures. Les radars Cotal, la télémessure Sat-Turck, les moyens de datation et d'enregistrement montrent très vite leurs insuffisances en portée, en capacité d'information ou en précision, à la fin des années 1950.

Les grandes réalisations datent des années 1960 ; on peut en survoler quelques-unes, parmi les principales, outre les bases de lancement :

- l'architecture générale du Centre, les régies, les réseaux de transmission de données et radio, la distribution de datations codées, le poste central de direction des opérations ;
- les moyens de trajectographie électromagnétique sont nombreux et font appel à toutes les théories connues : fizeaugraphe ; interféromètres à champ d'antennes de 4 hectares positionnées avec une grande précision ; radars, dont l'Aquitaine doté d'une tourelle exceptionnelle, prototype installé à Béchar qui aura une longue carrière et finira à Quimper ; super-Cotal amélioré pour servir en acquisition et désignation d'objectif ;
- les moyens optiques de trajectographie par cinéthéodolites ;
- les moyens d'observation par caméras de toutes focales, dont les vitesses atteignaient 1 000 i/s. Le télescope IGOR (*Intercept Ground Optical Recorder*) de 12,5 m de focale permettait de lire l'immatriculation d'un avion à 100 km lorsque la

³ Voir le chapitre 6 de ce document.

nébulosité l'autorisait ; il était connu pour sa dérive en température, difficile à maîtriser au Sahara ;

- les laboratoires de développement des kilomètres de films produits et les recherches d'émulsions donnant les meilleures couleurs ou le contraste approprié ; les lectrices automatiques ou manuelles ;

- les stations de télémesures avec Cyclope I, antenne parabolique de 18,5 m d'ouverture ; Ajax, télémesure analogique au standard IRIG (*Inter-Range Instrumentation Group*) ; les enregistreurs magnétiques d'instrumentation à têtes ferrites ;

- les prémices du système de téléneutralisation pour la destruction de missiles dangereux. A Hammaguir, l'espace non habité était tel que cette préoccupation passait au second plan ; elle sera impérative au CEL. Comme disait un ancien : « Au Sahara il suffit de matérialiser le point d'impact par un drapeau ! ».

L'ensemble des études et développements fut mené dans des délais contraignants, sous la maîtrise d'ouvrage et l'expertise des groupes techniques composés d'ingénieurs du SECT, et pour l'essentiel réalisé dans l'industrie française.

Pour conclure brièvement sur le CIEES, il ressort que l'effort produit était concentré sur les essais balistiques avec l'objectif majeur du moment : la dissuasion. Ainsi le dispositif d'essai était-il adapté aux tirs de vecteurs et aussi aux largages de la bombe sous Mirage IV. Les missiles tactiques, dans l'esprit des concepteurs du Centre, devaient *a fortiori* y trouver les moyens de réaliser leurs essais. Ce jugement quelque peu abrupt faisait exception pour les cibles aériennes. Le CT20 était opérationnel ; les Mistral, avions télépilotés, cibles réalistes, étaient utilisés avec moins de risques qu'à Cazaux, où leurs essais avaient été interrompus. Il faut aussi se souvenir des essais de la cible CT41 (figure 1), en avance sur son temps car sa propulsion à statoréacteur la mettait hors de portée des missiles de l'époque !

3 - LA CREATION DU CEL

Le 4 juillet 1962, Pierre Messmer, ministre des Armées, décide en termes agrestes de créer le Centre d'essais des Landes⁴ «dans les massifs forestiers de Biscarrosse et de Sainte Eulalie».

Ce choix résultait de la recherche : d'une zone faiblement habitée de dimension suffisante pour assurer la sécurité en phase initiale d'une trajectoire verticale ; d'axes de tir sans survol de zones habitées ; d'une extension de plusieurs milliers de km avec un réceptacle marin utilisable sans trop de contraintes internationales.

Le CERES (Centre d'essais et de recherches d'engins spéciaux), sur l'Île du Levant, et d'autres sites en Méditerranée ne répondaient pas au problème ; la Guyane était techniquement attrayante : tirs vers l'est, située à 4° au nord de l'équateur ; mais l'expérience du soutien coûteux du CIEES dû à l'éloignement de la métropole fit abandonner cette solution.

⁴ De 1962 à 1997, le CEL a été dirigé par : Jean Soissons (1962-1969), René Bloch (1969-1981), Jean-Pierre Bacou (1981-1983), Michel Deforges (1983-1990), Jean-Baptiste Dard (1991-1995), Pierre Jamin (1995-1997).

La création du CEL à Biscarrosse devait s'inscrire dans la politique de développement du territoire, en coopération avec la DATAR (Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale), le Conseil général des Landes, les municipalités et l'Office national des forêts qui devait continuer à gérer et à exploiter les pins domaniaux. Quelques propriétaires privés complétaient ce tableau. Tous ces acteurs se comportèrent avec beaucoup de civisme. Le Centre promettait des centaines d'emplois locaux, la construction de logements dans les villages voisins, vivifiant ainsi l'économie locale.

La base aérienne, l'annexe du CEV (Centre d'essais en vol) à Cazaux, créée après la dernière guerre, constituaient des atouts importants. Les champs de tir terrestres du Trencat entre Biscarrosse et Arcachon, de Calamar à Cazaux, les réservations de zones aériennes et maritimes avaient permis les premiers essais air-sol et air-air.

L'existence des installations de l'ancienne base des hydravions Latécoère aux Hourtquets apportait les moyens d'une installation provisoire permettant de réaliser rapidement les premiers essais.

L'emprise principale du Centre devait occuper les 15 000 ha sur la bande littorale de 25 km de long entre Biscarrosse au nord, Mimizan au sud, et de 6 km de large, limitée par les étangs de Biscarrosse-Parentis et d'Aureilhan à l'est.

4 - LES SITES TECHNIQUES

L'implantation des sites techniques pouvait commencer.

Moins de quatre ans plus tard, le 15 février 1966, le premier missile balistique s'élevait dans le ciel landais. Ce tir impliquait l'utilisation de tous les types de moyens techniques et témoignait de leur état d'achèvement. Les moyens étaient répartis le long de la côte, en utilisant au mieux les crêtes de dunes, et distribués autour des bases de lancement. Citons :

- les points optiques avec leurs cinéthéodolites et leurs télescopes ;
- la trajectographie par interférométrie et radars ;
- le dispositif de télé-neutralisation du missile ;
- la réception et l'enregistrement des télémessures ;
- le poste de direction des essais, PCCT (Poste central de conduite de tir), doté de l'horloge de datation et de synchronisation des mesures, des outils de supervision reportant l'état des moyens, des calculateurs restituant en temps réel les données cinématiques des missiles, tout particulièrement pour la sauvegarde.

Dans le même temps naissait la station d'Hourtin (figure 2) assurant un flanquement à 100 km au nord de l'emprise principale. Dotée d'un ensemble réduit de moyens de mesures identiques à ceux de Biscarrosse, elle permettait de s'affranchir de l'affaiblissement que subissent les moyens radioélectriques visant au travers du jet des propulseurs des missiles balistiques et assurait la continuité des mesures. Elle donnait aussi de l'allonge au champ de tir côtier pour d'autres types de missiles.

Au réceptacle était inaugurée, le 6 octobre 1966, la station de l'Île de Florès (figure 3), la plus occidentale des Açores. Dédiée aux essais des missiles

balistiques, elle devait assurer les mesures en phases balistique et de rentrée. L'installation des moyens mis en « *shelters* » et préalablement testés à Biscarrosse fut une grande aventure car il fallut tout prévoir, de la centrale électrique à la piste pour les Transall et de l'ingénieur au médecin. Une annexe à l'aéroport de Santa-Maria servait de base-relais pour les avions d'observation au réceptacle AMOR (Avion de mesure et d'observation au réceptacle) et les Transall en transit entre Cazaux et Florès. Enfin une annexe à Lisbonne, liée à l'ambassade de France, entretenait les relations avec les autorités portugaises. Les liaisons entre la station et Biscarrosse s'opéraient à l'aide de 9 émetteurs HF de forte puissance et d'immenses antennes-râteaux qui perdaient parfois des brins par fort vent açoréen !

Les coopérants importants comme le bâtiment d'essais et de mesures *Henri Poincaré*, les escorteurs d'escadre *Guépratte* et *Savoyard*, et les avions de mesure et d'observation dotés d'équipements embarqués similaires à ceux du CEL ou spécifiques de leurs missions au réceptacle, complétaient le dispositif.

Un très important réseau de télécommunication comprenant phonie et transmissions de données entre les îlots techniques, liaisons VHF, UHF, HF et télévision avec les aéronefs et les bateaux participant à l'essai, maillait l'ensemble.

D'autres domaines complétaient ce dispositif dédié à la mesure et à la conduite des essais :

- les cibles aériennes et marines ;
- les rails d'essais dynamiques.

Les cibles

Les cibles aériennes de base sont alors le CT20 et l'AQM37A Vanneau aéroportée couvrant le domaine des vitesses jusqu'à Mach 2 et celui des altitudes de 35 m à 20 000 m. Elles ont des capacités d'emport permettant de simuler une surface équivalente radar, des flammes infrarouges ; d'emporter un proximètre pour la restitution de la distance de passage missile-cible ; d'emporter différents leurres. Elles ne sont pas très manoeuvrantes, mais suffisantes face aux missiles de l'époque. Elles coûtent cher, d'où la réalisation de cibles rustiques tractées par avion et récupérables comme l'Emir ou la Del Mar retenue par l'armée de l'Air ; encore plus simple, adaptée au tir d'entraînement au canon, la cible Soulé ou la SECAPEM (cible aérienne tractée) dotée d'une lentille de Lüneberg, de flammes IR et d'un compte-coups.

Le guidage assisté par ordinateur des avions tireurs, de façon à les conduire au plus près de la trajectoire prévue par la figure d'interception, fut une belle évolution et une utilisation remarquable par les guideurs du dispositif de trajectographie et de calcul en temps réel.

Les cibles marines sont fixes ou mobiles tractées par la vedette télépilotée *Aliénor* construite spécialement. La cible trimaran est très utilisée face aux Exocet ; elle est représentative d'un navire de tonnage variable faisant route à environ vingt nœuds. Un dispositif optique permet de restituer la distance de passage à 0,5 m près, l'attitude missile-cible, et de produire des vues étonnantes comme celles d'un MM38 traversant un filet de pêche tendu sur la cible comme moyen complémentaire de proximétrie ! Ces tirs à très très basse altitude ont aussi conduit à construire des

bouées accélérométriques transmettant la hauteur des vagues en temps réel par télémesure.

Les rails de simulation

Un monorail R1 de 1 200 m et un birail de 600 m, de retour du CIEES, constituent l'installation la plus performante d'Europe. L'expérimentation sur rail est intermédiaire entre les simulations en laboratoire et les essais en vol. Des roquettes ou un propulseur à eau surchauffée produisent la poussée. Des rétrofusées, un dispositif de freinage hydrodynamique à mousse et des barrières élastiques permettent la récupération pour les essais non destructifs. Un dispositif de mesures radioélectriques et d'observation optique assure le recueil des données.

Le premier tir date du 29 février 1968. Les essais les plus divers comme l'éjection des sièges du Rafale, l'éjection des sous-munitions de l'Apache, les tests de qualification de fusées de proximité du Mica, l'éjection de leurres électromagnétiques, ont contribué au bon développement des programmes.

Pour servir en temps et en heure cette importante structure faisant appel à des techniques diversifiées, il fallait réunir très vite un personnel nombreux et compétent. Une partie provenait progressivement de Béchar. L'idée intéressante fut de faire recruter les nouveaux civils et militaires par le SECT, de les intégrer dans ses groupes techniques pour les former chez les industriels constructeurs en les faisant participer ou parfois en les chargeant d'effectuer les essais et les recettes des matériels. Ils participaient à l'installation sur les points techniques sous le contrôle des ingénieurs de l'antenne du SECT à Biscarrosse ; cette dernière étape durait quelques mois en général. A l'issue de cette période, ils prenaient en charge l'exploitation des matériels en tant que personnels du CEL. Ce processus se révéla fort efficace en temps et en acquisition de compétences et dura jusqu'à la disparition de l'antenne en 1972.

Les premiers essais débutaient moins de 2 ans après la création :

- 1964 : Cible téléguidée CT20 avec le concours du CEV le 11 mars , Matra 511 le 12 mars, Tartar le 3 juin, AS 30 le 23 juillet, artillerie anti-aérienne le 21 septembre ;
- 1965 : Hawk le 11 mai ;
- 1966 : SSBS (Sol-sol balistique stratégique) le 15 février.

5 - DIXIEME ANNIVERSAIRE

Michel Debré, ministre en charge de la Défense nationale, constatait en juillet 1972 « la contribution essentielle apportée par le CEL à la mise au point des MSBS (Mer-sol balistiques stratégiques) et des SSBS de la force de dissuasion » et, plus loin dans sa lettre, « [le CEL] offre pour les essais des engins tactiques des possibilités uniques en Europe ».

Cette manière de s'exprimer (oublions le ton emphatique propre à la fonction) illustre parfaitement un CEL dont le développement était à l'image de ce que souhaitait le programme nucléaire, et tant mieux si d'autres essais moins prioritaires pouvaient s'y réaliser. Cette appréciation vaudra jusqu'au milieu de la décennie 1980 car, à partir de là, les développements du Centre seront déterminés par les performances des engins tactiques de nouvelle génération Mica, Apache, Aster.

6 - LA MATURITE

Nous sommes en 1975, les moyens sont maîtrisés, les méthodes évoluées et abouties, l'organisation est en place, les installations logistiques performantes. La rigueur s'inscrit dans les modes opératoires.

Tout programme d'essais commence par une réunion des utilisateurs du Centre organisée par la DRME/SDME (Sous-direction des moyens d'essais). Les trois états-majors, les directions techniques de la DMA, le CEA (Commissariat à l'énergie atomique), le CNES, l'ONERA (Office national d'études et de recherches aérospatiales), la Météo nationale, le SECT y sont conviés.

Il en résulte un plan triennal et un plan annuel notifiés au Centre par la SDME. Chaque programme d'essai y est pris en charge par un ingénieur RPE (Responsable de programme d'essai), lequel reçoit du « client » les scénarii de l'essai et les mesures à restituer, informe les services techniques du Centre et analyse avec eux les capacités de satisfaire les besoins exprimés. A l'issue de cette phase tendant à faire converger besoins et capacités, le RPE publie une fiche programme de l'essai et une fiche de sauvegarde, et sont alors désignés un officier d'essai (OE) chargé de la conduite opérationnelle de l'essai et un officier responsable de la sauvegarde en vol (OSV) ; l'OE écrit l'ordre d'essai, document contractuel signé par le client, le CEL et ses coopérants. Chaque service technique soumet, dans un ordre d'exécution interne, les modes opératoires et les restitutions qui lui incombent.

Au jour « J », de son pupitre de chef d'orchestre, l'OE contrôle que les partitions sont en place et déclenche la chronologie... et chacun espère que la trajectoire du missile ne justifie pas sa destruction par l'OSV. Le tir achevé, commencent les travaux de dépouillement et la restitution des mesures exploitables par les bureaux d'études.

7 - L'EVOLUTION PREPARATOIRE AUX ESSAIS DU M4

En avril 1975 est créée la commission du dispositif d'essais M4 sous la responsabilité de la DRME. Elle a pour mission de définir les mises à hauteur et les adaptations du dispositif d'essai. Certains équipements sont concernés :

- la réception des télémesures change de fréquence, le nombre de canaux augmente avec le nombre de têtes du missile ;
- certains radars nécessitent une refonte technologique pour les adapter à la poursuite multi-objectifs ;
- quelques ordinateurs de la chaîne temps réel sont remplacés ;
- un second radar est installé à Florès pour la trajectographie séquentielle du cortège.

La puissance et la portée accrues du missile justifient la création d'une annexe de grand flanquement en Bretagne (figure 4). Située à proximité de Quimper, dominant l'aérodrome de Pluguffan, entre les lieux-dits l'Enfer et le Paradis (!), elle est édifiée en 3 ans et prête pour le premier tir de sous-marin en 1982. Reliée à l'emprise principale par un réseau de faisceaux hertziens troposphériques, son équipement est semblable à celui de Hourtin.

Son intérêt est double : elle permet la continuité des mesures pour les tirs de terre ou de mer devant Biscarrosse ; elle sert de base de mesures au départ pour des tirs

jusqu'à 6 000 km au large du Brésil. Elle limite le transit du sous-marin depuis l'Île Longue.

L'histoire du radar Aquitaine qui y est installé mérite qu'on s'y attarde : prototype de la série de 5, sorti de la Thomson en 1963, installé à Hammaguir puis à Béchar en 1964, il constata la mise en orbite d'Astérix en novembre 1965 ; après un rajeunissement à Thomson Bagneux, on le retrouve à la Colle Noire au CEM (Centre d'essais de la Méditerranée) ; de nouveau à Bagneux pour une transformation électronique profonde en 1977, il aboutit à l'annexe le 28 février 1980. Primitivement destiné à un système d'armes et heureusement transportable, il vit encore en 2010 en ayant conservé ses performances mécaniques d'origine.

Le 1er juin 1977, le CEL quitte la DRME pour la DEn (Direction des engins). Cette organisation verticale des activités revendiquée par la DEn depuis plusieurs années a fini par l'emporter contre la volonté de la DRME de conserver une indépendance vis-à-vis des directions de programmes. Cette situation nouvelle est bénéfique pour les investissements du Centre et favorise les essais des missiles en développement dont les programmes sont conduits par le STEn (Service technique des engins balistiques) pour le nucléaire et par le STET (Service technique des engins tactiques) pour les missiles tactiques.

Pendant l'entraînement des forces n'est pas oublié ; ainsi dans la même année le CEL a développé un outil pour l'entraînement au combat aérien des pilotes de l'armée de l'Air (AA), le SYRCA (Système de restitution de combat aérien). Initialement mis au point comme support d'évaluation technico-opérationnelle du Magic, le SYRCA est utilisé pour entraîner les pilotes de l'AA et de l'Aéronautique navale au combat rapproché avec missile.

Le SYRCA élabore à partir de la trajectographie radar une visualisation dans l'espace des trajectoires du couple chasseur-but et une représentation du domaine de tir du missile. Les combats sont enregistrés et, après l'atterrissage, les pilotes peuvent analyser et revivre les phases du combat.

Installé ensuite dans les annexes d'Hourtin pour l'AA, avec un déport de visualisation sur la base de Mont-de-Marsan, et à Quimper pour l'Aéronavale, avec un déport à Landivisiau, ce dispositif sera encore exploité par le CEAM (Centre d'expérimentations aériennes militaires de Mont-de-Marsan) pour l'expérimentation du Magic II sous Mirage 2000 au début des années 1980. Il s'est révélé comme étant le complément en vraie grandeur des simulateurs du CELAr (Centre électronique de l'armement), dont il s'est inspiré.

8 - L'ACTIVITE DANS LES ANNEES 1980

Elle se partage de manière assez équilibrée entre les essais de développement et l'entraînement des forces (figure 5). Dépassant en moyenne 300 essais par an, les records sont de 366 (dont 214 de développement) en 1981 et de 382 (dont 204 d'entraînement) en 1988. S'y ajoutent 150 lancements de cibles. Cette forte activité conduit à repenser le fonctionnement du poste central de conduite des tirs, PCCT, de façon à imbriquer les phases de préparation, d'exécution et de restitution immédiate (« *quick look* »).

Chaque année a son lot de tirs difficiles et réussis comme en 1984 le tir d'un missile Super 530 Doppler contre une cible supersonique Vanneau et l'interception

d'un Exocet par un Crotale naval (figure 6), cette fois tiré du sol, événements relatés dans la presse spécialisée.

En 1987, le CEL célébra son quart de siècle en présence des plus hautes autorités du Ministère. Ce fut l'occasion de réunir tous les acteurs de sa création, Des souvenirs enthousiastes et intacts furent échangés. Il convient de citer ici l'IGA Michel Deforges, alors directeur : « Puisse la méditation de leur exemple ne jamais nous abandonner et constituer pour nous la référence constante vers laquelle nous tourner, de façon à maintenir dans nos rangs l'enthousiasme de ceux qui nous ont si bien ouvert le chemin ».

La fin de la décennie promet des essais encore plus difficiles avec les programmes Aster, Mica et Apache.

9 - LA NOUVELLE GENERATION DES ENGINES TACTIQUES

Les missiles Aster 15 et Aster 30 (figure 7) surtout posent divers problèmes :

- les cibles doivent être représentatives de la menace : supersoniques, plongeantes ou très basse altitude ;
- l'acquisition du missile doit être très rapide, compte-tenu de sa vitesse et de sa manœuvrabilité ;
- la trajectoire verticale au départ conduit à des mesures de sauvegarde particulières ;
- les outils de proximité doivent être performants.

Le missile Mica (figure 8), outre sa forte manœuvrabilité, pose le problème des tirs multimobiles. Il faut pouvoir guider, trajectographier plusieurs missiles et cibles, et appliquer des actions de sauvegarde sélectives.

Le missile Apache (figure 9), tiré « à distance de sécurité », demande 150 km d'extension, dont une bonne partie à basse altitude entre 50 et 150 m, un survol terrestre et une piste d'aérodrome comme cible d'évaluation de la précision des sous-munitions.

Ces trois programmes vont donc conduire à des adaptations profondes du Centre pour avoir une panoplie de cibles aériennes adaptées, être capable de mener des essais multimobiles et avoir une couverture de mesures continue sur plus de 100 km à basse altitude.

Dès 1989, le tir du S530, en évaluation technico-opérationnelle ETO 10 sur cible supersonique plongeante AQM 37C en mode brouillé, est caractérisé par deux nouveautés : le pilotage de la cible par une télécommande fonctionnelle installée à Hourtin et le guidage simultané de 4 mobiles. Cet essai préfigure ceux du Mica.

10 - LES ADAPTATIONS MAJEURES DES ANNEES 1990

Au PCCT (figure10), on peut citer :

- la refonte complète de la salle de conduite des opérations, dotée de stations graphiques remplaçant les tables traçantes ;
- la réalisation d'une salle de préparation des essais et de formation des personnels ;

- la réalisation d'une salle d'analyse différée ;
- la refonte des régies radio, interphone et télévision ;
- la refonte des réseaux pour améliorer les temps de réponse et de configuration : pose de fibres optiques, évolutions conformes aux nouveaux standards de télécom ;
- la refonte du système de télé-neutralisation, projet Etna, consistant dans le remplacement des émetteurs, la multiplication des ordres transmis et l'utilisation des codes de sécurité renforcée ;
- la création de stations mobiles en shelters aéro-transportables de trajectographie GPS (*Global Positioning System*), de télémessures et de télé-neutralisation, complémentaires des équipements fixes pour assurer la couverture totale des trajectoires à basse altitude et pour prévoir des essais de survol terrestre de longueur significative sur d'autres champs de tir.

Quatre classes de cibles aériennes sont alors identifiées :

- le haut de gamme avec la C22L (figure 11) et les AQM-37 (*target drone*) ;
- la gamme moyenne Chukar 3, Falconet et Mirach 100 de la classe des CT20 en fin de vie ;
- le bas de gamme Banshee, Aspic, cibles secondaires tractées par C22 ou par avion.

Hors la C22, la plupart des cibles sont objets de contrats de prestations de services auprès des constructeurs ; cette façon de procéder rompt avec le passé. Des cibles spéciales, hélicoptères, avions, ou missiles, complètent cette panoplie.

Pour les cibles marines, Alix a remplacé Alienor ; une cible nouvelle est née pour les tirs d'armement guidé par laser, fabriquée en série et heureusement peu coûteuse, car elle est souvent détruite !

Une base de lancement surface-air, FSAF (Famille sol-air futurs), est construite pour les Aster et une mini-piste pour Apache.

Deux aspects technologiques :

- les moyens optiques abandonnent le film argentique au profit de la vidéo et des images numériques au fur et mesure des progrès de leur définition, en y relevant deux avantages : moins de développements spécifiques en utilisant les évolutions technologiques du marché civil et des coûts faibles ;
- l'explosion de la micro-informatique permet des traitements répartis facilement évolutifs à des coûts beaucoup plus faibles qu'auparavant.

Pour conclure et démontrer la validité des options prises, il est intéressant de se remémorer les essais de 1995.

11- Les essais des missiles tactiques en développement en 1995

Six tirs de Mica ont été réalisés. Deux de ces tirs nécessitèrent le vol en patrouille de deux C22 dont les évolutions relatives devaient être parfaitement maîtrisées. Le prototype de la version marine du Rafale effectua son premier tir de ce missile. On note aussi le premier tir de Mica en version infrarouge.

Un tir d'Apache en missile complet, avec un survol terrestre court du CEL, et le tir d'une maquette pilotée, non propulsée, par un Tornado de la Luftwaffe contribuèrent à ce programme.

Le premier tir d'un Aster 30 depuis la base FSAF à partir d'un camion français TRM 10 000 fut également réalisé avec succès.

Cette série de tirs valut aux équipes du CEL et du CEV de Cazaux les félicitations du Directeur des missiles et de l'espace (ex DEn) et du Délégué général pour l'armement.

D'autres essais de développement ont eu lieu, moins en vue mais importants pour le futur, comme le second tir du MPSR2 à statofusée rustique et celui du missile Polyphème franco-allemand filoguidé par fibre optique.

12- L'ENTRAÎNEMENT DES FORCES EN 1995

20 Mistral (figure 12) sur cibles Fox pour l'armée de Terre et 24 Magic pour l'armée de l'Air contribuèrent à une forte activité, en particulier du service cibles.

Pour assurer tous ces essais, 74 cibles dont vingt C22, onze CT20 et vingt-sept Fox, ont été lancées.

Enfin les moyens mobiles auront trouvé un plein emploi au cours du premier tir Apache en 1996 sur le plus grand champ de tir terrestre européen à Vidsel en Suède ; par ailleurs, c'est un bel exemple de coopération des équipes d'essais.

Les années 1995 et 1996 sont marquées par de grands changements dans l'organisation de la DGA (Délégation générale pour l'armement) ; pour le CEL, rattaché à la nouvelle Direction des centres d'essais, DCE, c'est le début d'une forte contraction des moyens humains et financiers, conséquence des resserrments imposés par des ressources de plus en plus limitées. Les essais moins nombreux mais globaux seront encore plus compliqués. C'est là, la poursuite d'une histoire qui sort des limites de l'épure de ce document.

BIBLIOGRAPHIE

Chevallier D. *Les missiles balistiques, champs de tir et essais en vol*, fascicule publié en 2004 par SNE, 12 rue de l'Arbalète, 75005 Paris.

« La saga des missiles européens », www.ttu.fr/francais/frdocpdf/saga5-fin.pdf.

CELacanthé, publication périodique de liaison interne du CEL.

Comptes rendus annuels d'activités du CEL, documents internes non publiés.

Publications des 10^e et 25^e Anniversaires du CEL, fascicules non publiés.

« 5, 4, 3, 2, 1, 0, feu », ouvrage collectif du CEL, 1976, non publié.

REMERCIEMENTS

Au directeur du CEL, Jean-Luc Masset, pour son accueil chaleureux et confiant, à Jean-François Rouzeau pour sa disponibilité et son aide, et aux personnels du CEL que j'ai sollicités, sans pouvoir les nommer tous.



Fig. 1
Engin cible CT41



Fig. 2
Annexe de Hourtin



Fig. 3
Annexe de Florès



Fig. 4
Annexe de Quimper

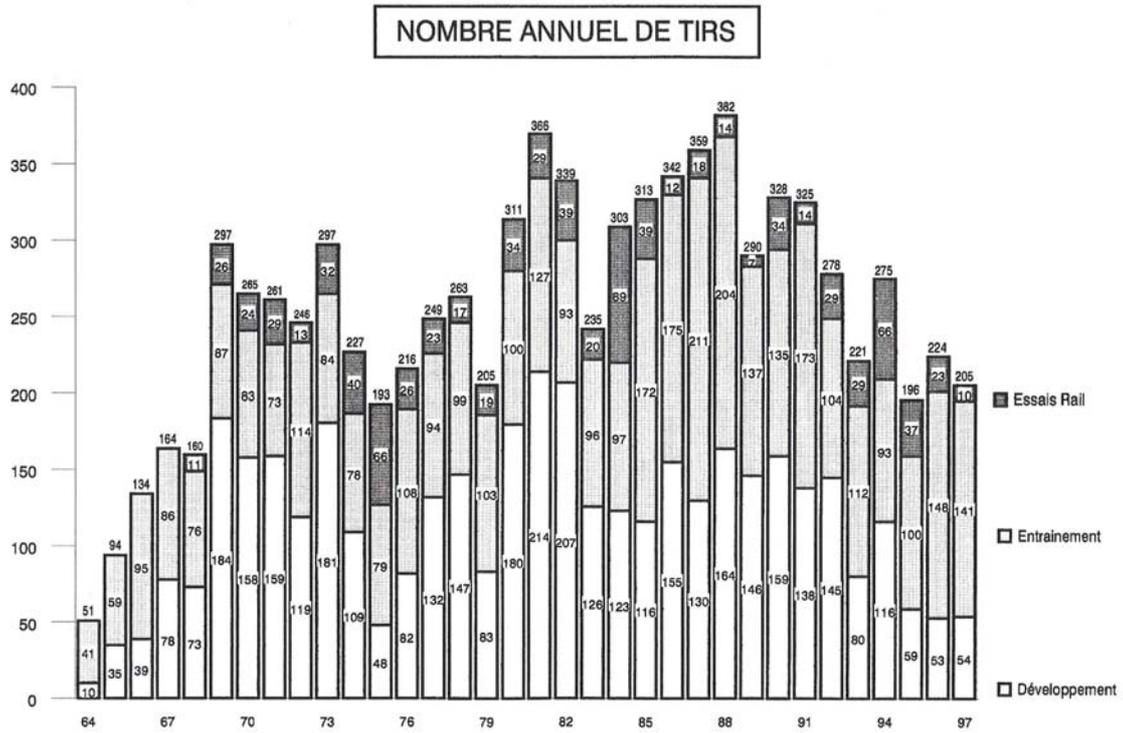


Fig. 5
Statistique des tirs



Fig.6
Crotale naval



Fig. 7
Aster



Fig. 8
Mica



Fig. 9
Apache



Fig. 10
"Salle OPS" : PCCT (Poste central de conduite de tir)



Fig. 11
Cible C22



Fig. 12
Mistral

COMAERO

CHAPITRE 8

Le CEM (Centre d'essais de la Méditerranée)¹

1 - INTRODUCTION

Contrairement au Centre interarmées d'essais d'engins spéciaux (CIEES)² et au Centre d'essais des Landes (CEL)³ qui furent créés d'emblée dans leur structure organique quasi définitive, le Centre d'essais de la Méditerranée (CEM) ne vit le jour, en tant que CEM, qu'au terme d'une gestation d'une vingtaine d'années.

En effet, en 1948, c'est seulement avec une poignée de personnes que furent réalisées les premières campagnes d'essais. Rapidement, les effectifs grossirent, mais les structures qui les abritaient dépendaient de Directions différentes : état-major de la Marine (EMM), Direction des constructions navales (DCN), Direction des recherches et moyens d'essais (DRME). Cet état de fait entraînait forcément des problèmes administratifs, financiers, voire disciplinaires qui nécessitèrent à plusieurs reprises des Instructions interdirections. Et c'est seulement en 1968 que le CEM fut créé et permit de résoudre ces problèmes. Il faut cependant souligner que sur le plan opérationnel la coopération fut toujours sans faille pendant toute cette période initiale.

2 - ORIGINE

C'est donc à partir de 1948 que les premiers essais "d'engins spéciaux", comme s'appelaient alors les missiles, eurent lieu pour le compte de la Direction des constructions et armes navales (DCAN). Il s'agissait des premiers essais en vol :

- du planeur cible SE2400, par la Société nationale de construction aéronautique du Sud-Est (SNCASE) ;
- du planeur cible ECA, lancé d'avion ;
- de la torpille planante L20, lancée d'avion, étudiée par la DCAN ;
- des bombes guidées FX, lancées d'avion.

La Commission d'études pratiques d'aviation (CEPA), implantée sur la base aéronavale de Saint-Raphaël, reçut la mission de mettre en place les moyens nécessaires au lancement et à l'observation de ces essais. Cette tâche incombait au Groupe technique engins spéciaux (GTES) de la CEPA, dont le chef était l'IGM Maurice Natta.

Ces essais ne nécessitant pas d'infrastructure permanente de lancement au sol ni théoriquement de zone arrière de sécurité, ne demandaient que la création d'un champ de tir en mer, à proximité de la côte pour l'implantation de moyens d'observation.

¹ Par Claude Etienne, Jean-Baptiste Dard et Maurice Natta.

² Voir le chapitre 5 de ce document.

³ Voir le chapitre 7 de ce document.

À l'époque, 1945–1946, la zone comprenant la presqu'île de Camarat, avec le Sémaphore de Camarat, et la très longue plage de Pampelonne, totalement déserte, s'imposa à l'évidence.

Cette zone présentait les avantages suivants :

- existence d'une laisse de mer de l'ordre de 100 mètres, propriété de l'Etat, permettant d'implanter des infrastructures provisoires avec le seul accord des Domaines ;
- absence d'habitation sur une profondeur de l'ordre de 1 000 mètres ;
- espace maritime utilisable sur des dizaines de milles nautiques.

Après concertation avec la Prud'homie de pêche de Saint-Tropez, concernée au plus haut point par la création d'un champ de tir en mer, un projet de champ de tir fut proposé à la Préfecture maritime de la III^e Région (PREMAR III) et sa création décidée.

À cette époque, le Service technique de l'armée de Terre (STAT) avait une antenne au Fort de Saint-Tropez, commandée par le capitaine Ferreol. Cette antenne disposait de radars d'artillerie et de cinéthéodolites, mais n'occupait que peu de personnel et avait une activité réduite.

Contact fut pris par l'IGM Maurice Natta avec le capitaine Ferreol, pour voir dans quelle mesure cette antenne du STAT pourrait aider à l'observation des essais de la CEPA.

Suite à ce contact, un accord fut passé entre le chef du STAT, le général Lavaud et l'IGM Maurice Natta pour la mise à la disposition de la CEPA des moyens du STAT et l'hébergement au Fort de Saint-Tropez du personnel de la CEPA.

Peu de temps après, le général Lavaud, venu en inspection, proposa de transférer le Fort de Saint-Tropez et le matériel à la CEPA, ce qui fut fait.

A partir de ce moment-là, le service Mesures de la CEPA installa à demeure en plus d'un poste de commandement sur la plage de Pampelonne, deux postes de cinéthéodolites (l'un à Pampelonne, sur la plage, et l'autre au Sémaphore de Camarat). Ces moyens étaient mis en œuvre par une équipe réduite de six personnes basée au Fort de Saint-Tropez.

3 - CREATION DU CERES

Avec le développement des essais, ce champ de tir s'avéra rapidement insuffisant et ne présentait plus les conditions de sécurité requises par les essais demandés.

Par ailleurs, la Marine nationale ressentait le besoin de créer son propre centre d'essais de missiles. En effet, le CIEES basé à Colomb-Béchar, en plein désert, ne pouvait répondre aux problèmes spécifiques de la Marine (essais des engins surface/sous-marin, vol au ras de l'eau, résistance à l'air salin, etc.). De plus, la Marine désirait créer un centre d'entraînement pour l'escadre et l'aéronavale, ce centre devant obligatoirement être proche de l'Arsenal de Toulon. L'île du Levant (figure 1), que la Marine nationale avait acquise en 1892 à l'exception du village naturaliste d'Héliopolis et dont elle se servait pour ses tirs à terre, répondait parfaitement aux critères requis pour les deux centres. La décision fut donc prise de l'utiliser pour les essais de lancement à partir de terre.

Sans attendre la création d'infrastructures permanentes, les premières campagnes d'essais furent organisées avec le soutien des moyens de la III^e Région maritime qui assurait :

- les transports des personnels et des matériels ;
- l'hébergement du personnel sur un navire basé dans l'anse de Port Avis, à l'Île du Levant.

La première campagne eut lieu au profit de la SNCASE en janvier 1949 pour les essais du planeur cible SE2400.

Suivirent des campagnes pour l'avion cible ARS/5500 dérivé du V1 allemand, étudié par la Société nationale de construction aéronautique du Nord (SNCAN).

Dès 1951, les premiers crédits nécessaires étaient mis en place et les infrastructures indispensables à la vie du personnel et aux lancements commencèrent à être installées par la Direction des travaux maritimes (DTM) de la III^e Région maritime.

Le 5 août 1952, le Centre d'essais désiré par la Marine nationale fut créé sous le nom de Centre d'essais et de recherches d'engins spéciaux (CERES). Son premier commandant fut le capitaine de corvette Claude Roux.

4 - DEVELOPPEMENT DU GTES

Très rapidement le nombre d'essais augmenta et l'importance des dépouillements à effectuer devint telle que les moyens du Centre technique de la base de Saint-Raphaël devinrent insuffisants. Les cadences des campagnes de lancement étaient freinées et les activités propres de la base également pénalisées. Par ailleurs, les perspectives de la mise en service des missiles à bord des navires et sur les avions de l'aéronautique navale militaient en faveur de la création d'un service technique indépendant.

En 1955, le Groupe technique des engins spéciaux (GTES) devint indépendant de la CEPA. Il fut alors basé dans l'enceinte de l'Arsenal de Toulon et placé sous l'autorité du directeur des Constructions navales. Son rôle était triple :

- étude et montage des installations du Centre ;
- mise en place des moyens techniques nécessaires à l'exécution des essais et des mesures ;
- dépouillement des mesures.

Le plan d'armement en personnel du GTES comprenait 3 ingénieurs du Génie maritime, 5 ingénieurs des Directions de travaux et 67 chefs de travaux et ouvriers.

Le CERES et le GTES dépendaient hiérarchiquement de deux entités différentes : le premier de l'état-major de la Marine, le deuxième de la Direction centrale des constructions et armes navales. Pour concrétiser la liaison intime qui devait exister entre les deux, un ingénieur du GTES était en poste à l'Île du Levant comme adjoint technique au commandant du Centre. Il était chargé de la partie technique de l'exécution des lancements et de la direction du personnel du GTES détaché au Centre.

Pour traiter les mesures relevées par les cinéthéodolites du CERES, le GTES était doté d'un laboratoire de développement photographique et d'un centre de calcul équipé d'un IBM 650. Cet ordinateur à cartes perforées et à tubes nécessitait un équipement de refroidissement important occupant une pièce plus grande que celle de l'ordinateur !

Le GTES disposait également d'un atelier de remise en état des engins cibles CT10 puis CT20 récupérés en mer à la fin de leur vol.

Rapidement la portée des trajectoires des missiles lancés au CERES devint supérieure aux possibilités des cinéthéodolites. Aussi, en 1959, le GTES se dota d'un ensemble de trajectographie radioélectrique avec un poste principal au sommet du Coudon (figure 2), mont en arrière de Toulon, et des stations secondaires proches. Ultérieurement la couverture aérienne fut étendue par l'implantation d'autres postes secondaires notamment sur le mont Agel au-dessus de Monaco, à Coti Chiavari en Corse, et à Perpignan. Cette extension permit de couvrir une zone allant jusqu'à 500 km au sud de l'île.

5 - RATTACHEMENT DU GTES A LA DRME

En 1961 fut créée la Délégation ministérielle pour l'armement (DMA) avec pour objectif de rationaliser les moyens techniques des Armées. Notamment fut créée la Direction des recherches et moyens d'essai (DRME) destinée à regrouper les moyens correspondants des Directions techniques militaires. Dès 1962, le GTES fut rattaché à la DRME, la DCAN de Toulon apportant son soutien logistique par ses bureaux d'étude et ses ateliers et assurant également la gestion du personnel du GTES.

Si, sur le terrain, la coopération opérationnelle était excellente entre tous les acteurs, l'imbrication précédente ainsi que l'appartenance de la Base du Levant à la Marine nationale amenaient quelques difficultés dans la répartition du financement de l'ensemble CERES-GTES et nécessitèrent une instruction du ministre des Armées, Pierre Messmer, sur ces financements en novembre 1965.

6 - RATTACHEMENT DU POLYGONE DE LA RENARDIERE AU GTES

À Toulon était installé depuis de nombreuses années l'Etablissement technique de Toulon (ETTN) dépendant de la Direction technique de l'armement terrestre (DTAT). L'ETTN disposait du polygone d'essai de La Renardière sur la presqu'île de Saint-Mandrier. Les activités de ce polygone étaient surtout axées sur les essais d'armes légères d'artillerie et de roquettes. Elles portaient également sur des essais d'armes sous-marines à courte portée (grenades anti-sous-marines, etc.).

En 1963, par décision ministérielle, l'ETTN fut dissout et le polygone de La Renardière avec son personnel fut rattaché au GTES.

7 - CREATION DU CEM

Le 13 juillet 1968, Pierre Messmer, ministre des Armées, signa la décision portant création du Centre d'essais de la Méditerranée. Cette décision stipulait que le CEM regroupait sous son autorité unique les activités, les personnels, l'infrastructure et les équipements du CERES, du GTES et du polygone de La Renardière.

La décision précisait que "la mission du CEM est de mettre à la disposition des Armées (états-majors et directions techniques) et de tout organisme national, les moyens généraux permanents nécessaires pour l'exécution d'activités militaires, techniques et scientifiques nécessitant des zones de sauvegarde contrôlées étendues".

Une instruction conjointe de l'état-major de la Marine et de la DMA mit en œuvre cette décision. Elle précisa notamment que le CEM était dirigé par un directeur et un directeur-adjoint choisis, l'un parmi le corps des officiers de marine, l'autre parmi le corps des ingénieurs de l'armement. Le directeur-adjoint remplaçait le directeur en son absence et avait les mêmes attributions que lui.

8 - DEVELOPPEMENT DES MOYENS D'ESSAIS ET DE MESURES DU CEM

8.1 - 1950 – 1960 : premières campagnes d'essais

Les premières campagnes d'essais eurent lieu, comme il a été rappelé plus haut dès janvier 1949 et concernèrent les engins cibles SE2400 et ARS5500. Les premiers essais de missiles eux-mêmes commencèrent sur l'île du Levant en 1951 avec les lancements du MARUCA.

Dès la création du CERES, d'autres organismes que la Marine utilisèrent les installations spécifiques du Centre : ONERA⁴, CNES, Matra, Dassault, SNCAN, SEREB, etc. Entre 1951 et 1957, le tiers des essais était effectué au profit de clients autres que la Marine. Cette proportion atteignit la moitié dans les années suivantes. En même temps, la variété et la complexité des essais croissaient : de quelques dizaines de tirs dans les années 50, à 465 lancements en 1960-61.

Mais jusqu'au début des années 60, ce furent surtout le MASURCA, successeur supersonique du MARUCA et, dans une moindre mesure, le MALAFON qui ont dimensionné le développement des moyens d'essais et de mesures du CEM ou plus exactement de l'ensemble CERES-GTES. Sur l'île du Levant se trouvait installée la totalité d'un système d'arme MASURCA : radar de veille aérienne, radar de conduite de tir ou illuminateur pour la version autoguidée, calculateur de tir IBM BGEa (ou PACA) et rampes de lancement ; une partie de ces moyens était utilisée pour d'autres essais, essentiellement les moyens de veille aérienne.

Le bâtiment d'expérimentation *île d'Oléron* a, lui aussi, été équipé pour l'expérimentation du MASURCA et comportait un système complet de lancement de ce missile.

Les deux organismes chargés du développement du système d'arme MASURCA étaient le Service technique des constructions et armes navales (STCAN) et l'Établissement de Ruelle, tous deux relevant de la Direction technique des constructions navales (DTCN). Ce sont eux qui exprimaient les principaux besoins en vue de faire évoluer les moyens de mesures et d'essais du Centre d'Essais (figure 3).

8.2 - 1960 – 1970 : essais balistiques – augmentation des moyens de mesure

A l'orée des années 60, deux décisions eurent un rôle déterminant pour l'élargissement des activités du CEM :

- la création de la Délégation ministérielle pour l'armement (DMA) et, au sein de la DMA, de la Direction des recherches et moyens d'essais (DRME), et le rattachement du GTES à la DRME ;

⁴ Voir le chapitre 13 de ce document.

- la décision par le Général de Gaulle de créer une force de dissuasion basée sur des missiles balistiques lancés entre autres à partir de sous-marins.

En effet, la fermeture programmée à cette époque du centre d'essais d'Hammaguir au Sahara (CIEES) et le fait que le Centre d'essais des Landes (CEL) était en cours d'installation et non encore opérationnel nécessitèrent de réaliser au CEM les essais préliminaires du programme de missiles balistiques.

En particulier il fallut pouvoir y exécuter des tirs de fusées-sondes et d'engins expérimentaux pour l'étude de la haute atmosphère, des phénomènes et contraintes lors des rentrées atmosphériques ; les organismes concernés par ces lancements étaient l'ONERA et le CNES. D'autres essais, pilotés par la SEREB, mettant en œuvre des maquettes d'expérimentation des futurs missiles balistiques, furent aussi réalisés.

Tous ces tirs, ainsi que les essais d'un missile balistique bi-étage moyenne portée MD620 développé par Dassault dans le cadre d'un contrat export, entraînèrent une importante évolution des moyens d'essais et de mesures financée par la DRME, et partiellement par Dassault :

- mise en place, en 1964, sur l'île du Levant, d'un radar de poursuite Aquitaine, de grande portée et grande précision, prélevé temporairement sur la série de radars de ce type destinés au Centre d'essais des Landes ;

- association, à ce radar, du calculateur de tir PACA du système MASURCA pour pouvoir réaliser, en temps réel, des calculs du point d'impact prévisionnel, et le visualiser sur table traçante en vue de la sauvegarde, mais aussi pour assurer l'interdésignation des moyens de poursuite ;

- refonte complète de la station de réception de télémétrie avec installation d'une nouvelle chaîne de réception au standard IRIG compatible avec tous les engins expérimentaux de l'époque ;

- mise en place de moyens de mesures aérologiques mettant en œuvre des radiosondes emportées en haute altitude par ballons et de fusées-sondes permettant des mesures des paramètres de l'atmosphère, en particulier le vent, en très haute altitude ;

- enfin, mise en place d'installations permettant d'assurer la fonction « réceptacle », c'est-à-dire le recueil des données au moment de la redescente vers la mer des têtes balistiques et la localisation des points d'impact, comportant : une station radar en Corse à Coti-Chiavari, un escorteur rapide de la Marine nationale muni des équipements de mesures nécessaires et un Noratlas du CEV (petit Amor) pour assurer la réception de la télémétrie pendant le vol du missile.

En complément des essais aériens, des essais de chasse de missiles en immersion et d'allumage en sortie d'eau furent réalisés dans les années 60. Les premiers essais portèrent sur l'étude de la sortie du tube du sous-marin : ils furent réalisés avec un caisson sous-marin immergé devant la pointe du Cannier de la presqu'île de Saint-Mandrier. Les maquettes inertes étaient expulsées par air comprimé et retombaient à proximité du caisson, la trajectoire sous-marine étant filmée par des caméras immergées.

Ces essais furent poursuivis par des lancements d'une série de maquettes (M112), dont seul le premier étage comportait une charge réduite de poudre propulsive ce qui leur donnait une portée d'environ 100 km. Les premières maquettes furent tirées à partir d'un caisson sous-marin. La maquette active était montée dans le caisson à l'Arsenal de Toulon puis celui-ci était remorqué jusqu'au

sud de l'île du Levant pour être installé sur un support immergé dans une anse de l'île. Après validation des sorties de caisson, les maquettes suivantes furent tirées à partir du sous-marin d'expérimentation *Gymnote*.

Ces essais prirent fin vers 1967 pour se poursuivre au Centre d'essais des Landes devenu opérationnel. À la même époque, le programme Dassault MD620 se terminait également.

La deuxième moitié des années 60 a vu aussi une forte évolution des moyens d'essais (conduite des essais et mesures) du CEM avec la réinstallation, sur l'île du Levant, des moyens rendus disponibles par la fermeture du CIEES. Ces moyens comportaient un ordinateur central, le KH, fabriqué par IBM pour le CIEES, des systèmes de transmission de données numériques, de très nombreux convertisseurs de données analogiques-numériques ou numériques-analogiques, des moyens de visualisation (essentiellement des tables traçantes), ainsi qu'un radar Aquitaine du même type que celui qui avait été installé en 1964 mais qui devait rejoindre le CEL.

C'est grâce à la récupération de tous ces moyens provenant d'Hammaguir que le CEM a pu prendre résolument le virage du traitement de l'information en temps réel. Les possibilités dans ce domaine devenaient alors très nettement supérieures à ce que permettait le ordinateur de tir PACA du système MASURCA. Parmi les autres moyens récupérés du fait de la fermeture du CIEES, il faut signaler la centrale électrique d'Hammaguir qui se composait de quatre puissants groupes électrogènes en shelters, ce qui a très sensiblement augmenté la capacité électrique du Centre sur l'île du Levant ainsi que la fiabilité de la production d'électricité.

8.3 - 1970 – 1980 : essais mer-mer et sous-marins – TREMAIL – COSMAR

Vers la fin des années 60 est apparu le besoin d'adapter les installations en vue d'effectuer les essais de missiles mer-mer évoluant à très basse altitude : la famille des engins Exocet⁵, le MM38 d'abord puis ceux qui devaient suivre (AM39, MM40, SM39). Ce besoin nouveau fut à l'origine d'un développement particulier des moyens d'essais et de mesures du CEM : création de deux postes de moyens optiques supplémentaires venant compléter les quatre postes situés sur les îles du Levant et Port Cros, l'un à Porquerolles et l'autre à l'extrémité de la presqu'île de Giens, ainsi que la création d'un point radar supplémentaire sur un point haut du continent proche du Pradet : la Colle Noire.

À partir de ce moment-là, l'ensemble des moyens du CEM (optiques et radioélectriques) permettaient de couvrir en très basse altitude une zone de 40 km de long à peu près parallèle à la côte.

Dès le début des expérimentations de l'Exocet, il fut envisagé d'en dériver une version tirée d'avion et une autre tirée de sous-marin en plongée. En même temps le développement des torpilles nouvelles nécessitait de restituer des trajectoires sous-marines de plus en plus importantes. Pour ces deux raisons, dès la fin des années 60 des études furent entreprises en vue de doter le CEM, au large des côtes de l'île du Levant et de Port-Cros, d'un polygone maritime permettant de trajectographier un ou plusieurs mobiles sous-marins. Cette installation fut longtemps différée compte tenu de son coût et n'a pu être finalement réalisée que vers le milieu des années 70, ce fut le polygone TREMAIL.

⁵ Poisson volant qui a donné son nom à une famille de missiles mer-mer.

Il comprenait trois trajectographes :

- deux, au sud de l'île, par fonds de 300 à 2 000 mètres ;
- un au nord de l'île, par fonds de 800 mètres.

Ces trajectographes étaient constitués d'hydrophones posés sur le fond et reliés individuellement à l'île par des câbles. Les mobiles à trajectographier étaient équipés d'émetteurs d'ultrasons appelés Pinger⁶.

L'émission des Pinger était reçue par plusieurs hydrophones, l'exploitation du signal reçu permettant par recoupement de reconstituer la position du mobile en trois dimensions et en temps réel, la précision était de quelques mètres. Cinq mobiles pouvaient être suivis simultanément : sous-marins, missiles à changement de milieu, torpilles, cibles sous-marines, etc. Il permit le développement de nouvelles torpilles ainsi que celui du missile à changement de milieu SM39. Celui-ci étant lancé depuis un sous-marin, il était indispensable de restituer les trajectoires sous-marine puis aérienne. Le CEM avec le polygone TREMAIL était parfaitement adapté pour répondre à ces conditions. Il faut souligner que cette possibilité était unique en Europe.

Autre évolution à signaler dans les moyens d'essais du CEM à cette époque : la mise en place, au début des années 70, au nord de l'île, dans une zone maritime située entre l'île et le continent, du polygone de contrôle de la cohérence et de la précision des systèmes d'armes des navires de guerre en service, le COSMAR, qui s'inspirait des polygones FORACS américains.

8.4 - 1970 – 1980 : développement du CEM comme base repli ASMP

Dans la deuxième moitié des années 70, la DGA se préoccupait déjà de l'évolution du système MSBS (Mer-sol balistique stratégique) et en particulier de lancer le développement d'un missile destiné à remplacer le M4. En même temps, elle préparait le développement de la future composante air-sol de la force de dissuasion, c'est-à-dire le système destiné à mettre en œuvre le futur missile ASMP tiré d'avion. Il est alors apparu nécessaire d'envisager un site de repli pour les essais ASMP, pour le cas où il apparaîtrait un conflit de priorité au CEL entre les essais du système MSBS et les essais de développement de l'ASMP.

La décision fut donc prise vers 1978 d'équiper le CEM en vue d'en faire ce site de repli où pourrait s'effectuer tout ou partie des essais de développement de l'ASMP. Il fut alors décidé de doter le CEM d'une station de contrôle et de mesures permettant d'effectuer des essais d'engins tirés d'avion et évoluant en altitude moyenne sur plusieurs centaines de kilomètres. Le poste de mesure déjà installé dans le fort Napoléon III au sommet du Coudon (voir figure 2, déjà citée) culminant à un peu plus de 700 mètres, près de Toulon, convenait parfaitement pour installer les moyens radioélectriques nécessaires : radars de poursuite, réception de télémesures, télécommande de sauvegarde. C'est ce qui fut décidé et la station de contrôle d'essai et de mesures fut opérationnelle au tout début des années 80. Il est à souligner que les moyens de réception de télémesure installés ont permis, dans une certaine mesure, d'intégrer la station du Coudon dans le réseau de réception des informations provenant des satellites d'observation militaires.

⁶ Appareil émettant des impulsions sonores, "ping" en anglais.

En fait cette station ne servit pas aux essais ASMP qui purent tous se faire au CEL, mais par contre elle représenta un atout important pour le CEM car la couverture au niveau de la mer des moyens électromagnétiques installés au Coudon, compte tenu de leur altitude, était très supérieure à celle que permettaient des moyens installés sur l'île du Levant ou sur les faibles hauteurs qui se trouvaient dans la bordure littorale (de ce fait, d'ailleurs, le site de la Colle Noire a été abandonné). Ceci a augmenté les possibilités du CEM pour l'expérimentation des missiles de type mer-mer à longue portée ainsi que pour l'entraînement des marines françaises ou étrangères lorsque de tels missiles sont mis en œuvre.

8.5 - 1980 – 1995 : amélioration du TREMAIL et des moyens d'essais

Le TREMAIL nécessitait d'installer sur le mobile à trajectographier un émetteur d'ultrasons Pinger. Malheureusement, cet émetteur perturbait l'autodirecteur (à ultrasons également) de la torpille en essai ! Aussi l'idée d'utiliser le bruit rayonné par la torpille elle-même, c'est-à-dire sa signature acoustique, comme signal pour les hydrophones du TREMAIL fut envisagée. Une étude fut confiée, à la Faculté de Toulon, au professeur Guy Bonnet, spécialiste d'acoustique sous-marine, et au professeur Cavassilas, spécialiste du traitement du signal. Une méthode de traitement du bruit rayonné par la torpille fut mise au point et son expérimentation au CEM donna entière satisfaction. Il fut désormais possible de supprimer le Pinger et de trajectographier le mobile à partir de son bruit propre.

Si peu de modifications notables furent apportées aux moyens de mesure du CEM pendant cette période, il faut cependant noter que le CEM participa à l'étude et à la réalisation d'un radar de trajectographie de nouvelle génération destiné à remplacer le radar BEARN.

Pour l'entraînement au tir du Roland par le 54^e Régiment de Hyères, un Poste de commandement (PC) Roland fut construit à la demande de l'EMAT (état-major de l'armée de Terre) au début des années 90. Inauguré en 1992, il remplaçait les installations provisoires qui étaient utilisées depuis 1981 pour les écoles à feu Roland.

Un autre PC fut construit pour effectuer les recettes du système de lancement de roquettes multiples MLRS suivant une méthode mise au point par le CEM.

9 - LES MOYENS D'ESSAIS NAVALS DU CEM

9.1 - L'île d'Oléron

Le besoin d'avoir un bâtiment d'expérimentation permettant d'effectuer en condition marine réelle les essais de missiles après leur première mise au point à terre s'était fait rapidement sentir. Le choix se porta en 1958 sur l'île d'Oléron qui était alors en "réserve spéciale" à Toulon, c'est-à-dire disponible. C'était un ancien bananier de 5 500 tonnes mis en chantier en 1939 à Brême puis transformé par les Allemands en forceur de blocus au début de la guerre. La Marine le trouva en parfait état à Saint Nazaire en 1945 sous le nom de *München*. Elle le rebaptisa *île d'Oléron* et l'utilisa comme bâtiment de transport de personnel jusqu'en 1952.

La transformation en bâtiment d'expérimentation fut réalisée en 1958 par les ateliers de la Direction des constructions navales de Toulon. À l'origine, il était équipé

de deux rampes de lancement de CT10 et d'un système d'arme MARUCA. En 1960, celui-ci fut transformé pour les essais du MASURCA qui se terminèrent par leur validation en 1968.

L'*Ile d'Oléron* continua ensuite sa carrière par des essais de missiles notamment les Exocet MM38 et MM40, Crotale et Aster (figure 4). Il servit également à l'expérimentation de presque tous les radars en service dans la Marine. Il fut retiré du service actif le 31 mars 2002, et le 18 avril 2003 il fut coulé comme cible de tir par la frégate *Courbet* au large de Toulon.

9.2 - La Combattante

La Combattante était un patrouilleur de 230 tonnes sur lequel furent essayés sans succès les SS10 et SS11 à la fin des années 50. En effet, ces missiles étaient filoguidés et dès que les fils touchaient la mer, les ordres de guidage étaient perturbés. En 1969, *La Combattante* fut équipée d'un poste de tir Exocet pour l'expérimentation de ce missile sur petit bâtiment. À la fin des essais, en 1970, *La Combattante* quitta le CEM.

9.3 - Bâtiments de surface : La Tourmaline

Les lancements vers le large nécessitaient de s'assurer que la zone couverte par ces lancements était dégagée. Pour les distances inférieures à quelques dizaines de milles nautiques, la surveillance fut assurée jusqu'à la fin des années 60 par deux vedettes côtières, P753 et P757. Ces deux vedettes furent remplacées en 1974 par *La Tourmaline*, vedette rapide de 26,80 mètres dérivée directement des unités construites pour les Douanes françaises. Outre la surveillance de zone, *La Tourmaline* servait à la récupération en mer des cibles téléguidées Fox ou C22.

En 1994, EADS (*European Aeronautic Defence and Space Company*) désirant dériver une version mer-mer du missile AS15TT réalisa une série de lancement à partir de *La Tourmaline*, celle-ci ayant été équipée d'une double rampe de lancement et d'un radar Agrion.

9.4 - Cibles marines de surface

Les cibles marines qui servaient d'objectif pour les missiles antinavires sont des structures flottantes tirées par un bâtiment. Celui-ci fut d'abord *La Combattante* puis *La Tourmaline*. A la fin des années 90, le CEM fut équipé de la vedette GIRASOL. Cette vedette télécommandée, d'une vingtaine de mètres de long, remorquait des structures métalliques simulant des bâtiments de surface. Elle était capable de filer 20 nœuds par mer formée.

9.5 - Cibles sous-marines

Pour les essais de torpilles et de missiles anti-sous-marin, le CEM mettait en œuvre la cible CALAS. Celle-ci était une cible acoustique autonome récupérable. Elle était programmable pour pouvoir simuler la signature acoustique passive et active d'un sous-marin. La cible accomplissait sa navigation selon un programme pré-enregistré qui autorisait une trajectoire tridimensionnelle sans pilotage externe.

10 - LES MOYENS D'ESSAIS AERIENS DU CEM

Le CERES puis le CEM devaient mettre en oeuvre des cibles aériennes pour répondre aux besoins suivants :

- cible pour les phases de développement et d'évaluation des missiles ;
- cible pour les tirs d'entraînement de missiles importants ;
- cible pour les "écoles à feu", c'est-à-dire pour l'entraînement aux tirs de petits missiles ou aux tirs de canon par les navires de la Marine ou des Marines étrangères.

De 1952 jusqu'aux années 80, le CERES puis le CEM utilisèrent la cible télécommandée CT20, successeur du CT10, pour répondre aux deux premiers besoins. Cette cible présentait de nombreux avantages : robustesse, facilité de mise en oeuvre parce que bien connue, et bonne capacité d'emport pour renforteur d'écho, mesure de distance de passage, brouillage, etc.

À partir des années 80, ses performances en vitesse et en capacité d'évolution devinrent trop insuffisantes pour les missiles en développement. Aussi, sur commande de la DGA, l'Aérospatiale développa la cible C22 qui répondait à peu près bien aux exigences de performance mais était une cible chère parce que sophistiquée et surtout parce que fabriquée en très petite série, l'Aérospatiale n'étant jamais parvenue à l'exporter.

Ces cibles étaient récupérées en fin d'exercice (si elles n'avaient pas été détruites en vol !) mais, à la différence du CEL où elles étaient également mises en service, cette récupération était plus délicate car la cible descendait au bout de son parachute dans la mer !

Dès sa récupération par bateau, la cible était rincée abondamment à l'eau douce puis envoyée pour sa remise en état à Toulon. L'atelier du GTES reconditionnait rapidement l'engin qui, en général, souffrait peu de son immersion dans la mer mais plus souvent des opérations de récupération par bateau, surtout si les essais avaient lieu par mistral ou grand vent d'est !

Le CT20 était trop onéreux pour répondre au troisième besoin. Aussi, pendant plusieurs années, les écoles à feu ont utilisé des cibles remorquées par avion. Ces cibles convenaient bien pour des écoles à feu canon mais beaucoup moins bien pour les écoles à feu missiles, les contraintes de sécurité imposées par l'avion tireur étant de moins en moins compatibles avec les performances grandissantes des missiles. Un compromis fut trouvé en utilisant des cibles remorquées par cibles télécommandées type CT20 ou C22.

Cependant, ce compromis restait cher et, de plus, ses performances devinrent insuffisantes pour les missiles des années 80. Le CEM utilisa alors des cibles moins rustiques et plus chères mais fabriquées à l'étranger : Chukar, Fox, etc.

11 - LA VIE SUR LE CENTRE ET SA LOGISTIQUE

Quand la décision de créer un champ de tir sur l'île du Levant fut prise en 1950, aucune infrastructure terrestre ou portuaire n'existait pour accueillir les personnels et les matériels nécessaires aux lancements.

L'anse de Port Avis au nord de l'île fut choisie comme port d'accueil. Abrisée naturellement du vent d'est, elle fut protégée du mistral par un bateau amarré à terre qui servait de brise-lame. Ce bâtiment dut être remplacé plusieurs fois au fil des ans.

Il servit également de logement provisoire pour le personnel nécessaire pour les tout premiers essais. Mais très rapidement des bâtiments en dur furent construits pour loger le personnel de la marine qui restait en permanence sur l'île, tandis que le personnel civil était logé dans des baraques de type Fillod. Ces baraques servaient également à loger les personnels qui venaient effectuer des essais au CEM.

Les transports de personnel entre l'île et le continent se faisaient entre Port Pothuau dans la baie d'Hyères et Port Avis. Ils furent assurés pendant les premières années par le *Bambou*. C'était un remorqueur peu confortable, à la coque assez "ronde" qui accusait un roulis important par mer un peu forte ! Aussi la traversée, qui durait une heure et demie, était parfois assez "sportive". Le *Bambou* resta en service jusqu'en 1978.

En 1963, la mise en service de l'*Ariel*, spécialement conçu pour le transport du personnel, apporta une amélioration notable pour les rotations du personnel. La *Naiade*, sister-ship de l'*Ariel*, assura également pendant quelques années le transport du personnel. A leur retrait du service, à la fin des années 90, le transport des personnels fut assuré par une société privée de transport maritime. L'*Ariel* finit sa carrière en servant de cible à la frégate *Courbet* qui le coula d'un tir d'Exocet le 23 avril 2002.

Une piste d'aviation permit à la fin des années 60 d'effectuer des liaisons avec un Broussard de l'Aéronavale. La piste était assez courte et des turbulences importantes en approche étaient fréquentes ! Ce moyen céda rapidement la place à l'hélicoptère, beaucoup mieux adapté à la topographie de l'île.

L'île n'ayant aucune ressource, tout devait être apporté du continent ou créé sur place. Dans ce but, une centrale électrique équipée de groupes diesels électrogènes fournissait l'électricité. Quant à l'eau, un minibarrage construit quand l'île abritait une colonie pénitentiaire dans les années 1860 ne permettait qu'une autonomie très réduite après les pluies d'hiver et il était nécessaire de ravitailler le Centre en eau. Ce service était assuré par des bâtiments ravitailleurs type *Sahel*. De même, il était nécessaire de ravitailler l'île en fioul par des pétroliers ravitailleurs de la Marine comme la *Saône* ou la *Baïse*.

Les transports de gros matériel, des camions et autres véhicules, étaient effectués par des LCVF qui furent remplacés en 1962 par l'EDIC 9093 d'une capacité d'emport beaucoup plus importante. Un deuxième EDIC, le 9092, vint en complément du 9093 en 1964.

En 1987, les deux EDIC à bout de souffle furent remplacés par le Chaland de transport et de servitude (CTS), le *Gapeau*. Ce bâtiment de 520 t, long de 42 mètres, fut spécialement conçu pour les missions de transport du CEM. Il fut mis sur cale en 1985 aux chantiers navals Serra Frères à La Seyne-sur-Mer. Ses dimensions avaient été calculées pour pouvoir accueillir des blindés lourds tel l'AMX30 Roland. Accessoirement, les capacités de ses soutes permettaient le ravitaillement en eau et en fioul du CEM. Un salon construit à l'arrière du bloc passerelle pouvait accueillir une trentaine de passagers.

12 - LES CAMPAGNES DE LANCEMENT

12.1 - Les campagnes pour la Marine

Les premières campagnes de lancement concernèrent des missiles qui furent développés spécifiquement pour la Marine nationale à partir des années 50 :

- MALAFACE : Missile mer-mer subsonique développé par Latécoère à partir de 1951, le MALAFACE était en fait un avion sans pilote d'une portée espérée de 40 km propulsé par un moteur de fusée à liquide. Arrivé sur le but, il larguait une bombe de 700 kilos. Le missile était équipé d'une caméra de télévision pour corriger la trajectoire. Le programme rencontra beaucoup de difficultés techniques et fut abandonné en 1960.

- MALAFON : Missile mer/sous-marin, le MALAFON fut développé à partir de 1956 par Latécoère en liaison avec l'Etablissement des constructions navales de Saint-Tropez. C'était un planeur dont la partie avant était constituée d'une torpille classique. Propulsé au départ par deux accélérateurs à poudre, il planait pendant une douzaine de kilomètres, puis l'ouverture d'un parachute le freinait brutalement et provoquait la sortie de la torpille. Celle-ci tombait à l'eau et poursuivait son objectif sous-marin guidée par son propre sonar jusqu'à 300 mètres de profondeur. Il entra en service en 1966 et équipa 12 navires de la Marine.

- MILAS : successeur du MALAFON, il était dérivé de l'OTOMAT.

- MASALCA : Développé au début des années 1950 par le commandant Max Salmon, le MASALCA (Marine Salmon contre-avion) était un missile surface-air à longue portée propulsé par statoréacteur. Celui-ci était mis en route quand le missile, lancé initialement par un propulseur à poudre, avait atteint une vitesse suffisante. Ce programme fut abandonné en 1959, notamment par suite des problèmes liés à l'allumage du statoréacteur.

- MARUCA : C'était un engin subsonique téléguidé, propulsé par un moteur à ergols liquides (acide nitrique – aniline) dérivé du Schmetterling allemand. Il fut développé par la Fonderie de Ruelle à partir de 1948, puis abandonné en fin des années 50 au profit du MASURCA.

- MASURCA : Évolution supersonique du MARUCA, le MASURCA était développé par la DTCN (Direction technique des constructions navales) au sein de son établissement de Ruelle et la société des engins Matra. Après des essais à terre sur l'île du Levant, la mise au point de ce programme complexe se poursuivit à partir de 1960 sur le bâtiment d'expérimentation *Ile d'Oléron* spécialement aménagé. Cinquante tirs furent réalisés au cours de cette période qui s'acheva en 1968 par la validation opérationnelle réalisée sur le *Suffren* admis peu avant au service actif.

Très rapidement apparurent des essais d'adaptation aux besoins spécifiques de la Marine de missiles développés en France où à l'étranger :

- Famille SS10 : Dès la fin des années 50, le SS11 filoguidé fut essayé contre un but marin. Ce fut une déception car dès que les fils de guidage touchaient la mer, les

ordres de pilotage étaient rapidement perturbés. Seule la version AS12 tirée d'hélicoptère fut alors essayée par la Marine au début des années 60 avec succès et équipa ensuite les hélicoptères Lynx⁷ de la Marine.

- AS37 MARTEL étudié dans les années 60 en coopération avec la Grande-Bretagne.

- Famille Exocet, MM38, MM40, développée à partir des années 70.

- SM39 : Missile anti-navire de la famille Exocet tiré à partir d'un sous-marin. Le missile lui-même était logé dans une capsule étanche ayant les dimensions d'une torpille L5 ou F17. Au lancement, cette capsule était chassée du tube lance-torpilles du sous-marin comme une torpille classique. La capsule dotée d'un propulseur à poudre était alors complètement autonome et accomplissait sa trajectoire sous-marine sous la conduite du système de navigation inertiel du missile.

La capsule effectuait sa sortie de l'eau sous un angle de 45°, quel que soit l'état de la mer, et montait à moins de 50 mètres d'altitude. Chassé de la capsule après éjection de la coiffe, le missile était mis à feu et descendait rapidement à son altitude de croisière au ras de l'eau et se comportait alors comme l'Exocet classique.

- Crotale naval : Dérivé du système d'arme Shahine, il équipait les frégates type *La Fayette* (figure 5).

- Sidewinder : Dans les années 60, campagne d'évaluation de ce missile air-air de General Electric.

12.2 - Campagnes pour les organismes externes à la Marine

- Armée de Terre : Entraînement au tir de Roland.

- CNES : Cet organisme lançait les fusées-sondes Bélisama, Centaure et Epona pour l'étude de la haute atmosphère. Ces fusées culminaient à 90 km d'altitude. Leurs lancements s'étagèrent au long de la décennie 1960-70.

- ONERA : Campagne d'essais dans les années 60 pour les études liées au développement de la force de frappe française. Il s'agissait des programmes Bérénice pour l'étude des fusées à poudre, Staltex pour le développement des statoréacteurs et Antarès pour l'étude des têtes de rentrée dans l'atmosphère des missiles⁸.

- Dassault : En 1963, le gouvernement israélien passa commande à Dassault de l'étude et de la réalisation d'un missile balistique biétage d'une portée de 500 km, le MD620. Le premier lancement eut lieu au CEM le 1^{er} février 1965 et fut suivi avec succès d'une quinzaine de tirs jusqu'à fin 1968. À cette date le programme fut définitivement arrêté par suite de l'embargo décrété par le gouvernement français sur les armes à destination d'Israël après l'attaque israélienne de l'aéroport de Beyrouth,

⁷ Nom de l'hélicoptère franco-britannique WG12.

⁸ Voir le chapitre 3 du tome II du document du COMAERO sur les *Etudes et recherches* (2008).

le 29 décembre 1968. Le missile continua à être développé par Israël qui en aurait fabriqué une centaine d'exemplaires.

- Marines étrangères : Campagnes d'entraînement pour les marines allemande, hollandaise, ainsi que pour la VI^e Flotte américaine.

12.3 - Les autres campagnes d'essais

Ces campagnes utilisent les moyens d'essais spécifiques du CEM : TREMAIL, COSMAR, etc. pour notamment :

- les études de développement des torpilles ;
- la régulation des senseurs des bâtiments ;
- la régulation des sonars.

BIBLIOGRAPHIE

Capitaine de vaisseau Bénard, « Le centre d'essais de la Méditerranée », *L'Armement* n° 55, avril 1979, p. 183-192.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'IGA Dominique Litaize, l'IGA Joseph Murati et l'IA Patrick Zoppi pour les précisions apportées sur le développement du CEM.



Fig. 1
L'île du Levant



Fig. 2
Poste du Coudon



Fig. 3
Poste central de conduite de tir



Fig. 4
Tir de MM38 à partir de l'*Ile d'Oléron*



Fig. 5
Tir de Crotaie

CHAPITRE 9

Le CAEPE (Centre d'achèvement et d'essais des propulseurs et engins)¹

Les activités du CAEPE concernent essentiellement les missiles balistiques de la force nucléaire stratégique de dissuasion² et depuis les années 1990 les missiles tactiques également.

Centre d'essais, au sein du complexe aquitain industriel et étatique chargé des études et de la réalisation des propulseurs de missiles stratégiques et tactiques, il procède aux essais au sol des systèmes propulsifs. Il réalise également les essais dans le domaine de la sécurisation des propulseurs et missiles tactiques complets.

Centre d'achèvement, il met à la disposition des industriels SEP³ et Aérospatiale des installations appartenant à l'État pour l'équipement des propulseurs et étages propulsifs des missiles stratégiques, avant livraison aux sites opérationnels de l'île Longue et d'Apt (jusqu'à sa fin de veille opérationnelle le 16 septembre 1996) ou pour déséquiper des étages propulsifs en retour de dotation opérationnelle après avoir atteint leur limite de vie.

1- LES ORIGINES

La Poudrerie nationale de Saint-Médard-en-Jalles (PNSM) ayant été choisie pour l'élaboration et la mise en œuvre des propergols solides destinés aux propulseurs des missiles, il est nécessaire d'implanter un centre d'essais au sol de ces propulseurs et un centre pour leur achèvement et leur transformation en étages propulsifs. Pour des raisons de sécurité, mais également dans un souci de discrétion, il est souhaitable que ces centres soient installés au plus près de la PNSM, afin de réduire autant que possible les distances de déplacement.

1.1 - Moulin-Bonneau : centre d'essais

« Après de nombreuses et longues discussions entre la DTIA⁴ et plusieurs sociétés aéronautiques, la décision de prendre le Centre d'essais des propulseurs de Saclay (CEPr) comme maître d'œuvre est alors apparue comme la meilleure solution à tous ces conflits d'intérêts », comme le précise son directeur à l'époque, l'ingénieur général de l'air Gérard Decaix⁵.

¹ Par Roger Peuron.

Ce texte est très largement inspiré d'extraits du livre *Préludes aux vols* édité à l'occasion des 40 ans du CAEPE, ainsi que du document COMAERO sur les *Missiles balistiques* (2004), p.44-46.

² Voir, en fin de document, l'annexe de rappels sur « la dissuasion nucléaire et les missiles balistiques ».

³ Société européenne de propulsion.

⁴ Direction technique et industrielle de l'aéronautique.

⁵ Entretien réalisé en juin 1986. Le grade cité est celui de l'interlocuteur au moment de l'entretien.

Le choix du terrain doit beaucoup à l'ingénieur en chef de l'air Pierre Soufflet⁶ : « Étant sous-directeur du Centre de Saclay et m'intéressant plus particulièrement à cette question, j'ai prospecté dans la région de Saint-Médard-en-Jalles. Sachant qu'il existait un petit établissement à Moulin-Bonneau - dépôt de munitions plus ou moins désaffecté - dépendant de l'armée de Terre, je m'y suis rendu en 1959, pour en évaluer les possibilités. Il m'a semblé alors que la seule solution réaliste était d'installer des bancs d'essais sur ces terrains militaires, rapidement et facilement affectables ».

Le terrain étant choisi et le maître d'œuvre désigné, les choses vont alors aller très vite. Les munitions sont évacuées vers un autre dépôt de l'armée de Terre. Le 23 février 1961, le ministre des Armées affecte le terrain de Moulin-Bonneau à la DTIA, dont dépend le CEPr.

Sans attendre que les affaires domaniales soient définitivement réglées, les équipes du CEPr se mettent au travail. L'ingénieur général de l'air Gérard Decaix se souvient de cette époque⁷ : « Les bancs furent définis, d'une part à partir des *desiderata* du Service des poudres et des bureaux d'études tels que ceux de Nord-Aviation et de la SEPR⁸, d'autre part à partir d'une installation à l'échelle française visitée par l'ingénieur en chef Pierre Soufflet aux États-Unis ».

C'est ainsi que, dix-huit mois environ après les décisions initiales concernant la réalisation de missiles balistiques, les premiers dessins des bancs d'essais et le premier plan de leur implantation sont diffusés.

Les travaux à Moulin-Bonneau commencent en avril 1961. À la fin de l'année l'effectif en place est de dix personnes.

Travaillant d'arrache-pied, cette première équipe, fortement soutenue par les services de Saclay et grâce aux efforts consentis par la Direction des travaux du génie et les entreprises contractantes, fait en sorte que le premier banc est opérationnel le 4 avril 1962, moins de trois ans après la décision de doter la France d'une force de dissuasion.

1.2 - Bois de Candale : centre d'achèvement

Dès le début 1962, les premières équipes de la SEREB⁹, maître d'œuvre industriel des systèmes balistiques, et celles de certains de ses coopérants (Nord-Aviation, Norma...) s'installent à Moulin-Bonneau dans quelques baraquements, pour y effectuer des travaux de finition et de préparation avant tir des propulseurs. Ainsi cohabitent à cette époque au CEP¹⁰, les activités achèvement et celles liées aux essais. Mais très rapidement, à la lumière des résultats des premiers essais effectués au CEP, l'intérêt d'un centre regroupant les installations d'achèvement, d'intégration et de contrôle de sous-ensembles propulsifs et de missiles complets est mis en évidence. Il est donc décidé de créer le Centre d'achèvement des propulseurs et engins (CAPE).

Le choix se porte alors sur le Bois de Candale qui, par sa situation géographique

⁶ Entretien réalisé en mars 1986.

⁷ Entretien réalisé en juin 1986.

⁸ Ces deux sociétés Nord-Aviation et SEPr (Société d'étude de la propulsion par réaction) avaient à l'époque une expérience pour les essais de moteurs-fusées.

⁹ Société pour l'étude et la réalisation d'engins balistiques.

¹⁰ Centre d'essais des propulseurs de Moulin-Bonneau, annexe du CEPr.

entre la PNSM et le CEP, et sa superficie, convient bien pour l'implantation de ce nouveau centre.

Un décret du Premier ministre, en date du 18 août 1962, déclare alors d'utilité publique et urgente l'acquisition par l'État de bois situés sur le territoire de Saint-Médard-en-Jalles. Cette procédure aboutit à l'achat en mars 1964 par la Direction des travaux du génie, pour le compte de la Direction des poudres, de 171 hectares.

Comme pour le CEP, ici aussi tout est allé très vite. C'est ainsi que les premiers travaux sur le véhicule d'essais VE231-Saphir commencent au CAPE à la fin de 1963, soit un peu plus d'un an après la déclaration d'utilité publique concernant l'achat du Bois de Candale.

C'est par un marché de l'État d'août 1964, notifié par le Département engins de la Délégation ministérielle pour l'armement (DMA) à la SEREB, que cette dernière se voit attribuer la gérance du CAPE. Ce marché constitue véritablement l'acte de naissance de ce nouveau centre.

1.3 - Création du Centre d'achèvement et d'essais des propulseurs et engins

Dès 1965, le rattachement du CEP et celui du CAPE à la Direction technique des engins (DTEn) nouvellement créée est prévu. L'ingénieur général de l'armement Pierre Soufflet, premier directeur des engins, rappelle¹¹ : « La SEREB, qui assurait à l'époque la gestion du CAPE, était une société d'ingénierie mais ne devait pas avoir une vocation industrielle, comme elle l'aurait souhaité. Nous lui avons indiqué, dès 1965, que le CAPE serait à terme un établissement d'État où les industriels viendraient travailler avec la possibilité d'être indépendants les uns des autres ».

Le 1^{er} janvier 1967, le CAPE et le CEP fusionnent pour donner naissance au Centre d'achèvement et d'essais des propulseurs et engins (CAEPE)¹², dont la direction est confiée à l'ingénieur en chef des fabrications d'armement Jean-Louis Rosoor, qui se souvient¹³ : « Le CAEPE a été créé à partir de deux entités qui étaient parmi les plus beaux fleurons de chacune des organisations cédantes. Le CEPr, se voyait arracher son centre d'essais de Moulin-Bonneau. La SEREB perdait la gérance du CAPE. L'un et l'autre n'ont pas été enthousiastes. Malgré tout, la fusion a bien été effective le 1^{er} janvier 1967 et il a bien fallu appliquer les textes et trouver des solutions raisonnables ».

À la création du CAEPE, les superficies des deux emprises du Centre sont de 76 hectares pour Moulin-Bonneau et de 171 hectares pour le Bois de Candale. Ces surfaces évoluent au cours des années afin, soit d'augmenter les dimensions du polygone d'isolement pour Moulin-Bonneau ou pour y implanter le Moyen d'essais en simulation d'altitude (MESA), soit de prévoir la réalisation de nouveaux moyens industriels pour le Bois de Candale.

À partir de 1974, la SNPE mène, à la demande de la Direction des engins, des études destinées à mettre au point une nouvelle famille de propergols baptisés « nitralanes », qui requiert pour son élaboration et les essais de développement, des conditions de sécurité qui ne peuvent être remplies à Saint-Médard-en-Jalles, aussi bien pour l'usine de la SNPE que pour la zone d'essais du Centre. Aussi, lorsque l'opportunité d'acquérir un vaste domaine de 2 680 hectares à Saint-Jean-d'Illac se

¹¹ Mars 1986.

¹² Instruction 11329/DMA/D du 14 décembre 1966 relative à la création du CAEPE.

¹³ Témoignage recueilli en janvier 1986.

présente, la Direction des engins, et localement le directeur du CAEPE, décident rapidement de réaliser cette opération domaniale d'envergure, qui sera achevée en 1981.

Évolution des superficies (en hectares) :

| Année | Moulin-Bonneau | Bois de Candale | Saint-Jean-d'Ilac |
|-------|----------------|-----------------|-------------------|
| 1967 | 76 | 171 | |
| 1977 | 107 | 171 | |
| 1981 | 120 | 171 | 2680 |
| 1984 | 120 | 220 | 2680 |

2 - ACTIVITE ESSAIS, MISSILES BALISTIQUES

C'est le 4 avril 1962 qu'a lieu le premier essai au banc sur le site de Moulin-Bonneau (figure 1). Le spécimen est un propulseur de 800 mm de diamètre. Depuis cette date 1 500 essais ont été réalisés par le Centre, grâce à des moyens humains et matériels qui ont évolués dans le temps en fonction des différents programmes.

Tous les essais effectués par le Centre sont liés, soit à des travaux ayant pour finalité la mise au point de technologies et de techniques pouvant être par la suite appliquées à des propulseurs, soit au développement et à la qualification de propulseurs.

2.1 - Études balistiques de base et essais

Pendant les premières années de son existence, le Centre exécute de nombreux essais technologiques ayant pour objectif la mise au point de propergols, de différents matériaux et de tuyères.

À noter en particulier, entre 1962 et 1964 : les essais en bombe de diamètre 800 mm et 1 500 mm, dans le cadre de la mise au point des chargements en propergol isolane ; les essais pour la mise au point de tuyères coudées rotatives ; la poursuite de la mise au point de ces mêmes tuyères ; et le début des essais de pilotage par injection d'un fluide dans le jet d'un propulseur.

Durant cette même époque, des essais permettent la mise au point et la qualification de propulseurs destinés au véhicule d'essais VE111-Topaze, du programme EBB¹⁴, ainsi qu'au lanceur Diamant. Le premier tir en structure du propulseur du 3^e étage du lanceur Diamant a lieu le 11 avril 1963.

2.2 - Première génération de missiles

À partir de 1965, apparaissent les essais liés au développement des propulseurs à structure métallique de 10 tonnes et 16 tonnes de propergol, qui sont destinés aux missiles balistiques SSBS¹⁵ et MSBS¹⁶.

Entre 1965 et 1968, ont lieu les premiers essais en structure réelle : pour le propulseur 904 (destiné au 1^{er} étage du missile MSBS), pour le 903 (propulseur du 2^e

¹⁴ Études balistiques de base.

¹⁵ Sol-sol balistiques stratégiques.

¹⁶ Mer-sol balistiques stratégiques.

étage du missile SSBS), pour le 902 (propulseur du 1^{er} étage du missile SSBS).

Le 22 octobre 1965, un premier essai est réalisé pour la mise au point du propulseur Rita 1 destiné au missile MSBS MI et qui par la suite sera également utilisé pour le lanceur Diamant-BP4.

En 1965 également, ont lieu les essais préliminaires pour la mise au point des dispositifs d'arrêt de poussée (DAP) et les premiers essais concernant la séparation entre le 1^{er} et le 2^e étage (effet « bouchon de champagne-BDC »). Le dernier essai BDC a lieu en 1968 et les essais DAP se terminent en 1969.

La fin des années 1960 voit se poursuivre les essais des propulseurs déjà cités qui entrent en service opérationnel au début des années 1970.

Appelé à remplacer le propulseur Rita 1, le Rita 2 destiné au missile M2, et par la suite aux M20 et S3, est essayé pour la première fois au CAEPE le 27 mai 1970.

En 1968 et 1969, des difficultés de mise au point des propulseurs 904 et Rita 2 apparaissent. Par ailleurs, la durée de vie spécifiée de quatre ans des propergols n'est pas atteinte. Afin de mieux cerner ce qui se passe, de nombreux essais de mise en pression et d'extinction en puits sont réalisés, à partir de 1968.

Informé des difficultés rencontrées, le délégué ministériel pour l'armement, Jean Blancard, se rend sur place le 13 février 1969. Il visite le même jour la SEPr, la PNSM et la SEREB, afin de se forger une opinion. Ce qui se traduit par plusieurs actions : assainissement des propulseurs, meilleure définition des relations entre les industriels concernés, ce qui conduit à la création du Groupement pour les gros propulseurs à poudre (G2P).

En 1972 et 1973, la mise au point du Rita 2 se poursuit et des essais de propulseurs « assainis » 903 et 904 sont réalisés. Des essais de vieillissement sur ces mêmes propulseurs montrent une nette amélioration de la durée de vie des propergols.

2.3 - Missile M4

Décidé au début des années 1970, le programme M4 amène le Centre à se lancer dans une nouvelle série d'essais de développement, parmi lesquels il est bon de citer, entre 1972 et 1976 : un essai d'une tuyère à butée flexible, plusieurs essais de matériaux, deux essais de tuyère pour le propulseur 401 du 1^{er} étage, le premier essai d'une tuyère pour le propulseur 402 du 2^e étage et deux nouveaux essais pour la tuyère du 401, de nombreux essais relatif aux structures en kevlar.

La qualification des différents propulseurs dans leur définition nominale, destinés aux trois étages du missile, est marquée par quelques points forts : premier tir au banc d'un 401 le 30 novembre 1977, premier tir d'un 402 le 22 décembre 1977, premier tir d'un 403 le 7 juillet 1978.

Des essais avec séparation entre le 1^{er} et le 2^e étage et allumage du 402 et pour la première fois avec simulation de chasse sont aussi effectués au CAEPE.

2.4 - Développements exploratoires

Considérant d'une part le bon déroulement du programme M4 et, d'autre part, les importantes possibilités d'améliorations encore réalisables pour atteindre le niveau américain des dernières versions du missile Trident, la DEn (Direction des engins) lance, à partir de 1980, plusieurs programmes de Développements exploratoires (DE) tels que : la nitalane et les divergents déployables.

Au cours de cette période charnière entre le M4 et le M51, le CAEPE essaye la plupart des spécimens émanant de ces programmes, aussi bien dans ses propres installations, que dans des bancs installés sur des emprises du CEL¹⁷ (à Captieux, Landes) et au camp militaire de Souge (Martignas, Gironde).

C'est ainsi qu'un premier propulseur de 220 kg de nitralane est tiré le 14 septembre 1983 à Captieux. En 1986, a lieu le premier essai d'un propulseur nitralane en structure carbone (figure 8). D'autres essais sont réalisés en 1987, puis en 1993 et 1994, à Souge, puis à Saint-Jean-d'Illac.

Outre les essais nitralane, le Centre exécute également des essais au banc MESA¹⁸, dans le cadre du développement exploratoire de tuyères. À noter en particulier, un essai de tuyère à rotule chaude, en 1988, et un essai d'un propulseur de 8 tonnes de propergol avec déploiement du divergent sur le jet, en 1995.

2.5 - Missile Hadès

Le programme de missile pré-stratégique Hadès, destiné à remplacer le Pluton, est lancé en 1984. Le programme est abandonné en 1996 et les missiles fabriqués ne sont pas déployés. Ce qui n'empêche pas le Centre de réaliser un certain nombre d'essais concernant le développement du propulseur Achéron de l'unique étage de ce missile.

Le premier essai du chargement en bombe a lieu le 18 décembre 1985 et celui du premier propulseur en structure de vol a lieu le 22 juillet 1986. Le dernier tir de qualification, avec un propulseur conditionné à -25°C, a lieu le 22 mars 1989.

2.6 - Missile S45

Les premiers travaux relatifs au missile sol-sol S45, datent de 1986. Le programme est arrêté en 1991. Malgré la vie extrêmement courte de ce programme, le Centre effectue quelques essais dans le cadre de la mise au point des propulseurs. À noter en particulier, en 1989 et 1990 : un premier essai d'un propulseur 702 pour le 2^e étage et un premier essai d'un propulseur 701 pour le 1^{er} étage.

2.7 - Missile M51

Le programme de missile M51 est lancé officiellement en 1996. Il est destiné à remplacer, à l'horizon 2010, le M45 version la plus performante du M4.

Le 19 décembre 1996, le CAEPE procède au premier essai d'un propulseur 511.

2.8 - Bancs d'essais balistiques

L'exécution de tous ces essais n'a été possible que grâce à l'existence de bancs reliés à des moyens d'acquisition et de traitement de mesures. Ces bancs sont construits au fur et à mesure de l'apparition des nouveaux missiles et en fonction des caractéristiques des propulseurs et des objectifs des essais.

¹⁷ Centre d'essais des Landes. Voir le chapitre 7 de ce document.

¹⁸ Moyen d'essais en simulation d'altitude.

Trois types de bancs sont utilisés :

- les bancs horizontaux, où les propulseurs sont placés en position horizontale. Ils permettent de mesurer avec précision l'évolution de la poussée et de la masse des propulseurs, les deux étant totalement découplées. Ces bancs entrent en service entre le 4 avril 1962 et 1966.

- les bancs verticaux, qui reçoivent des propulseurs placés verticalement (tuyères vers le haut), sont équipés de balances à six composantes et autorisent l'exécution de tirs avec activation du système d'orientation de la poussée (figure 5). L'intérêt de faire fonctionner au sol des propulseurs en ligne de vol a conduit à équiper deux bancs verticaux de dispositifs mécaniques permettant l'exécution en toute sécurité de tirs dans cette configuration (système d'accrochage du propulseur et butoirs capables de perforer la structure en cas de déplacement). Ces bancs sont opérationnels en 1962 pour le premier et janvier 1989 pour le dernier (figures 2 et 3).

- les puits, conçus initialement pour réaliser des essais sur des propulseurs présentant des risques importants ou une probabilité de destruction, se révélèrent très utiles pour l'exécution de tirs en extinction (arrêt de la combustion du propulseur par dépressurisation brutale et noyage à l'eau, qui fige l'état du chargement à un instant donné et facilite la compréhension des incidents) et de tirs durcis (essais de propulseurs dans des conditions limites, permettant de tester le coefficient de sécurité : température extrême, tuyère à col réduit conduisant à une pression plus élevée, etc.).

Le premier puits est opérationnel en 1967, le troisième en 1973. La technique d'extinction est abandonnée et remplacée à partir de 1990 par des mesures par ultrasons pendant le fonctionnement du propulseur.

La simulation d'altitude. Pour tester correctement la tenue des divergents des tuyères et les protections des fonds arrière de propulseurs d'étages supérieurs, il est nécessaire de réaliser des essais en altitude simulée. Une première tentative est faite à la fin de 1965 : un tube éjecteur de 2,1 m de diamètre et de 16 m de long, refroidi par ruissellement d'eau, est disposé verticalement autour du fond arrière d'un propulseur 901 de 10 t. La liaison étanche avec l'engin est réalisée par une virole de raccordement et un joint gonflable. Par effet de trompe, le jet du propulseur doit assurer le vide recherché. Le tube, insuffisamment refroidi, fond et l'essai se termine en un magnifique feu d'artifice. Cette technique du tube éjecteur est utilisée par la suite avec succès pour tester en position horizontale la tuyère et le fond arrière du propulseur Rita 1.

Un dispositif assurant, pour l'ensemble du propulseur, des conditions d'environnement plus proches de la réalité est ultérieurement mis au point : le propulseur est placé sur une balance horizontale, dans un caisson étanche mis sous vide ; un diffuseur supersonique assure, après la mise à feu, le maintien du vide et l'éjection des gaz de combustion. Ce dispositif est utilisé dès la fin de 1980 pour la mise au point du propulseur 403, troisième étage du missile M4.

Pour supprimer l'onde de choc qui se produit au désamorçage, en fin de fonctionnement du propulseur, entraînant des dégradations importantes, surtout sur les divergents de grandes dimensions (souvent réalisés dans des matériaux relativement fragiles), le CAEPE met au point un Moyen d'essai en simulation d'altitude (MESA) (figure 7). Dans un caisson de 6 m de diamètre et 14 m de long, le propulseur est placé sur un banc horizontal. Divers éjecteurs sont utilisés pour maintenir dans le caisson la pression désirée à toutes les phases de l'essai : l'éjecteur à gaz de combustion, alimenté par le fonctionnement du propulseur, et des

éjecteurs alimentés à la vapeur fonctionnant avant, pendant et après le tir. Un premier essai réalisé le 9 juillet 1985 permet de tester une tuyère à divergent déployable mise au point par la SEP (Société européenne de propulsion) (figure 9).

3 - ACTIVITE ESSAIS, MISSILES TACTIQUES

Le Centre, dont la création est intimement liée au choix de la dissuasion nucléaire, voit les générations de missiles, aussi bien SSBS que MSBS, se succéder à un rythme soutenu pendant plus de vingt ans.

À partir de 1991, la France décide d'abandonner tous ses systèmes d'armes nucléaires sol-sol stratégiques fixes (SSBS et site du plateau d'Albion) ou mobiles et préstratégiques (système PLUTON puis HADES). Par ailleurs, le développement du M4 est achevé et les décisions concernant le programme M5 sont sans cesse retardées. Si le lancement du programme M5 en 1992 (devenu le M51), éclaircit l'avenir du Centre, il ne conforte pas durablement le plan de charge de l'Établissement ; d'autant que les réductions budgétaires font craindre des glissements significatifs de calendrier.

En ce début des années 1990, le Centre fait donc évoluer sensiblement son activité essais, à la demande des directions de programmes, en l'étendant au domaine des missiles tactiques et aux sous-ensembles pyrotechniques associés.

Ainsi trois domaines d'activités vont se développer : les essais de vieillissement, les essais de sécurité et ceux de caractérisation de jets en écoulements et altitudes simulés.

3.1 - Essais de vieillissement

Ils permettent d'appréhender l'évolution des performances de spécimens pyrotechniques tout au long de leur vie opérationnelle.

Le Centre prend en charge le programme de vieillissement simulé de plusieurs missiles tactiques, par l'enchaînement de cycles vibratoires et thermiques. Il assure tout ou partie du programme, y compris l'exécution des tirs de caractérisation associés. Pour cela, il s'équipe de moyens de conditionnement spécifiques, avec le bâtiment de Conditionnement climatique pour petits propulseurs opérationnel en juillet 1992 et l'ensemble Moyen pour missiles tactiques mis en service quelques mois plus tard. Des moyens de contrôle endoscopique, de radiographie et radioscopie aux rayons X, complètent ces installations (figure 12).

3.2 - Essais de sécurité

Ces essais visent à caractériser le comportement de spécimens pyrotechniques soumis à des agressions standardisées, de nature accidentelle ou malveillante pouvant intervenir durant leur vie opérationnelle.

Les grands espaces dont dispose le Centre à Saint-Jean-d'Illac constituent un site privilégié pour accueillir l'ensemble des essais liés aux divers programmes de sécurisation et « muratisation » (munition à risques atténués) qui nécessitent des périmètres de sécurité importants (figure 10).

Après une première aire de sécurité réalisée en 1990, une deuxième voit le jour en 1994 pour répondre aux besoins croissants de ce domaine d'activité.

3.3 - Essais de caractérisation de jets

Dans le cadre de ces essais, réalisés à l'aide du Moyen de caractérisation de jet opérationnel en 1994 et qui utilise une partie des servitudes du banc MESA, le Centre développe des compétences particulières en matière de signature de jet dans le spectre visible, l'infrarouge et l'ultraviolet.

Ces moyens sont mis à profit pour la définition de la signature optronique de traceurs de missile et de jets de divers missiles, dont le Roland (figure 11).

4 - LES MESURES

Outre les bancs et bâtiments, la réalisation des essais dont la complexité s'est accrue au cours des années, nécessite la mise en place de moyens « mesure » de plus en plus fiables et performants, capables de la conduite de l'essai, de l'acquisition et du dépouillement des paramètres suivis.

En 1962, l'essai est conduit avec un programmeur électromécanique, trois enregistreurs analogiques et un enregistreur oscillographique à papier, pour les paramètres les plus importants : 15 mesures sont suivies. Par la suite, l'introduction de moyens informatiques permet d'accroître les performances : le système construit en 1971 autour d'un ordinateur CII 10020 permet de traiter une centaine de paramètres par essai, nombre porté à 300, grâce au multiplexage des mesures. Entré en service à la fin de 1996 un nouveau système offre une possibilité de 700 mesures (figure 6).

Dans le cadre de l'exécution d'essais liés au développement de nouveaux propergols, le Centre est amené à partir du dernier trimestre 1983 à utiliser deux bancs situés en dehors de ses installations fixes : l'un à Captieux, l'autre à Souge. Pour faire face à ces nouveaux besoins, l'établissement étudie et réalise un moyen mobile de mesures et de télécommandes, capable d'acquiescenter trente mesures et d'envoyer trente ordres. Il est utilisé pour la première fois le 5 juillet 1983 pour un essai à Captieux.

5 - ARIANE 5 ET CAEPE

Fort de son expérience acquise pour les essais au sol des propulseurs balistiques le Centre est sollicité par le CNES¹⁹. En 1985 et 1986, le Centre fournit deux avant-projets de banc d'essais du moteur à propergol solide (MPS), constitutif de l'étage accélérateur à poudre (EAP) ; le premier, en configuration horizontale, pouvant être construit à Saint-Jean-d'Ilac.

L'accident de la navette Challenger le 28 janvier 1986, amène le CNES à opter pour une configuration « ligne de vol ». Le CAEPE propose alors de construire le banc correspondant au CEL, où la présence de dunes permet la réalisation d'un carneau profond pour l'évacuation des gaz de combustion. Malgré des conditions acceptables en terme de possibilité d'essais, le CNES choisit de construire le banc à Kourou. Le CAEPE réalise alors des études et des essais pour la conception du carneau de ce banc d'essais.

¹⁹ Centre national d'études spatiales.

Il effectue également une étude d'impact sonore lors des essais de MPS, aussi bien sur le Centre spatial Guyanais, que sur la ville de Kourou.

Le 14 décembre 1989, le CAEPE effectue un essai au banc d'un propulseur SSM (*Small Scale Motor*) constitué de plusieurs tronçons (figure 4), préfigurant un propulseur MPS.

Dès le choix de la configuration tuyère vers le bas (TVB) pour les essais des MPS, le CNES demande de concevoir un Dispositif de mesure de poussée (DMP). Le bureau d'études mécaniques du Centre conçoit ce dispositif innovant, dont la réalisation est confiée à l'Atelier de Tarbes (ATS) du GIAT (Groupement industriel des armements terrestres). Le CAEPE participe à son installation sur le Banc d'essais des accélérateurs à poudre (BEAP) et à sa recette sur site à Kourou. Cet outillage est utilisé pour la première fois le 16 février 1993 pour un essai.

Toujours à la demande du CNES, le CAEPE lui fournit une assistance technique dans de nombreux domaines : déroulement d'un essai, études et consignes de sécurité pyrotechniques, canne d'injection d'azote en fin de phase de combustion, prévision et suivi des effluents de combustion...

6 - ACTIVITE ACHEVEMENT

Centre d'achèvement, le CAEPE dispose de bâtiments mis à la disposition des industriels pour l'achèvement et le contrôle des propulseurs et étages propulsifs : mise en place des protections thermiques des structures métalliques avant envoi à la SNPE (Société nationale des poudres et explosifs) pour chargement, puis finition et contrôle des propulseurs par la SEP (figure 15), équipement et contrôles électriques et fonctionnels, contrôle de masse et recherche du centre de gravité des étages propulsifs par l'Aérospatiale. Les premiers bâtiments disponibles en 1963 permettent l'achèvement et l'intégration des missiles expérimentaux du programme d'Études balistiques de base (EBB) et l'intégration du lanceur Diamant (figure 13), tiré à Hammaguir le 26 novembre 1965.

Ultérieurement, le Centre abrite plusieurs opérations effectuées par les industriels pour le CNES : préparation de moteurs Rita 1 et de moteurs d'apogée pour le lanceur Diamant BP4 et intégration de lanceurs Diamant B et BP4 dans un bâtiment construit en 1968 à cet effet. Cinq Diamant B et trois Diamant BP4 (figure 16) sont ainsi préparés au CAEPE de 1969 à 1975 pour être tirés à Kourou.

L'assemblage et le contrôle des missiles expérimentaux des programmes de développement des SSBS et MSBS sont également réalisés au CAEPE. Les missiles MSBS de première génération, entièrement constitués, sont transportés par la route jusqu'à Pauillac pour être embarqués sur le sous-marin expérimental le *Gymnote* ou au Centre d'essais des Landes. Les missiles expérimentaux M4, après assemblage et contrôle, sont expédiés au CEL en sous-ensembles séparés (figure 14).

Un bâtiment est affecté à la préparation des propulseurs avant essai au banc, un autre au déséquipement des étages propulsifs en retour de dotation opérationnelle après avoir atteint leur limite de vie, pour recyclage ou tir au banc.

Enfin, le CAEPE dispose de 21 puits, dans lesquels des propulseurs et étages propulsifs de missiles balistiques peuvent être stockés avant utilisation. Certains de

ces puits sont utilisés pour abriter des propulseurs ou étages conservés pour étude du vieillissement.

7 - EFFECTIFS

Le soutien à l'achèvement et la mise en œuvre de moyens d'essais dont le nombre et la qualité évoluent au cours des années, nécessite des équipes de plus en plus nombreuses et spécialisées. C'est avec une quinzaine de personnes que les travaux commencent à Moulin-Bonneau. Elles sont 170 à la création du CAEPE, le 1^{er} janvier 1967. L'apogée des effectifs se situe en 1991 une première fois et en 1995 ensuite. À partir de 1996, ils décroissent régulièrement.

Évolution de l'effectif du Centre au cours des années (au 31 décembre)

| Année | Effectif | Ann. | Eff. |
|-------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1961 | 10 | 1967 | 170 | 1973 | 328 | 1979 | 414 | 1985 | 455 | 1991 | 488 |
| 1962 | 20 | 1968 | 216 | 1974 | 350 | 1980 | 422 | 1986 | 459 | 1992 | 471 |
| 1963 | 50 | 1969 | 269 | 1975 | 362 | 1981 | 424 | 1987 | 451 | 1993 | 462 |
| 1964 | 70 | 1970 | 276 | 1976 | 390 | 1982 | 443 | 1988 | 452 | 1994 | 489 |
| 1965 | 91 | 1971 | 319 | 1977 | 400 | 1983 | 462 | 1989 | 440 | 1995 | 496 |
| 1966 | 103 | 1972 | 323 | 1978 | 404 | 1984 | 458 | 1990 | 435 | 1996 | 488 |

Le CAEPE à été dirigé successivement par :

| Nom, Prénom | Du | Au |
|----------------------------|------------------------------|-------------------|
| Rosoor Jean-Louis | 1 ^{er} janvier 1967 | 31 décembre 1972 |
| Pélissolo Jean-Claude | 1 ^{er} janvier 1973 | 14 septembre 1974 |
| Delaye Michel | 15 septembre 1974 | 14 septembre 1979 |
| Cardot Henri | 15 septembre 1979 | 14 septembre 1984 |
| Aliotti Philippe (intérim) | 15 septembre 1984 | 4 novembre 1984 |
| Dard Jean-Baptiste | 5 novembre 1984 | 31 décembre 1990 |
| Moret Jean | 1 ^{er} janvier 1991 | 30 octobre 1997 |

BIBLIOGRAPHIE

Préludes aux vols : CAEPE 1967-2007, DGA, 2007, ISBN 978-2-11-097319-1.

Emile Arnaud (coordinateur), *Les missiles balistiques 1955-1995*, Document COMAERO, Les Cahiers du CHEAr, 2004, p. 44-46.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie l'ingénieur général des études et techniques d'armement Daniel Maguerez, alors directeur du CAEPE, qui a approuvé la rédaction du livre *Préludes aux vols (CAEPE 1967-2007)*. Il remercie également toutes les personnes qui, à un titre ou à un autre, ont participé à son élaboration.

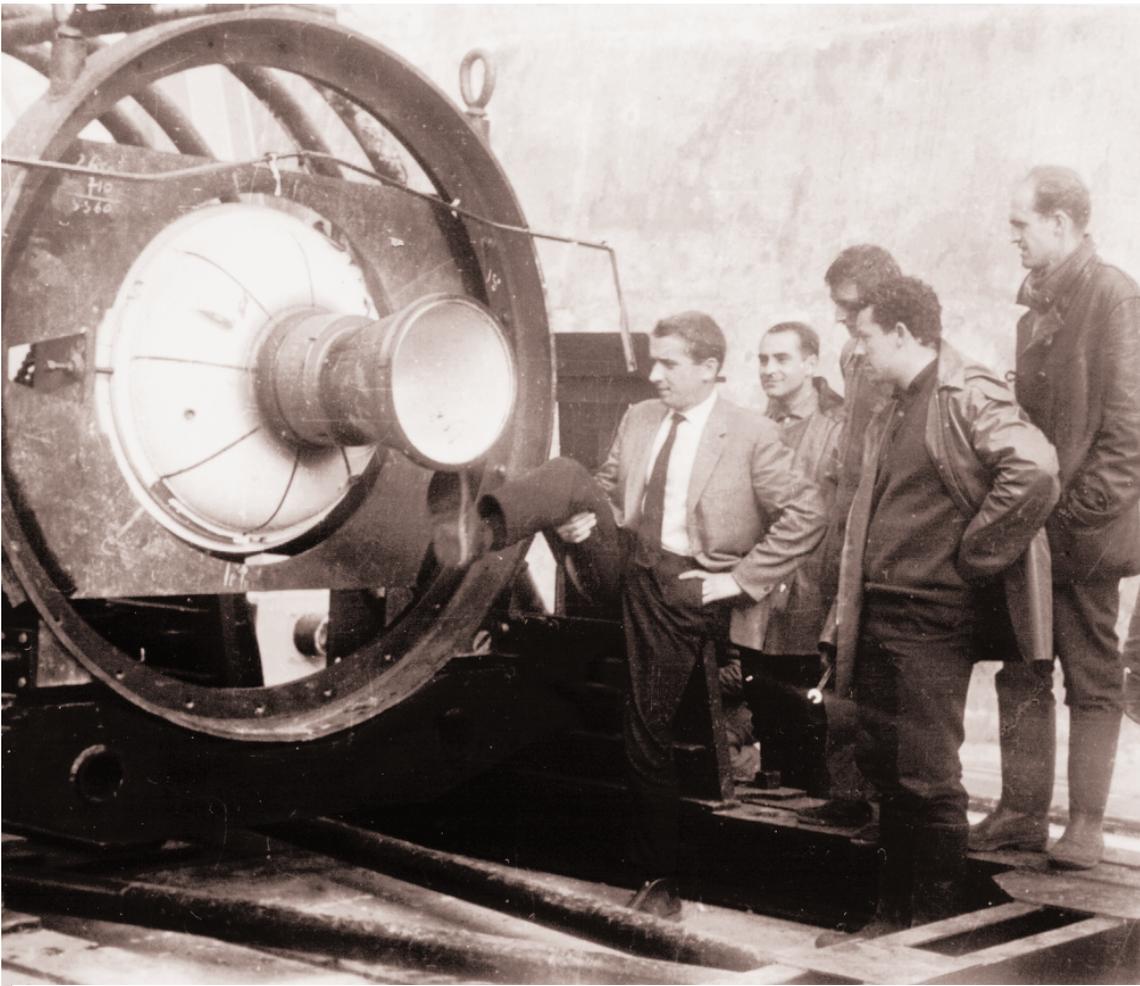


Fig. 1
4 avril 1962, le Centre entre dans l'histoire
Premier essai à Moulin-Bonneau. Tir à l'horizontale d'un propulseur de
800 mm de diamètre



Fig. 2
1976, essai d'un propulseur en ligne de vol, tuyères vers le bas



Fig. 3.
1979, préparation d'un
propulseur 402 du deuxième
étage du missile M4
pour un tir tuyère vers le bas



Fig. 4
1989, dans le cadre du
programme Ariane 5, essai d'un
propulseur segmenté à échelle
réduite préfigurant un moteur à
propergol solide (MPS) pour
l'étage d'accélération à poudre
(EAP) du lanceur



Fig. 5.
Années 1980, tir vertical tuyère vers le haut



Fig. 6
À gauche : en 1971, le poste de commande de tir en zone d'essais de Moulin-Bonneau
À droite : en 1994, le poste de commande de tir de la zone d'essais de Saint-Jean-d'Illac



Fig. 7.
1985, le Moyen d'essais en simulation d'altitude (MESA)

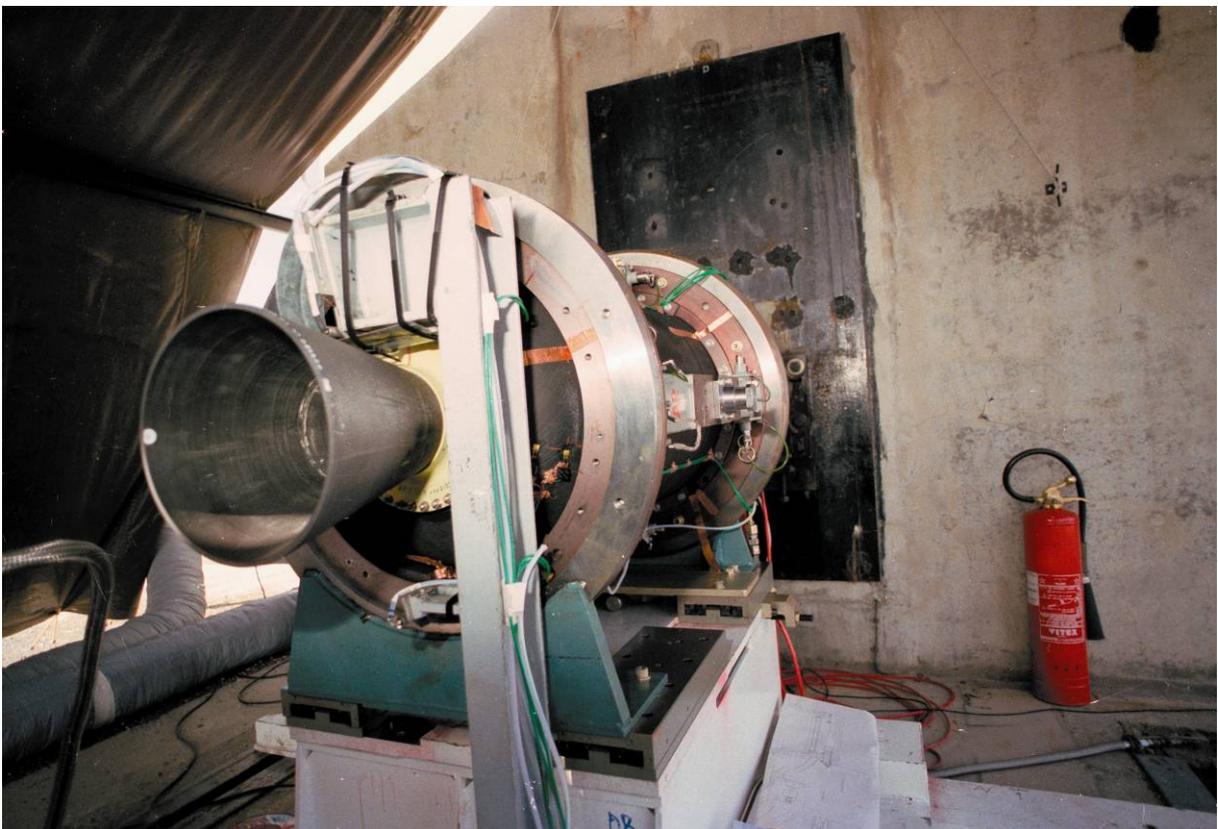


Fig. 8
1986, premier tir d'un propulseur nitralane en structure carbone,
sur un banc d'essais implanté sur un site du CEL à Captieux

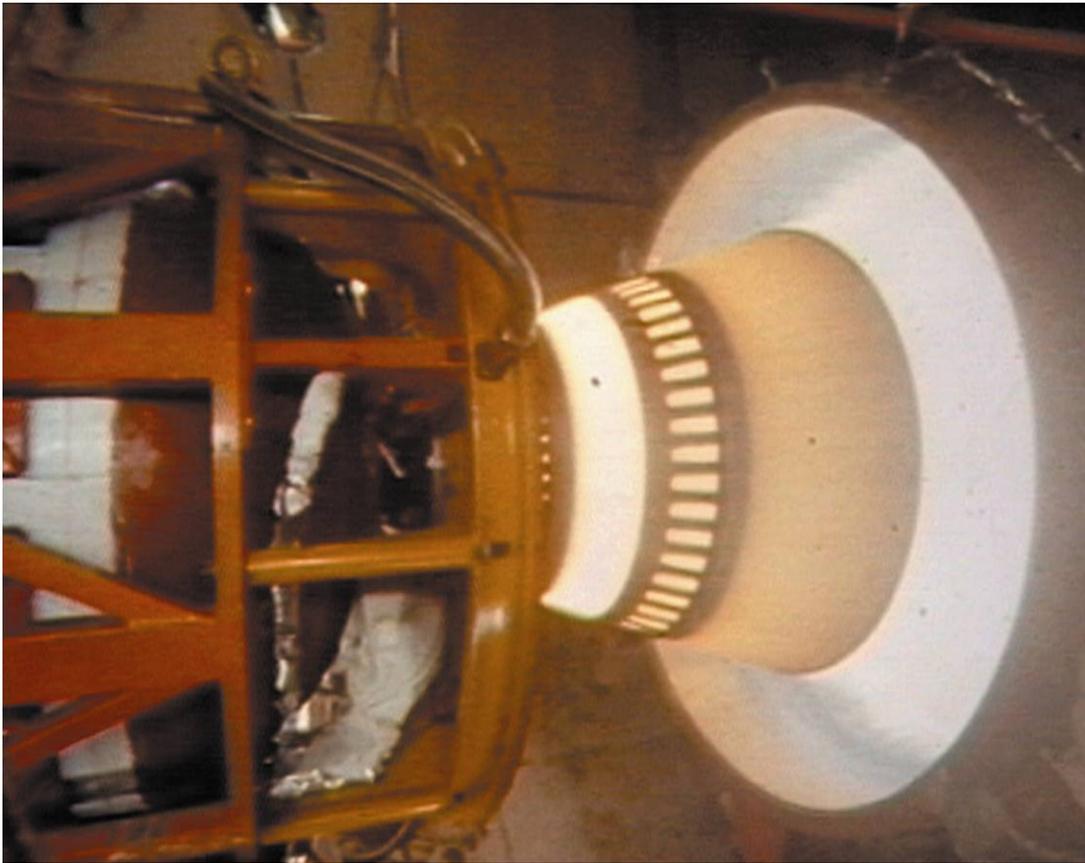


Fig. 9
1987, dans le banc MESA, tuyère à divergent déployable en
fonctionnement

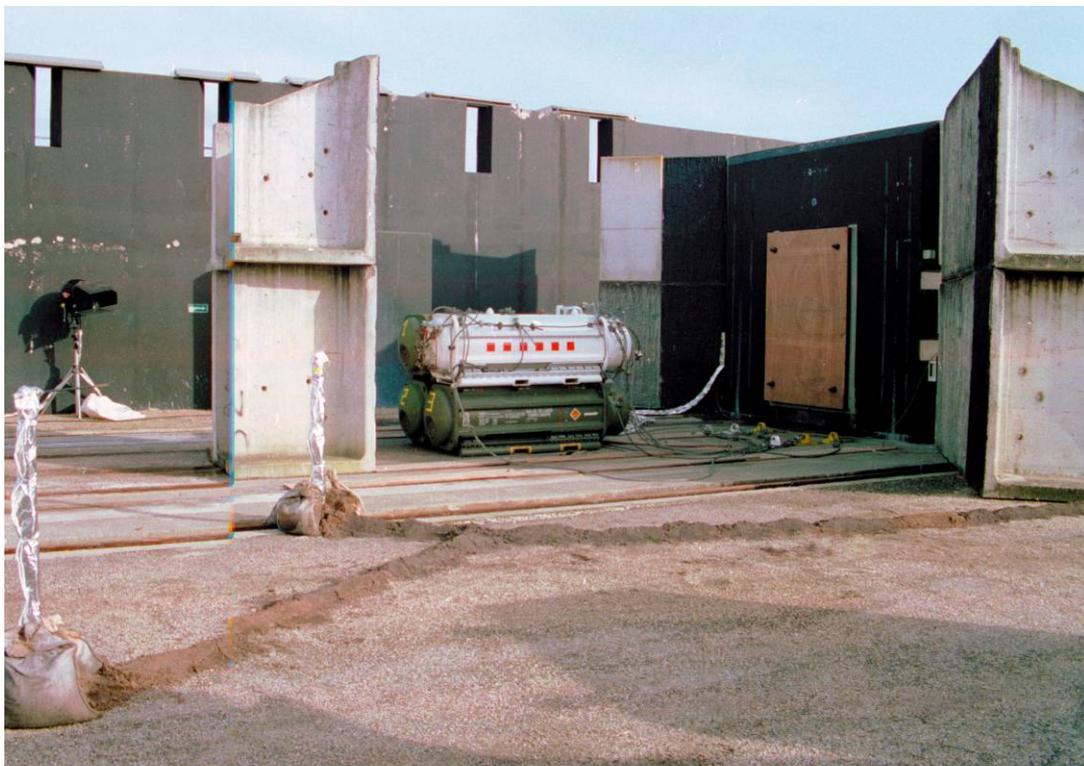


Fig. 10
1994, groupe de quatre conteneurs, dont l'un contient un missile AS30 que
l'on mettra à feu pour évaluer l'éventuelle propagation de phénomènes
pyrotechniques à ses voisins

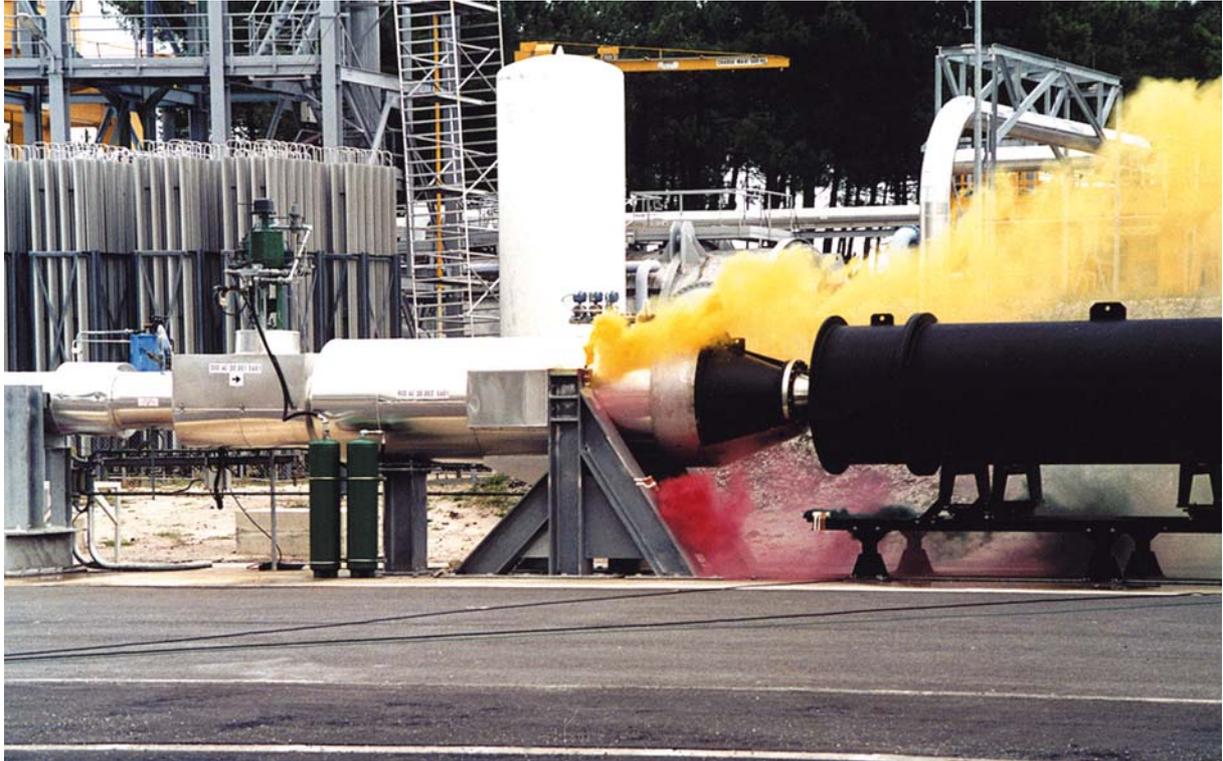


Fig. 11.

Moyen de caractérisation de jet (MCJ). Les fumées de couleur sont destinées à visualiser la qualité de l'écoulement autour du spécimen

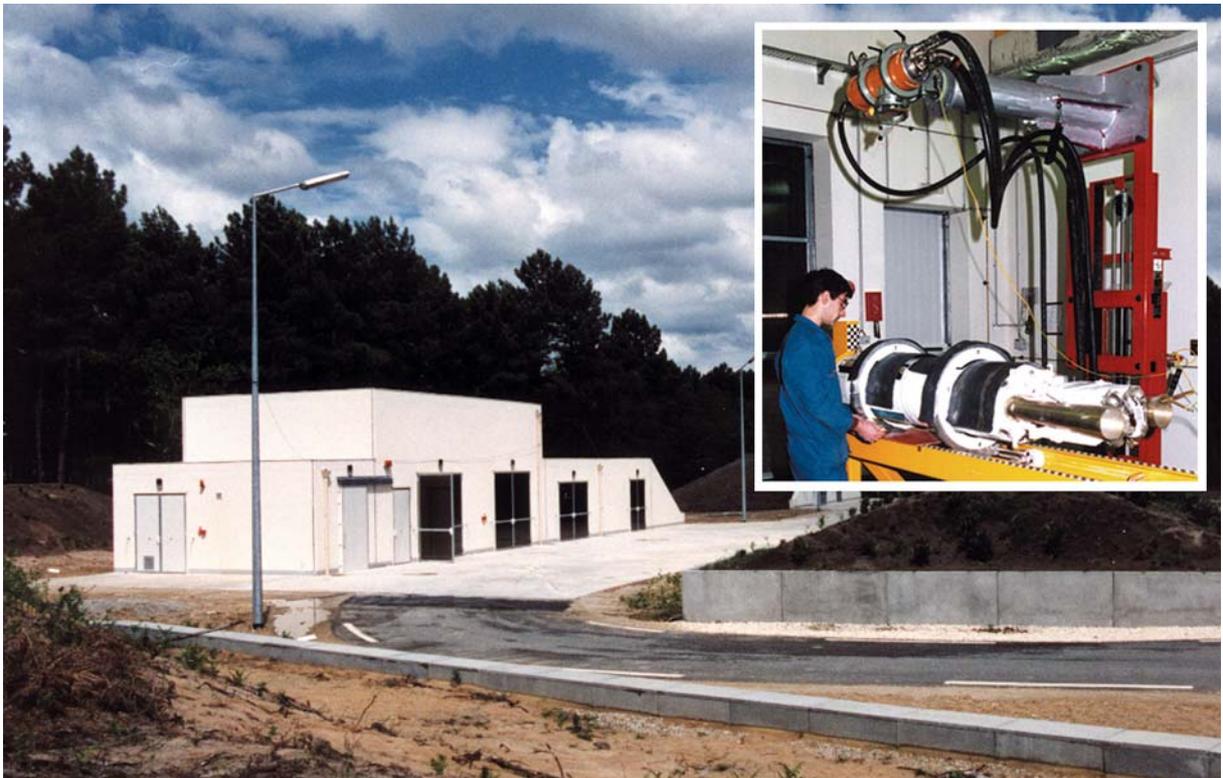


Fig. 12

1993, IMoyen pour missiles tactiques (MMT) pour la mise en vieillissement de propulseurs. En médaillon l'installation radio par rayons X



Fig. 13
Octobre 1965, assemblage et contrôle par la SEREB du lanceur de satellite Diamant-A n° 1, avant son transfert au centre de lancement à Hammaguir (Algérie). Tiré avec succès le 26 novembre suivant, il place en orbite Astérix, le premier satellite français



Fig. 14
1980, contrôle par l'Aérospatiale d'un missile expérimental du programme M4 avant envoi par sous-ensembles séparés au CEL pour un essai en vol



Fig. 15
1980, préparation par la SEP
d'une structure de propulseur 401
du premier étage du missile M4,
avant envoi à la SNPE pour
chargement en propergol

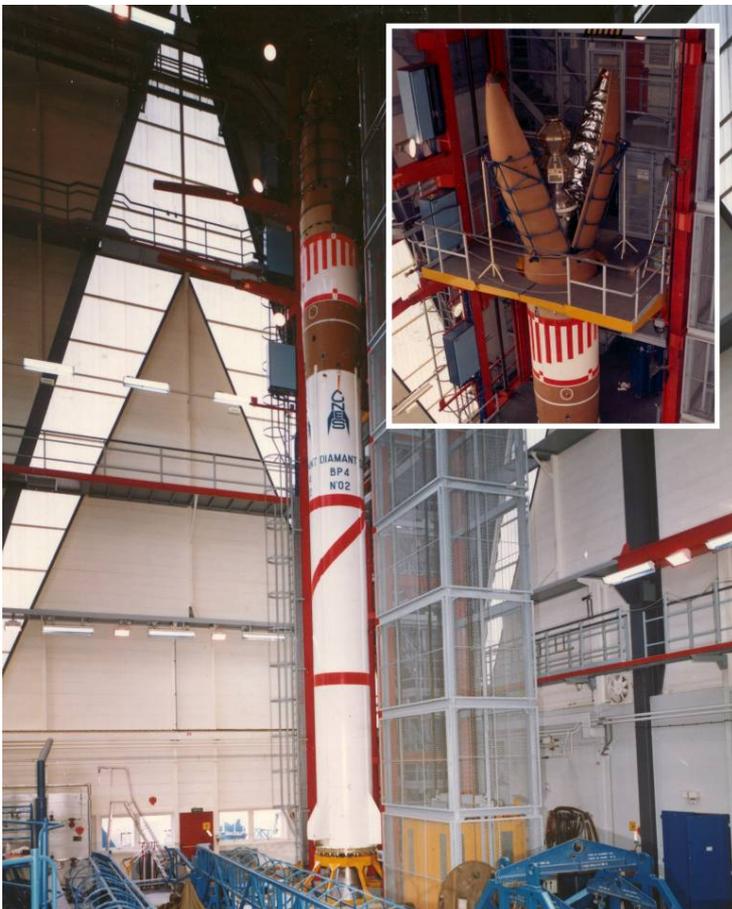


Fig. 16
Mars 1975, assemblage et
contrôle sous maîtrise d'œuvre du
CNES, du lanceur de satellite
Diamant-BP4 n° 2. Il mettra en
orbite le 17 mai 1975 les satellites
Castor et Pollux, représentés en
médaillon

CHAPITRE 10

Le LRBA (Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques)¹

1 - INTRODUCTION

S'étendant pratiquement sur la seconde moitié du XX^e siècle, l'histoire du Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques (LRBA) à Vernon est intimement associée à l'effort national de développement des technologies spécifiques des missiles et lanceurs spatiaux qui a été mené à bien sur cette même période. L'histoire du LRBA reflète ainsi le déroulement des travaux scientifiques et techniques de cette branche de l'industrie aérospatiale française ; elle est également étroitement liée à la constitution d'un secteur industriel de premier ordre à l'échelle mondiale.

Le LRBA a, dans le même temps, contribué à la formation des ingénieurs et des responsables qui ont conduit les recherches scientifiques, les programmes, et dirigé les organisations étatiques et industrielles de cette fin du XX^e siècle. Par son organisation et sa situation, le LRBA constitue également un modèle original de vie sociale et associative.

2 - IMPLANTATION DOMANIALE

Le LRBA est situé sur un plateau boisé de 545 hectares surplombant la rive droite de la Seine sur le territoire de la commune de Vernon (figure 1). Une route de 2 km environ, gravissant une forte pente, mène du pont sur la Seine aux bâtiments principaux de l'établissement.

Ce territoire était une ancienne propriété de la société Brandt qui, avant la guerre, y avait implanté un champ de tir pour la réception de ses mortiers. Sur ce terrain, suite à la nationalisation de Brandt en 1936, un atelier de chargement des obus de mortier, puis une usine de fabrication de cartouches anti-aériennes de 13,2 mm sont successivement construits. Les Allemands voulurent pendant l'occupation y implanter une usine de fabrication de roulement à billes. Cette usine fut détruite par un bombardement avant même d'avoir été mise en route.

3 - L'ACQUISITION DES CONNAISSANCES TECHNIQUES

Une page de l'histoire des missiles et de la conquête spatiale s'est ouverte le 3 octobre 1942 à Peenemünde au bord de la mer Baltique, lorsque l'engin militaire A4², connu sous le nom de fusée V2³, quitte la terre et culmine à plus de 100 km

¹ Par Bernard Laurent.

² A4, pour *Aggregat 4* ou engin n° 4.

³ V2 pour *Vergeltungswaffe 2* ou arme de représailles n° 2.

d'altitude. Cet effort technique, effectué du côté allemand, visait à mettre au point des armes nouvelles fondées sur la technologie des fusées et destinées, soit au bombardement lointain, soit à la défense contre les avions. Les signes de leur redoutable efficacité, notamment sur Londres, incitèrent les Alliés à exploiter les documents saisis en Allemagne et à s'assurer de la coopération des techniciens concernés.

Deux hommes, le professeur Henri Moureu et l'ingénieur en chef Jacques Lafargue, attirèrent l'attention de l'EMA (Etat-major des Armées) et mirent successivement en place le Groupement opérationnel des projectiles autopropulsés (GOPA) sous l'égide de l'armée de Terre, puis le Centre d'études des projectiles autopropulsés (CEPA) au sein de la DEFA (Direction des études et fabrications d'armements) dont les attributions avaient été fixées en juin 1945. L'organisation se précisa, au profit de la DEFA, par les deux décrets, respectivement n° 45 1089 et 46 1845, des 17 mai et 13 août 1946 : le premier crée un Laboratoire du Service technique de la DEFA et le second lui donne son nom : Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques (LRBA).

Dans un premier temps, au 1er octobre 1946, la direction du LRBA (ingénieur général Paul Libessart) se situe à Saint-Cloud au siège de la DEFA ; elle gère quatre annexes, Vernon, Versailles, Mulhouse et Saint Louis. Ce sera en 1949 seulement que les activités liées aux engins seront rassemblées sur le site unique de Vernon, mettant en place une organisation stabilisée. De fait, le LRBA reprit l'ensemble des missions du CEPA.

En avril 1947, une base de lancement d'engins fut créée à Colomb-Béchar qui deviendra le Centre interarmées d'essais d'engins spéciaux (CIEES) en 1948 ; il fut procédé également à l'achat d'une emprise à Gramat pour la réalisation d'une station d'essais de gros propulseurs au point fixe.

Cette organisation qui se mettait en place traduisait la volonté de rassembler les moyens humains et les équipements. Pratiquement tout était à faire. Un point des plus significatifs fut l'arrivée sur le plateau de Vernon d'environ 150 techniciens allemands, essentiellement deux groupes de volontaires pour travailler en France, des spécialistes des engins de Peenemünde, d'une part, et des motoristes pour chars venant de Friedrichshafen avec l'équipe du Professeur Karl Maybach, d'autre part.

Il n'y avait alors dans la ville de Vernon aucune ressource pour loger le personnel français et *a fortiori* allemand ; la DEFA engagea donc une politique de construction à la fois d'ateliers, de laboratoires, de moyens d'essais et de locaux d'habitation. Une cité de villas et de jardins fut construite, en complément de la « Cité de la Madeleine », Buschdorf pour les Allemands qui y étaient logés en majorité. Un mess-hôtel, une cantine ouvrière, une épicerie et plus tard une école s'y ajoutèrent.

Il fait peu de doute que cette politique sociale de logement eut un impact sur la vie des cadres et des personnels ; elle contribua fortement à la qualité de formation et de cohésion des équipes qui ont œuvré de manière décisive pour donner à la France la place qu'elle a conquise dans les domaines des missiles et de l'espace. Parfois même, dans cette période où les difficultés de l'après-guerre étaient encore

considérables, cette situation pouvait paraître privilégiée et suscitait des réactions de la population de la ville de Vernon⁴.

Les moyens techniques du LRBA s'organisèrent en fonction de trois enceintes principales. La première, autour de la direction, rassembla des bureaux et laboratoires - essentiellement pour l'étude des composants de guidage et les systèmes inertiels (gyroscopes, accéléromètres...) -, et des hangars pour le montage et la manœuvre des grands engins. Dans la deuxième enceinte, plus éloignée, étaient rassemblés les moyens destinés à l'étude de la propulsion à liquides, y compris les points fixes pour les essais au sol, le stockage et la manipulation des ergols. Le moyen le plus important sera le PF4, capable d'expérimenter un engin complet de 100 t de poussée, inauguré en mars 1963. La troisième enceinte réunissait les installations de l'aérodynamique : une soufflerie supersonique à Mach 4, à flux continu, des souffleries à rafales, un tunnel de tir hypersonique avec un canon à hydrogène.

L'extension de la cité et des installations techniques nécessita l'aménagement de servitudes logistiques importantes dont une ligne électrique spécifique de 14 000 kW depuis la centrale de la Vaupalière pour la soufflerie supersonique C4 et le forage de puits artésiens dans la vallée de la Seine. En assurant lui-même la mise en œuvre de ces servitudes, le LRBA se constituait, sur le Plateau de Vernon, en un ensemble d'une grande autonomie de vie et de travail.

Ainsi, à partir de la compétence technique des personnels et des moyens mis en place, le LRBA développa ses missions dans le domaine des engins autour de trois secteurs d'expertise :

- le guidage-pilotage, avec un axe particulier portant sur le guidage inertiel ;
- la propulsion, plus spécifiquement la propulsion par ergols liquides ;
- l'aérodynamique, essentiellement super- et hypersonique.

Parallèlement, dans la continuité de sa mission sur la maîtrise des techniques propres aux engins et missiles, le LRBA créa et développa un Bureau d'études qui mit en œuvre des moyens de calculs analogiques, digitaux et hybrides capables de simuler le comportement complet des systèmes de missiles, de lanceurs et de leurs composants.

Naturellement, la compétence dans le domaine balistique menait au domaine spatial et le LRBA devait également conduire des études, des simulations et des essais pour les systèmes de satellites ; les premières manifestations en ce sens furent la création, en 1966, d'un laboratoire d'optique en vue de la reconnaissance de la faisabilité d'un satellite d'observation et la mise en place d'un moyen de simulation d'ambiance spatiale.

4 - LES PREMIERS GRANDS PROJETS

Le LRBA est alors essentiellement conçu pour l'étude des fusées, comme l'illustre son premier logo (figure 2). Deux lignes de projets se dégagent rapidement :

- le PARCA (Projectile autopropulsé radioguidé contre avion) ;

⁴ *Le réveil de Vernon* du 11 octobre 1947.

- la fusée-sonde VERONIQUE⁵.

Ces deux projets émergent dans les années 1947-49, après que diverses orientations (reconstitution de trente V2 et étude d'un super V2/4212) eurent été écartées, pour des raisons à la fois doctrinales, de restrictions budgétaires ou de réalisme technique.

Le PARCA (figure 3) répondait directement à un besoin exprimé par les Armées, à savoir la destruction par un missile sol-air d'un bombardier volant à 300 m/s à des altitudes allant de 5 à 18 km. Il en résultait un engin d'une masse d'environ 1 100 kg, propulsé au départ par 4 accélérateurs à poudre et un étage de croisière à ergols liquides. La portée utile devait être de 5 à 20 km. Ultérieurement une propulsion à poudre dans sa totalité devait être préférée. Plus de 100 engins furent construits de 1945 à 1958 par l'APX⁶ et furent livrés pour expérimentation au 701^e Groupe d'artillerie guidée, pour des campagnes de tir en France puis au CIEES de Colomb-Béchar.

En 1957, une version du PARCA avec une aérodynamique améliorée, dénommée Eléonore, fut réalisée à l'état de prototype. Mais en 1958, à la suite de la décision prise de s'associer au programme OTAN⁷ de missiles sol-air Hawk et à sa réalisation sous licence américaine avec la participation de la société française Thomson-CSF, le projet PARCA fut définitivement abandonné par l'armée de Terre. Cette décision devait être durement ressentie au LRBA et conduisit au départ de Vernon de nombreux spécialistes français et allemands, notamment dans le domaine des hyperfréquences.

L'acquis des travaux du LRBA fut cependant très notable pour l'industrie nationale des missiles et fusées. Il ouvrit la voie à la réalisation du système sol-air Crotale par Thomson, à la mise au point de la série des radars de champs de tir Aquitaine, Bretagne et Béarn, aux autodirecteurs électromagnétiques en ondes centimétriques, et enfin à la constitution d'une expérience de premier ordre dans le domaine des équipements de pilotage-guidage : vérins magnétiques et hydrauliques, composants inertiels, avec leur fabrication, leur caractérisation et leurs essais.

Le développement des fusées-sondes VERONIQUE (figure 4) et Vesta, ni guidées ni pilotées mais seulement dirigées sur les quelques dizaines de premiers mètres par un système de câbles, sera l'occasion pour le LRBA d'acquérir une maîtrise de la propulsion par ergols liquides qui sera une des bases fondamentales de l'histoire spatiale européenne.

Les premiers travaux désignés sous le vocable d'EOLE (Engin fonctionnant à l'oxygène liquide et à l'éther de pétrole) commencèrent dès 1946 avec l'EA46 (oxygène liquide et essence) suivi de l'EA51 de près de 10 tonnes de poussée (oxygène liquide et alcool éthylique), pour être abandonnés en 1952 après les difficultés rencontrées : explosion au point fixe de Vernon en 1950 et échecs des tirs à Colomb-Béchar en novembre 1952. Ce sera donc autour de propulseurs à ergols stockables que les développements se concrétiseront véritablement.

L'histoire de VERONIQUE commence donc le 15 mars 1949 avec la décision de la DEFA de lancer le moteur d'une fusée-sonde capable de porter 60 kg d'appareillage

⁵ Nom dont la formation serait une contraction de VERnon électRONIQUE ou encore de VERnOn acide NITRIQUE.

⁶ Ateliers de Puteaux, autre établissement dépendant de la DEFA.

⁷ Organisation du traité de l'Atlantique Nord. Outre les Etats-Unis, ce programme associait les Pays-Bas, la Belgique, l'Italie et la République fédérale d'Allemagne.

scientifique à 65 km d'altitude. Le moteur devait être de 4 tonnes de poussée en utilisant de l'acide nitrique et du kérosène, puis l'essence de térébenthine remplaça le kérosène avec une meilleure impulsion spécifique. Après avril 1951, date du seul tir sur le site de Vernon d'une maquette de VERONIQUE à poudre pour valider le système de lancement, les lancements eurent lieu à Hammaguir à partir de 1952. Le LRBA connut quelques déboires au début des essais, notamment du fait des instabilités de combustion, mais maîtrisa la technique et réalisa une série de versions de VERONIQUE, respectivement N, NA, AGI⁸ et 61, qui permit d'atteindre l'altitude de 300 km avec un moteur de 6 t de poussée en 1961. VERONIQUE embarque en février 1961 le rat Hector, puis successivement les rats Castor et Pollux, puis en 1963 les chats Félicette et Félix. Le 9 avril 1968, une VERONIQUE AGI inaugure avec succès le nouveau Centre spatial de Kourou, par le premier vol de fusée réalisé depuis ce centre, et atteint une altitude de 113 km.

A la demande du Centre national d'études spatiales (CNES), le LRBA étudie au début des années 60, une nouvelle fusée-sonde avec les mêmes ergols que VERONIQUE mais d'une poussée de 16 t, capable d'emmener une charge utile de 1 t à 250 km d'altitude. Le premier tir fut réussi à Hammaguir le 15 octobre 1964. Avec cette même fusée, deux expériences biologiques, avec les macaques Martine et Pierrette, furent conduites avec succès les 7 et 23 mars 1967 au profit du CERMA (Centre d'études et de recherches de médecine aérospatiale). En novembre 1969, un tir Vesta fut réalisé depuis Kourou. Le projet Vercors, qui devait succéder à la fusée-sonde Vesta, fut arrêté au début 1965, marquant ainsi l'aboutissement des projets de fusées-sondes au LRBA.

Cette épopée des fusées-sondes est représentative d'une période au cours de laquelle des motivations essentiellement scientifiques pouvaient orienter et soutenir des projets conduits au sein des Armées avec des applications opérationnelles encore lointaines mais malgré tout bien illustrées par les réalisations allemandes de la seconde guerre mondiale et correspondant également aux efforts déployés dans le même temps par les Américains et les Soviétiques dans le domaine des fusées. A partir d'août 1958, la situation va changer avec la décision gouvernementale d'entreprendre les études d'engins stratégiques.

Le 17 septembre 1959, la Société d'études et de réalisation d'engins balistiques (SEREB) est créée et constitue la base de l'organisation industrielle du domaine des engins balistiques. Le LRBA est bien préparé pour cette aventure des engins balistiques et lanceurs spatiaux et saura y prendre une place significative, d'une part en irriguant les nouvelles structures étatiques et industrielles avec les ingénieurs qu'il a formés et, d'autre part, en prenant une part active aux développements, réalisations et essais.

⁸ AGI, comme Année géophysique internationale, prévue de juillet 1957 à décembre 1958. Des aléas sur les crédits budgétaires qui préfiguraient la situation des années à venir reportèrent à mars 1959 la campagne d'étude de la haute atmosphère lancée à l'initiative du Comité d'action scientifique de la Défense nationale (CASDN), qui incorporait en particulier l'émission d'un nuage de sodium par une fusée VERONIQUE AGI entre 60 et 200 km d'altitude. Le taux de réussite de 81 % des fusées VERONIQUE AGI obtenu sur 48 lancements montre le niveau atteint dans la maîtrise des technologies mises en œuvre.

Ainsi, le LRBA participa activement à la série dites des « pierres précieuses » qui, au travers du programme d'Etudes balistiques de base (EBB), visait la réalisation d'un engin bi-étage à propulsion liquide-poudre, d'une portée de 3 000 km, qui devait être le prototype du futur missile de la Force de dissuasion française. Le premier étage Emeraude est défini à partir du véhicule expérimental VE121 de Nord-Aviation, le LRBA est responsable de l'ensemble propulsif et de son pilotage, et développe pour cela le moteur Vexin (acide nitrique et essence de térébenthine) de 28 t de poussée avec une tuyère orientable.

Après trois échecs, Emeraude réussit ses deux tirs suivants en février et mai 1965, ouvrant la voie aux tirs de Diamant A constitué du premier étage Emeraude et de l'ensemble Rubis, lui-même constitué de l'étage à poudre Topaze et d'un troisième étage à poudre non piloté.

Le 26 novembre 1965, le satellite Astérix fut lancé avec succès d'Hammaguir par Diamant A (figure 5). La France devient ainsi la troisième puissance spatiale.

Le LRBA devait également étudier et développer le moteur Valois de 35 t de poussée. Avec ce moteur débutait la génération des moteurs utilisant les ergols hypergoliques N_2O_4 + UDMH (diméthyle hydrazine dissymétrique) qui allait devenir le standard des moteurs à ergols liquides pour les lanceurs Ariane. Ce moteur devait constituer le 1^{er} étage du Diamant B, dont le moteur L3,5 est étudié par le LRBA à partir de 1968 et dont le premier lancement réussi place en orbite le satellite DIAL⁹.

Dans la même période, le LRBA développe l'ensemble Coralie constitué de 4 moteurs de 7 t de poussée, qui constitue le 2^e étage de la fusée Europa du CECLES/ELDO (Commission européenne pour la mise au point et la construction de lanceurs d'engins spatiaux/*European Launcher Development Organisation*), dont les premiers tirs auront lieu à Woomera en Australie.

Enfin, le LRBA effectue le 5 juin 1969, le premier tir d'un moteur désigné sous le sigle de M40, qui est une extrapolation du moteur Valois, mais avec une turbopompe remplaçant les générateurs à gaz pour l'expulsion des ergols dans la chambre de combustion. Ce moteur, qui prendra le nom de Viking (figure 6), verra sa poussée accrue jusqu'à 60 t lors d'essais en décembre 1973. Ce moteur, conçu au départ comme une initiative propre du LRBA, fut soutenu ensuite par un contrat du CECLES et permit à la France de faire des propositions argumentées en 1973 dans le cadre du projet Ariane.

Dans un autre domaine de la propulsion des missiles, en exploitant ses compétences et moyens d'essais dans le domaine de l'aérodynamique, le LRBA entreprit des travaux sur les statoréacteurs. L'expérience acquise devait se transmettre à l'ONERA (Office national d'études et de recherches aérospatiales)¹⁰ et s'appliquer au début des années 1970 pour aboutir à la propulsion du missile stratégique aéroporté ASMP (Air-sol moyenne portée)¹¹.

⁹ DIAL : Contraction de Diamant + Allemand (programme en coopération franco-allemande, avec la mise sur orbite des capsules technologiques allemandes Mika et Wika).

¹⁰ Voir le chapitre 13 du présent document.

¹¹ Voir le document du COMAERO sur *Les missiles à statoréacteurs : l'ASMP*, CHEAr, 2009.

5 - LA SITUATION DES ORGANISATIONS ETATIQUES ET INDUSTRIELLES

Il est indispensable de resituer l'ensemble de cette activité du LRBA, notamment pour le domaine de la propulsion, dans le contexte des besoins affichés par les Armées dans les années 60, des incertitudes sur l'avenir des lanceurs spatiaux civils et de la transformation des organisations étatiques et industrielles concernées par cette branche d'activité.

La DEFA avait porté le LRBA depuis son origine ; en 1965, le développement de la Force de dissuasion conduisait à la création de la Direction technique des engins (DTEn) ; tout naturellement, en fonction de ses missions et de ses activités, le LRBA devait lui être rattaché au 1^{er} janvier 1967. De ses origines au sein de la DEFA, le LRBA devait conserver jusqu'au milieu des années 1990 une gestion en « compte de commerce », c'est-à-dire une comptabilité propre, de type industrielle, nécessitant d'être équilibrée, avec la contrepartie d'une relative autonomie en matière d'investissement. Cette caractéristique contribua à donner au LRBA sa propre personnalité au sein de la DTEn puis de la Direction des missiles et de l'espace (DME) et à engager un type de relation très particulier avec les industriels pour lesquels le LRBA était à la fois prestataire de services et expert à caractère étatique.

Dans le domaine du guidage, le LRBA, qui avait réalisé dès 1958 une première plate-forme inertielle, se vit confier la mission d'expertise et d'essais, et installa en 1964 la première centrifugeuse de précision ; des liens étroits se sont constitués avec les industriels dans le cadre de l'exécution de nombreux programmes.

Pour la propulsion, la situation était tout autre. D'une part, le choix de la propulsion à poudre pour l'ensemble des missiles stratégiques a marginalisé la filière à ergols liquides pour les besoins de la Défense. D'autre part, en matière de lanceurs civils, le choix d'une filière européenne, les aléas et échecs autour de la fusée Europa (jusqu'au choix en avril 1973 du lanceur L3S comme programme décidé sous le nom d'Ariane) faisaient qu'à partir de 1967, sur les dernières années de la décennie, une réelle incertitude pesait sur l'avenir des équipes du LRBA, de leur charge en travaux de développement, d'industrialisation, de production et d'essais. L'équilibre du « compte de commerce » était mis en cause.

Dans le contexte industriel en 1968-69, la situation n'était pas moins compliquée. Le CNES et la DMA (Délégation ministérielle pour l'armement) avaient passé une convention pour Diamant A ; par ailleurs dans le cadre de la mise au point du 2^e étage Coralie pour Europa, le LRBA et Nord-Aviation avaient créé un Bureau permanent à Vernon. Le regroupement dans la SNIAS (Société nationale industrielle aéronautique et spatiale) des équipes de la SEREB et de Nord-Aviation devait redistribuer les rôles entre les responsabilités étatiques et industrielles des équipes, celles-ci devenant désormais exclusivement de nature industrielle ; le LRBA y trouvait une place accrue en matière d'expertise technique au profit de la DMA, à l'exception du secteur de la propulsion dans lequel sa position en matière d'études et d'industrialisation était mise en question. De plus, dans ce secteur, la propulsion à ergols liquides étudiée par le LRBA entrait en compétition, pour le développement des lanceurs futurs, avec la propulsion cryogénique développée par la Société d'études de la propulsion par réaction (SEPr) qui était envisagée pour les évolutions du lanceur Diamant. Le regroupement en une seule entité paraissait alors être le

moyen d'équilibrer les charges de travail, de réduire les risques industriels et de faciliter les accords industriels dans le contexte d'une coopération européenne sur les lanceurs spatiaux.

La situation devait en définitive se dénouer par :

- la création de la Société européenne de propulsion (SEP) au 1^{er} juin 1969, regroupant la SEPr avec des équipes de la Société nationale d'étude et de construction de moteurs d'aviation (SNECMA) et de Nord-Aviation, le capital de la Société étant contrôlé par des sociétés nationales ;

- la création de la SNIAS en 1970 ;

- au 1^{er} octobre 1971, le transfert à la SEP d'une partie du LRBA par décision du ministre de la Défense et la création d'un Etablissement de la SEP à Vernon sur le site du LRBA. Etaient transférés à la SEP les études et essais moteurs dont les installations des « points fixes », une partie des études d'électronique et de servomécanismes, le laboratoire d'optique spatiale, et une partie du Service d'études d'ensemble et les moyens de calcul analogiques correspondants. Les effectifs du LRBA passaient de 900 à 465 personnes.

Le traumatisme de cette scission devait être ressenti très durement par le LRBA et cette période reste marquée par de nombreuses manifestations syndicales, des interventions auprès de personnalités y compris à l'Assemblée nationale. L'ingénieur général Jacques Marchal, directeur depuis 1962, quitte le LRBA au 1^{er} août 1971.

Sur les bases construites par le LRBA, la SEP sut faire fructifier et croître l'héritage pour contribuer de manière décisive au développement et au succès international des lanceurs Ariane. Entre la SEP et le LRBA, qui conserva jusqu'à la fin des années 80 la propriété du site et certaines responsabilités dans la sécurité, l'entente permit de conserver une vie harmonieuse sur le « Plateau ». Les personnels SEP continuèrent de bénéficier des logements et les personnels des deux organismes devaient trouver les accords nécessaires pour que le CSADN (Club sportif et artistique de la défense nationale) demeure un pôle de référence pour l'animation de l'ensemble de la ville de Vernon.

Cet aspect de la vie sociale que le LRBA apportait à Vernon mérite d'être souligné. Outre l'image de hautes technologies donnée à la ville et même à la région¹², l'établissement a disposé d'une école d'apprentis, s'est jumelé avec le Lycée et continue de constituer le support d'un nombre incalculable de manifestations culturelles et sportives.

6 - MATURETE DE L'EXPERTISE TECHNIQUE, D'ABORD L'INERTIE ET LES SYSTEMES STRATEGIQUES

Dès 1963, le Département engins de la DMA avait décidé la mise en place au LRBA des moyens indispensables à l'évaluation des équipements inertiels destinés au guidage des missiles balistiques. Après le rattachement du LRBA à la DTEn au 1^{er} janvier 1967 et sa désignation¹³, au profit de l'ensemble de la DMA, comme Centre pilote et Centre d'essais pour les systèmes à base de composants gyroscopiques et accélérométriques de qualité inertielle, cette activité allait devenir

¹² Par exemple : journée « Science et Défense » organisée à Rouen/INSA en avril 1989 ; salon Odyssée 21 au Zénith de Rouen en 2001.

¹³ Décision 12 157 DMAD du 12/12/1973, reprenant les grandes lignes d'une décision du 6 avril 1970 antérieure à la coupure LRBA/SEP.

l'activité caractéristique de l'Etablissement dont la vocation étatique était ainsi affirmée sans ambiguïté. L'ingénieur général Antonin Collet-Billon, qui avait dirigé le Département guidage du LRBA dans les années 60, devient directeur des Engins en 1974.

Cette expertise du LRBA était l'aboutissement d'un processus engagé depuis les années 1958-59 entre la DEFA (à laquelle le LRBA appartenait alors) et la DTIA (Direction technique et industrielle de l'aéronautique) au sein de laquelle le « Groupe des engins balistiques » fut créé en 1959 pour réaliser le premier programme d'engins stratégiques. Certes, la création en 1961 du Département engins puis de la Direction technique des engins, à laquelle le LRBA appartenait désormais, avaient modifié le paysage. Il n'en demeurait pas moins qu'une répartition des missions devait être encore précisée en 1968 pour la réalisation des investissements en moyens d'essais entre le LRBA et le CEV/LEA (Centre d'essais en vol/Laboratoire d'équipements aéronautiques) de Brétigny qui conduisait les essais et expertises sur les centrales inertiels d'avion.

Dans le domaine inertiel, le LRBA devait développer un ensemble d'activités qui couvraient un large spectre depuis la maîtrise des technologies, la conduite des essais et les intégrations aux systèmes :

- Les technologies des capteurs inertiels de grande précision - gyroscopes, accéléromètres, plate-formes - sont particulièrement évoluées du point de vue mécanique et électronique. Dès 1970, le LRBA avait développé la technologie des paliers magnétiques dont les réalisations furent externalisées au travers de la SEP et d'une société spécialisée, la S2M. L'expertise du LRBA fut particulièrement impliquée dans les générations successives des équipements inertiels pour les systèmes stratégiques : gyroscopes flottants, gyroscopes SEC (à suspension élastiquement compensée), gyroscopes à suspension électrostatique (GSE), gyromètres laser, plates-formes à composants liés (dites *strap-down*).

- L'évaluation de ces composants de précision demande des moyens spécialisés de hautes performances. Le LRBA devait être le seul centre français rassemblant les moyens d'essais et de tests nécessaires : centrifugeuses, table 5 axes, de nombreuses tables d'essais très stables pour effectuer des mesures dans des environnements divers de température et de vibrations, laboratoire astro-inertiel mis en place en 1990 (figure 7), etc. L'essentiel de ces moyens a nécessité des caractéristiques d'isolation sismique très élevées, avec une permanence de fonctionnement sans interruption de plusieurs mois.

- Le LRBA s'est également impliqué dans « l'approche système » de l'utilisation de ces composants inertiels. Au niveau élémentaire d'abord, où des logiciels corrigent les imperfections mécaniques, et dans les sous-systèmes que l'on trouve par exemple dans les unités d'acquisition d'azimut des systèmes stratégiques S, M ou nucléaire tactique (Pluton et Hadès). Plus particulièrement à partir de 1975, le LRBA a joué un rôle d'intégrateur dans le Système global de navigation¹⁴ (SGN) des SNLE

¹⁴ Ce système concentre, interprète l'ensemble des données relatives à la navigation (loch, inertie, recalage radio...) et effectue un filtrage de type Kalman pour donner la meilleure estimation de

(Sous-marin nucléaire lance-engins) ; exploitant les informations des plates-formes inertielles de navigation, assurant le « filtrage » de ces informations, le recalage avec les autres données disponibles (loch, visée astrale, gyrocompas...), il a mis au point les procédures et validé leurs applications par restitution, mission après mission.

C'est ainsi que le LRBA réalisa lui-même le système SGN-3C des SNLE type *Le Redoutable*, transféra à la SAGEM (Société d'applications générales d'électricité et de mécanique) ses compétences pour que celle-ci réalise le SGN-3D des SNLE type *Le Triomphant*, mais en conserva l'évaluation dans un laboratoire spécialisé. Ces évaluations et essais du LRBA étaient déterminants pour la connaissance de la précision terminale des missiles.

Au début des années 1980, 120 personnes, dont environ un tiers d'ingénieurs, travaillent directement dans le cadre de la mission inertielle inter-directions ; il s'y ajoute près de 80 personnes travaillant sur les activités de soutien : essais, informatique, étalonnages...

Il convient de souligner le caractère particulier de cette activité liée aux systèmes stratégiques couverte par un secret-défense de niveau élevé qui a donné du LRBA l'image d'un Etablissement très protégé et fermé. Des relations spécifiques se sont nouées avec les industriels notamment la SAGEM qui, de fait, se trouvaient en situation de monopole. Non seulement le LRBA était l'expert technique en appui des directions de programmes (DTEⁿ, STCAN¹⁵, DTCA¹⁶), mais était capable d'engager avec l'industrie un véritable dialogue technologique. Ainsi, le LRBA a démontré dans ses propres chambres blanches la « réparabilité » de certains types de gyroscopes ou formé les personnels de l'industrie à partir de ses réalisations antérieures. Cette situation n'était pas sans créer certaines tensions ; l'ambition de l'objectif commun a permis de les dépasser à l'image du tournoi annuel de tennis qui réunissait, dans les années 70-90, les équipes du LRBA et de la SAGEM, représentées au plus haut niveau de chaque organisme.¹⁷

Cette expertise dans les domaines de la navigation et du guidage, essentiellement développée pour les systèmes stratégiques, a naturellement trouvé à s'exprimer au titre de la mission inter-directions :

- Pour les missiles tactiques¹⁸ : la chaîne de guidage-pilotage de ces missiles entrain dans le domaine de compétence de l'Etablissement. La Direction des engins s'est appuyée sur le LRBA, particulièrement pour le développement des missiles Mistral et MICA (Missile d'interception, de combat et d'autodéfense). Ces missiles, respectivement un petit missile sol-air utilisant un autoguidage infrarouge et un missile d'interception air-air à moyenne portée, relevaient de technologies très évoluées et leurs développements exploitaient au maximum les capacités de l'industrie nationale des missiles.

position du SNLE et la transférer comme donnée initiale au système de guidage des missiles MSBS (Mer-sol balistique stratégique).

¹⁵ Service technique des constructions et armes navales.

¹⁶ Direction technique des constructions aéronautiques.

¹⁷ Sur un plan plus professionnel, le LRBA était pleinement associé à l'excellence de l'expertise nationale dans le domaine de l'inertie. Ainsi lorsque les relations avec la Chine s'ouvrirent, le LRBA reçut en janvier 1987 une des premières délégations du ministère de l'aéronautique de Chine.

¹⁸ On rappelle que les missiles tactiques ont été regroupés au sein de la Direction technique des engins par une directive ministérielle d'octobre 1970.

Dès le milieu des années 80, le LRBA travailla sur les simulations numériques et hybrides de ces missiles, incluant des éléments réels - autodirecteurs, inertie - de la chaîne de guidage-pilotage. C'est dans ce contexte - en utilisant le simulateur numérique STRADI (Simulateur temps réel pour autodirecteur doppler à impulsions) et une table 5 axes - que le LRBA fut le premier centre européen à réaliser une simulation hybride, en boucle fermée et en temps réel, avec des éléments réels de missile, du fonctionnement en vol d'un missile MICA à autodirecteur infrarouge. Ces méthodes devaient réduire le nombre de tirs d'essais en vol et faciliter leur exploitation.

Cette activité s'est développée dans un esprit de « saine émulation » avec les équipes du CELAr (Centre électronique de l'armement)¹⁹ qui étaient plus particulièrement compétentes en matière de détection et de fonctionnement des autodirecteurs. Le LRBA devait d'autant plus faire preuve de compétence que ses prestations, du fait de son fonctionnement en compte de commerce²⁰, devaient être payées par le demandeur, alors que celles du CELAr, en régime budgétaire, étaient gratuites.

- L'expertise dans les sous-systèmes de navigation a conduit le LRBA à intervenir dans différents secteurs où la précision des alignements de référence était essentielle. En 1979, ont été étudiées les conséquences des mouvements coniques provoqués par les rafales de vent dans l'alignement au sol de la centrale du lanceur Ariane. Au cours des années 80, les processus d'alignement en vol des références inertielles de l'avion porteur et du missile ASMP ont été étudiés et définis. Egalement, des méthodes évoluées de métrologie angulaire ont été exploitées pour l'alignement des centrales inertielles sur porte-avions et sur le bâtiment d'expérimentation *Monge* pour tenir compte de la déformation des coques et structures.

- En 1993, le LRBA est désigné comme Etablissement pilote pour la navigation par satellites. Le représentant de la France auprès de la direction de programme américaine du GPS (*Global Positioning System*) est choisi parmi les personnels du LRBA. Dans ce contexte, le LRBA accueillera plusieurs réunions internationales sur le GPS (de l'OTAN notamment) et participera de manière active aux expertises techniques du programme européen Galileo à partir des années 2000. Cette activité était en fait le point d'aboutissement de l'intérêt manifesté, depuis 1976, pour le programme GPS-NAVSTAR, avec l'intégration pour la navigation des navires, la réalisation et les essais sur un laboratoire mobile installé dans un véhicule routier dans les années 1980.

Etant étroitement lié aux développements et à la mise en place des systèmes nucléaires stratégiques, le LRBA a tenu dans ces programmes des rôles divers souvent discrets en raison du haut niveau du secret de défense attaché à ce type d'activité. Parmi ces tâches, on peut relever notamment :

- A partir de 1978, la mise en place et la gestion d'un stock stratégique pour le système SSBS (Sol-sol balistique stratégique) S3 assurant le maintien de la disponibilité du système quelle que soit l'origine des composants.

¹⁹ Voir le chapitre 12 de ce document.

²⁰ Le LRBA passera dans le régime budgétaire au début des années 1990.

- Le fonctionnement, de 1984 à 1996, du Générateur photonique impulsif (GENEPI) destiné à valider le comportement des composants des systèmes stratégiques soumis au flash électromagnétique. Avec une amélioration de performances réalisée en 1990, ce site a effectué plus de 23 000 tirs conduits par des équipes du LRBA et de divers industriels, particulièrement de l'Aérospatiale.

- La mise en œuvre d'outils de simulation numériques et hybrides. Notamment le Centre de simulation fut renouvelé en 1987 et installé dans une chambre de Faraday de manière à pouvoir traiter les informations les plus classifiées. Outre les simulations des systèmes de missiles stratégiques et tactiques²¹, le Centre traita les systèmes de satellites. Le LRBA travailla ainsi dès le départ sur les projets de satellites optiques d'observation comme SAMRO (Satellite militaire de reconnaissance optique) à partir de 1978, puis Hélios dans le début des années 80.

Lorsque le Président américain Donald Reagan lança la « *Strategic Defense Initiative* » (SDI), à la fin des années 1980, le LRBA étudia la faisabilité des différents concepts et réalisa même un avant-projet de satellite d'interception grâce au développement de son « Outil synthétique et automatisé d'aide à la conception et à l'analyse des simulations » (OSAACAS).

7 - LA QUALITE, LES ESSAIS ET L'ENVIRONNEMENT

Dans l'accompagnement de ses missions, le LRBA s'est constitué dès l'origine un ensemble de moyens d'essais. Ces moyens, regroupés dans un Service environnement et métrologie (SEM), se répartissaient essentiellement en laboratoires d'essais climatiques, d'essais mécaniques, d'essais en ambiance spatiale, de métrologie électrique et de vibration, de métrologie angulaire ; le LRBA disposait dans certains cas d'étalons primaires et était habilité par le BNM (Bureau national de métrologie). En 1987, le LRBA est présent au premier salon des laboratoires d'essais (ASTElab) organisé par l'ASTE (Association pour le développement des sciences et techniques de l'environnement).

L'Établissement s'investit dans la « démarche qualité » ; il détiendra, le 1^{er} décembre 1997, le diplôme de certification ISO 9001 et recevra, du Délégué Jean-Yves Helmer, l'Etoile de Cristal, symbole de la meilleure performance au sein des établissements de la DGA.

En s'appuyant sur son expérience propre en matière d'essais, notamment les travaux sur les connecteurs, les équipements inertiels, les servomécanismes de missiles, le LRBA développe une activité plus générale concernant la méthodologie des essais en environnement (norme GAM EG 13). Le LRBA nourrira de grands projets d'extension sur ce thème qui n'aboutiront pas ; cependant la reconnaissance générale de son expertise en la matière fera qu'il sera retenu en 1995 comme centre pilote pour la méthodologie des essais d'environnement.

²¹ Dans le début des années 2000, le LRBA effectua notamment les simulations de navigation et de guidage terminal de missiles comme le SCALP-EG, l'ASTER 15, l'optimisation des lois de navigation de l'ASMP A, etc.

8 - L'AERODYNAMIQUE AU LRBA

Comme on l'a vu plus haut, l'activité aérodynamique du LRBA est née avec l'Etablissement. Elle s'est principalement organisée autour :

- De la soufflerie continue supersonique C4 fonctionnant de Mach 0,3 à Mach 4,4, dont les travaux démarrent dès 1947²² avec la participation d'aérodynamiciens allemands ayant travaillé sur la soufflerie à rafale de Kochel. Dans cette soufflerie furent étudiées les caractéristiques aérodynamiques de la plupart des missiles tactiques et stratégiques, mais aussi celles des avions de combat, les entrées d'air de Concorde ou encore des configurations d'obus en liaison avec l'ETBS (Etablissement technique de Bourges). Cette soufflerie effectuait encore 950 heures d'essais en 1996, mais devait être arrêtée en 1998 et démantelée en 2000. Un dispositif de cette soufflerie permettait de souffler l'air vers l'extérieur et de procéder aux essais de statoréacteurs qui étaient étudiés au LRBA.

- D'un tunnel de tir hyperballistique permettant de lancer des maquettes à des vitesses de plus de 5 000 m/s. Cette installation consiste en un canon à double étage dans lequel la combustion de la poudre permet de comprimer un gaz léger (hélium ou hydrogène) dont la détente propulse des maquettes à des vitesses hors de portée des canons à poudre. Depuis le premier tir le 31 mai 1960, propulsant une maquette de 0,4 g à 1 300 m/s, l'installation fut améliorée constamment jusqu'à obtenir des vitesses de plus de 5 000 m/s sur des maquettes de 300 grammes. Dans le tunnel de visualisation, la série de photographies prises permet de restituer la trajectoire, le sillage et les caractéristiques aérodynamiques ; compte tenu des vitesses, le dispositif exige une précision de chronologie tout à fait exceptionnelle.

Après 1 600 tirs effectués, nécessitant des mesures particulières de sécurité en raison de l'utilisation d'hydrogène, le tunnel hyperballistique fut arrêté en décembre 1999. Son activité principale avait été la détermination des caractéristiques aérodynamiques des corps de rentrée des missiles stratégiques.

- D'une soufflerie hypersonique C2 à chocs réfléchis, travaillant à Mach 16. Cette soufflerie transférée de Sud-Aviation, fonctionna à Vernon de 1974 à 1992. Elle permit d'étudier également les caractéristiques des têtes opérationnelles de la Force de dissuasion, les configurations des cortèges de leurres. En 1987-88, à la demande des Avions Marcel Dassault, une vingtaine de tirs à Mach 16 fut effectuée pour tester l'aérodynamique du projet de navette spatiale Hermès (figure 8) alors en cours d'étude par le CNES.

- Le LRBA a disposé en outre de diverses autres souffleries à rafale plus petites, utilisées pour des essais spéciaux comme la séparation d'étages de fusée, les flux thermiques, etc., ainsi que d'un tunnel de tir classique.

Bien que le LRBA n'ait eu ni l'ensemble du spectre de compétences ni les moyens de l'ONERA, il a mené des études et conduit des essais en mécanique de vol, en mécanique des fluides dans les domaines subsonique, transsonique, supersonique

²² L'inauguration eut lieu le 6 avril 1951.

et hypersonique qui étaient nécessaires pour les missiles stratégiques et tactiques ; il a valorisé ses compétences dans d'autres domaines de l'industrie aérospatiale nationale. Outre son rôle d'expertise technique, le LRBA a ainsi offert des moyens puissants, parfois uniques, à de nombreux industriels qui ont apprécié la rapidité de réaction des équipes du LRBA et l'ouverture d'esprit pour le travail en commun dans l'interprétation des résultats.

Encore une fois, le LRBA a été le creuset où les meilleurs experts français en aérodynamique ont été formés et ont mené les premières étapes de leur vie professionnelle avant de la développer à l'ONERA ; on peut citer notamment les ingénieurs généraux Pierre Carrière, André Auriol, Claude Capelier, Gérard Dorey, Roger Marguet.

9 - VERS DE NOUVEAUX HORIZONS

Avec l'année 1996 commence un nouveau parcours pour le LRBA. Une fois encore le ministre de la Défense, puis le délégué général pour l'Armement visitent le LRBA. Une nouvelle organisation de la DGA se met en place avec une double conséquence : d'une part, 200 personnes de la Direction de la gestion et de l'organisation (DGO) doivent rejoindre le site de Vernon et, d'autre part, le LRBA entre dans la nouvelle Direction des centres d'expertise et d'essais (DCE). Il s'agissait d'un des volets de l'adaptation de la Défense, et de la DGA en particulier, aux nouvelles conditions de l'équilibre des forces et des besoins de défense dans le monde.

Si le LRBA commémorait, la même année, le cinquantième anniversaire de sa création, continuait d'apporter son expertise technique²³ à l'ensemble de la DGA et célébrait en novembre 2005 avec la SNECMA, désormais « maison-mère » de la SEP, et l'AAAF (Association aéronautique et astronautique de France), le quarantième anniversaire du premier lancement de Diamant qui plaçait en orbite le satellite Astérix, une évolution douloureuse était néanmoins en cours.

Après l'arrêt de la soufflerie hypersonique à chocs, la soufflerie supersonique C4 cesse ses activités en 1998 et est démantelée. Enfin, l'arrêt du tunnel de tir hyperballistique en 1999 marque la fin des essais aérodynamiques au LRBA.

En 2001, la gestion du domaine forestier est transférée à l'Office national des forêts.

Si, en 2002, le LRBA dégage un projet d'Etablissement cohérent pour son activité future, en dépit d'une mobilisation des personnalités locales et nationales (visite du président et de membres de la Commission de défense en 2004), la fermeture du LRBA est annoncée en 2008 et programmée pour la fin de 2012 avec le transfert de certaines de ses activités au CELAr.

²³ Notamment les rédactions des spécifications techniques des fonctions de préparation de mission pour les Armements air-sol modulaires (AASM) et le missile de croisière Scalp, les essais et les simulations pour le viseur stellaire d'Hélios 2A et de l'ATV/ISS (*Automated Transfer Vehicle / International Space Station*).

ANNEXE : LES DIRECTEURS DU LRBA²⁴

1946-1947 : Paul Libessart
1947-1949 : Georges Dupuis ;
1949-1953 : Jean Sorlet ;
1953-1962 : Pierre Girardin ;
1962-1971 : Jacques Marchal ;
1971-1980 : Damien Bagaria ;
1980-1985 : François Simon ;
1985-1989 : Bernard Laurent ;
1990-1994 : Jacques Darricau ;
1994-1997 : Lyonel Gouédard.

BIBLIOGRAPHIE

Jacques Marchal, « Le Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques de Vernon », *Centres de recherche (période 1945-1975)*, Comité pour l'histoire de l'armement terrestre (ComHArT), Tome 3, Volume 3.2, 1996, CEDOCAR 50150-0699.

Christian Vanpouille, *Le LRBA d'hier à aujourd'hui ou 60 ans de modernité*, ministère de la Défense, 2006.

« La Direction technique des engins », *Bulletin d'information et de liaison : l'Armement*, avril 1979.

Albert Ducrocq, *20 ans de révolutions : Société européenne de propulsion*, Société européenne de propulsion, Paris, 1989.

Olivier Huwart, *Du V2 à Véronique, la naissance des fusées françaises*, Marines éditions, décembre 2004.

Jean-Marc Weber (coordinateur), *Un demi-siècle d'aéronautique en France – Etudes et recherches*, COMAERO, Les Cahiers du CHEAr, 2008.

« La recherche au LRBA », RSTD n°39, 1998-1.

²⁴ Après la période étudiée, il faut ajouter :
1997-2001 : Pierre Gaudon,
2001-2004 : Didier Queffélec,
2004-2008 : Philippe Juliot,
2008-2010 : Christian de Villemagne.

REMERCIEMENTS

Nous remercions M. Christian Vanpouille, ingénieur au LRBA, qui a assuré depuis les années 80 l'organisation des relations publiques de l'établissement, notamment celles du 60^e anniversaire de sa création, la mise en forme et la publication de la brochure *Le LRBA d'hier à aujourd'hui ou 60 ans de modernité*. Il a également constitué un « musée » rassemblant les pièces originales représentatives des activités de l'établissement depuis son origine.



Fig. 1
Vue aérienne du LRBA

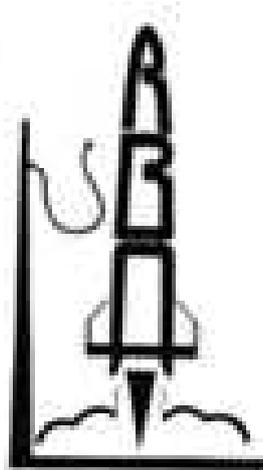


Fig. 2
Logo du LRBA



Fig. 3
Engin PARCA



Fig. 4
VERONIQUE



Fig. 5
Diamant

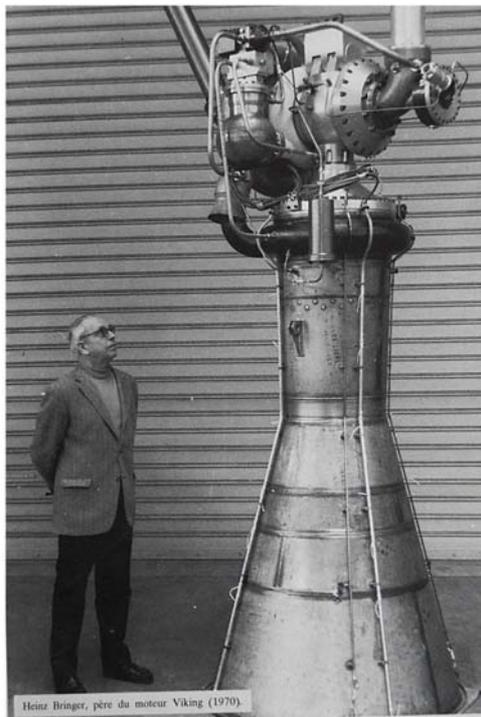


Fig. 6
Moteur Viking

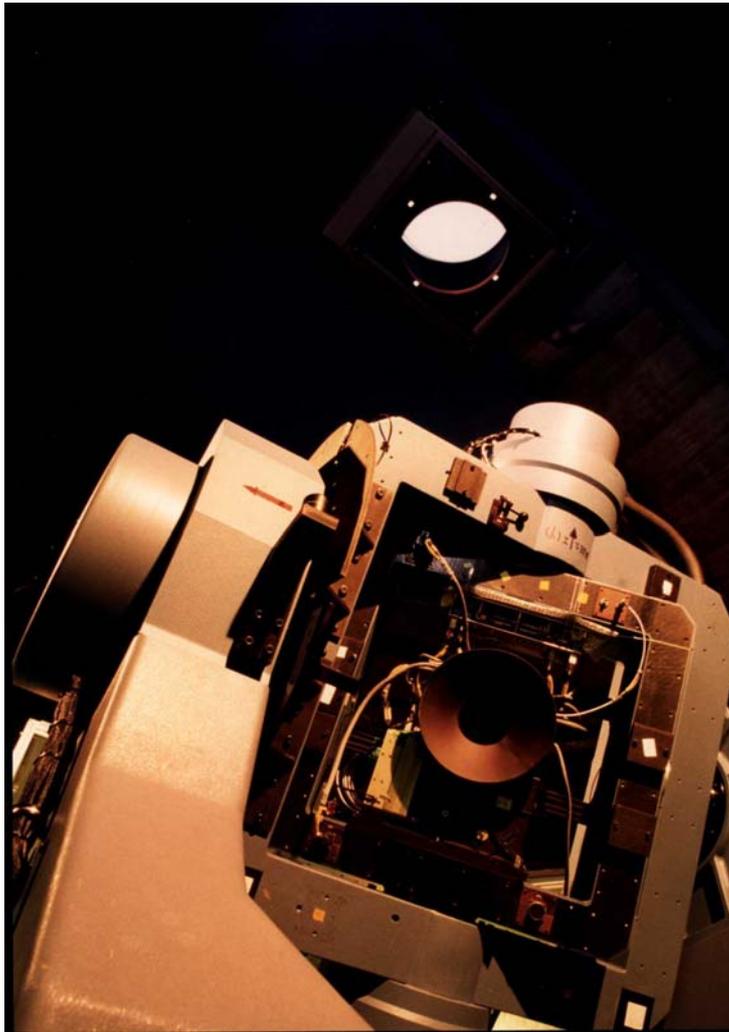


Fig. 7
Viseur stellaire

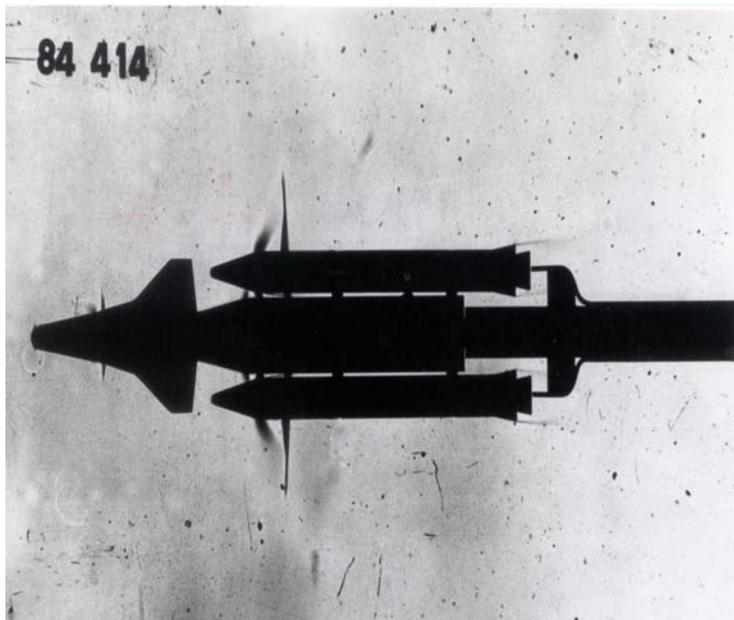


Fig. 8
Hermès (1984)

COMAERO

CHAPITRE 11

Le CEG (Centre d'études de Gramat)¹

Le Centre d'études de Gramat est situé dans les Causses du Haut Quercy, à proximité d'un gouffre dit « de Bèdes » (figures 1 et 2), dont Napoléon aurait prédit le rôle militaire. Il fallut attendre 1947 pour que ceci se réalise au sein du Centre d'études de Gramat.

1 - LE CEG DE 1947 A 1980²

1.1 - La création du CEG (1947)

La décision d'achat de l'emprise de Gramat (250 hectares autour du gouffre de Bèdes) fut prise en 1947 par la DEFA (Direction des études et fabrications d'armement), en même temps que celle de la création du CIEES (Centre interarmées d'essais d'engins spéciaux)³ à Colomb-Béchar. Il s'agissait d'y implanter des bancs d'essais, au point fixe, de propulseurs de grande puissance qu'il paraissait impensable d'installer sur le plateau de Vernon où avait été créé, en 1946, le LRBA (Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques).

L'ICA Paul Chanson avait trouvé le terrain de Gramat, dont la DEFA envisageait de se défaire, pour y installer un centre d'étude sur les explosifs. Ce terrain était, et est resté, sous l'administration de la Manufacture d'armes de Tulle (MAT).

La première vocation du CEG fut donc celle des essais au point fixe de gros engins. Elle conduisit à aménager un raccordement ferroviaire à la ligne SNCF Brive-Toulouse ainsi qu'à entailler la paroi ouest du gouffre de Bèdes pour y accueillir en position verticale les engins à essayer. Un grand hangar fut édifié à proximité. Enfin, la sécurité des essais de gros propulseurs exigeait la disponibilité d'eau en abondance. Il fallut donc créer une station de pompage de l'eau d'une rivière souterraine qui passait sous deux autres gouffres de l'emprise. Cette station de pompage, plusieurs fois renforcée, a alimenté le CEG et la ville de Gramat jusqu'en 2007.

Cette première vocation du CEG fut abandonnée en 1953, en raison de l'installation au LRBA (Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques)⁴, à Vernon, de spécialistes allemands des fusées, en provenance de Peenemünde.

1.2 - La deuxième naissance du CEG (1955)

La deuxième naissance du CEG fut due aux besoins atomiques en détonique.

¹ Par Jean Crosnier et Lucien Vayssié.

² Ce texte reprend l'essentiel de celui rédigé par les IGA Jean Crosnier et Pierre Fayolle, dans le cadre du ComHArT (Comité pour l'histoire de l'armement terrestre), tome 3, volume 3.2 (1996).

³ Voir le chapitre 5 de ce document.

⁴ Voir le chapitre 10 de ce document.

Dès 1951, l'ingénieur général Salmon, auquel succède l'ingénieur général Hervet en tant que directeur de la DEFA, crée la Section atomique qu'il place sous le commandement de l'ingénieur en chef des télécommunications d'armement Paul Chanson. Celui-ci, aidé de son adjoint, Paul Bonnet, met en évidence la nécessité de recourir à l'explosif chimique classique pour permettre le développement de la réaction nucléaire. La mise au point des armes atomiques exigeait une précision de fonctionnement et des moyens d'expérimentation qui étaient alors hors de portée des établissements chargés des explosifs utilisés dans les armes classiques. Une technique assez empirique devait être élevée au rang d'une véritable science, la « détonique ». Seules, les recherches sur les charges creuses, à peu près contemporaines, s'en rapprochaient au plan conceptuel ainsi que pour les performances exigées des appareils de visualisation et de métrologie nécessaires.

Ces nouvelles attitudes de pensée, ces nouvelles méthodes d'investigation, ces nouveaux moyens d'expérimentation formaient autant d'exigences qui, se combinant avec la nécessité d'un secret absolu et d'un total respect de l'environnement, militaient en faveur d'un établissement situé dans un endroit retiré et qui soit entièrement consacré à cette nouvelle vocation.

L'ingénieur militaire principal Jean-Marie Buscailhon, qui venait d'être affecté à la Section atomique, effectue une mission à Gramat en août 1955. Il est alors chargé, par Paul Chanson, d'étudier les possibilités de l'emprise du CEG pour se prêter à des détonations puissantes avec le minimum de nuisances extérieures. Parallèlement, il se documente sur les moyens d'investigation expérimentale capables de la très haute résolution temporelle. Il lance l'acquisition de caméras à cellules de Kerr construites par les équipes du Professeur Schardin au Laboratoire de recherches de Saint-Louis et de caméras ultra-rapides pourvues de miroirs tournant à plusieurs milliers de tours par seconde.

A Limeil, dans les nouveaux locaux de la Section atomique, Jean-Marie Buscailhon lance la réalisation de moyens radiographiques à impulsions brèves de très haute tension (jusqu'à 1 million de volts) nécessaires à la visualisation interne au cours de la détonation.

A Gramat, le 1^{er} juin 1956, il procède aux premiers tirs d'explosif en divers points de l'emprise, sans créer de nuisances notables dans les localités voisines. L'emprise du CEG est ainsi qualifiée et l'on peut procéder à l'aménagement de bureaux et de laboratoires, et construire deux casemates pour abriter appareillages et expérimentateurs.

En octobre 1958 est réunie la première équipe d'encadrement, avec les ingénieurs militaires Jean-Claude Barbance, Maurice Monnet et Jean Crosnier. Jean-Marie Buscailhon venait de l'École centrale de pyrotechnie (ECP) de Bourges, où il avait été envoyé pour se former à l'utilisation d'explosifs. Jean-Claude Barbance, suivant le même cursus, avait mis en place à l'ECP des moyens totalement nouveaux, en provenance du laboratoire de recherches de Saint-Louis : caméras à cellule de Kerr ayant un temps de pose d'une nanoseconde et générateur de radio-éclair avec un temps de pose utile de même durée. Nommé à Gramat en juillet 1958, Jean-Claude Barbance apporte sa compétence dans la mise en œuvre de ces moyens nouveaux. Maurice Monnet et Jean Crosnier sont mutés à Limeil à leur sortie de l'ENSAR (Ecole nationale supérieure des armements terrestres) et sont affectés à l'équipe de Jean-Marie Buscailhon à Gramat, en octobre 1958.

Le 31 décembre 1959, le Centre de Gramat, jusqu'alors Annexe de la Section atomique de Limeil, est créé en tant qu'Etablissement proprement dit et il est rattaché à la Manufacture d'armes de Tulle (MAT), au plan administratif.

De 1959 à 1961, des projectiles d'un kilogramme sont lancés avec succès par des canons à explosif ultracourts et consommables.

1.3 - La Convention CEA-DEFA : 7 ans de collaboration (1962-1969)

Le 3 octobre 1962, est signée une convention entre le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et la DEFA, qui sera reconduite annuellement jusqu'en 1969. Une collaboration s'instaure, animée par un Bureau scientifique commun (BSC) présidé par la Direction des applications militaires (DAM) du CEA.

Présidé par l'ICA Jean Berger, alors chef du Département des études théoriques au Centre d'études de Vaujourn (DAM), puis par l'ICA Alain Vidart, le BSC définit le partage des tâches entre le CEG et les différentes entités de la DAM. Le CEG, avec les ingénieurs militaires Maurice Monnet, puis Jacques Leygonie, assure le secrétariat du BSC. De nouvelles filières « détonique » sont étudiées, en vue, notamment, de la projection à des vitesses égales ou supérieures à 4 000 m/s.

Parallèlement à ces recherches à long terme, la DAM confie au CEG des travaux à plus court terme :

- évaluation quantitative des perturbations engendrées par les dispositifs de mesure au sein des explosifs lors de leur expérimentation ;
- réalisation de têtes de mesure de technologie très élaborée et d'un chronomètre électronique à plus de 250 voies, avec une résolution de 6,25 nanosecondes ;
- étude des fonctionnements anormaux des explosifs de base, en vue d'obtenir des armes auto-sûres par conception.

Ces études appliquées sont soutenues par des travaux plus fondamentaux à caractère scientifique ou technique :

- test de sécurité des explosifs (test de Popolato) sous hauteur de chute de 60 mètres ;
- projection à très grande vitesse (12 000 à 15 000 m/s), grâce à l'utilisation d'ondes de Mach dans les explosifs ;
- détermination de l'adiabatique dynamique de nombreux corps jusqu'à quelques millions de bars ;
- mise en évidence de la fusion du plomb par choc ;
- investigations sur l'écaillage des métaux sous onde de choc.

De nombreux travaux tournés vers la mesure sont aussi menés :

- conformateurs d'ondes explosives de formes variées ;
- effet thermoélectrique en choc, études effectuées avec l'ENSMA (Ecole nationale supérieure de mécanique et aérothermique) de Poitiers ;
- spectroscopie résolue en temps ;
- perfectionnement de la radiographie instantanée et son extension aux charges génératrices d'éclats.

La simulation numérique de la propagation des ondes de choc et des écoulements hautement dynamiques et transitoires est entreprise, tout en étant limitée par la

capacité relativement modeste des équipements informatiques du CEG, à cette époque.

Cette période, 1962-1969, de la collaboration avec la DAM, est riche et féconde, elle prédispose bien le CEG à la diversification qu'il va devoir assurer à partir de 1970.

La convention CEA/DTAT n'est pas reconduite, à partir du 1^{er} janvier 1970, pour des raisons liées au développement des centres d'expérimentations de la DAM.

Le financement DAM, qui était de 65 % du budget du CEG, devient minoritaire, sous la forme de contrats ponctuels, rapidement orientés vers des études de « durcissement ».

1.4 - Le CEG, de 1970 à 1980

A partir de 1970, l'activité du CEG est réorientée, sous l'égide de la DTAT (Direction technique des armements terrestres) qui désire conserver un établissement situé dans un site irremplaçable pour les études mettant en œuvre des explosifs, avec des personnels ayant acquis une grande compétence dans ce domaine de pointe.

Le souhait de transférer aux charges classiques les connaissances acquises lors des études pour les charges nucléaires est également partagé par la Direction technique des engins (DTE), la Direction des recherches et moyens d'essais (DRME), le Centre de prospective et d'évaluations (CPE), la Mission atome de la DGA et le Service technique des poudres et explosifs (STPE).

Les activités nouvelles dévolues au CEG intéressent :

- la DTAT, pour les techniques de détonique appliquée aux armes classiques antichar, antipersonnel et antiaériennes, et pour les études de pyrotechnie ;
- l'ensemble des directions de la DMA (Délégation ministérielle pour l'armement) : le CEG est désigné par le délégué ministériel pour l'armement comme organisme pilote des études des charges antiaériennes classiques et maître d'œuvre de la simulation des effets des chocs mécaniques puissants des explosions nucléaires dans l'atmosphère et au niveau du sol, ainsi que des études de protection qui s'y rattachent.

A partir de 1975, à la demande de la Mission atome de la DGA, cette défense contre les effets nucléaires est étendue au « durcissement » des matériels à l'impulsion électromagnétique (IEM), notamment pour la protection des forces stratégiques. Dès 1965, le CEG avait entrepris des études de durcissement aux effets mécaniques de l'onde de choc et de souffle d'explosions nucléaires sur les matériels de campagne des Armées et, en 1967, un simulateur de souffle avait été installé dans un tunnel de chemin de fer désaffecté, à Sauclières, dans l'Aveyron (figures 3 et 4).

En 1975, le CEG est rattaché à l'Etablissement technique central de l'armement (ETCA) qui, lui-même, dépend de la Direction des recherches, études et techniques (DRET) à partir du 1^{er} juin 1977. Le 1^{er} septembre 1982, le CEG est érigé en établissement annexe de l'ETCA.

2 - LE CEG DE 1980 A 2000⁵

2.1 - Les années 80 : la majorité

Ces années 1980 seront qualifiées, à juste titre, pour le CEG comme celles de « la majorité ». Après la mise en service de grands simulateurs comme le Simulateur de souffle à grand gabarit (SSGG) ou des premiers simulateurs pour impulsions électromagnétiques, on assiste à la mise en place d'une structure opérationnelle qui reflète pleinement les activités de Centre.

Les années 1980 voient se confirmer les missions concernant la détonique et l'impulsion électromagnétique. Le CEG est nommé Centre de recherches détonique de la DGA, le 31 mars 1981, et Centre technique IEM, le 30 mars 1982. A ce titre, le CEG est chargé de coordonner, sous l'égide de la Mission atome, les actions menées au sein de la DGA en matière d'IEM et de délivrer le « label durcissement ».

Cette confirmation de ces missions essentielles pour la DGA conduit le CEG à mener, de pair, simulation numérique et expérimentation.

La brièveté des phénomènes explosifs, qu'ils soient d'origine chimique ou d'origine nucléaire, conduit à réaliser des appareillages de radiographie éclair à très haute tension et très court temps de pose, des jauges de contrainte pouvant mesurer plusieurs mégabars en quelques centaines de nanosecondes, et des analyseurs numériques des signaux correspondants.

Pour l'étude des effets de choc, de souffle et de rayonnement thermique, le CEG dispose de tubes à choc, de diamètres échelonnés de 0,30 m à 2,40 m (figure 5), et du tunnel SNCF désaffecté de Sauclières de 800 mètres de longueur.

En outre, le CEG réalise un Simulateur de souffle à grand gabarit (SSGG), long de 105 m, large de 12 m et haut de 7,10 m, capable de tester les matériels en service dans les armées (véhicules terrestres, hélicoptères, structures navales, ogives balistiques) à des effets d'explosions nucléaires de 10 à plusieurs centaines de kT.

La réalisation de ce Simulateur de souffle à grand gabarit (figure 6) bénéficie de l'expérience acquise au cours des dix années d'essais au tunnel de Sauclières, dans lequel la détonation était produite par l'explosion de quelques centaines de kilogrammes d'explosif ou, plus tard, par la combustion rapide de propergols solides. Ces essais avaient montré la nécessité d'essayer les matériels en vraie grandeur, dans les expositions les plus pénalisantes.

Grâce à la génération du souffle par sept générateurs à air comprimé et à la réalisation d'un compensateur aérodynamique de bouche, on peut se contenter d'une veine de 105 mètres de longueur, soit huit fois moins longue que pour le tunnel de Sauclières. La génération du souffle est beaucoup plus facile à mettre en œuvre et, en deux ans, on peut faire au SSGG plus de 100 tirs, soit autant qu'à Sauclières en 10 ans. Le SSGG a été le premier simulateur de son espèce dans le monde occidental, le seul autre étant en URSS.

Les travaux du durcissement à l'IEM concernent les avions de combat, les stations de télécommunications et des éléments des forces stratégiques. Le CEG réalise quatre simulateurs fixes implantés à Gramat (figure 7) et un simulateur mobile transportable pour les essais sur place d'installations à durcir contre l'IEM.

⁵ Par Lucien Vayssié.

Enfin, le durcissement aux effets du rayonnement initial des explosions thermonucléaires est étudié, à la fois par la simulation numérique et par l'expérimentation. Celle-ci est effectuée grâce à deux générateurs impulsionsnels d'électrons, convertibles en générateurs de rayons X : Pulserad et Gédéon.

Les activités du CEG couvrent un domaine scientifique considérable, souvent aux limites des connaissances disponibles. La simulation numérique et l'expérimentation doivent être menées de pair, avec des moyens très puissants et très précis, pour les armements classiques comme pour les armes thermonucléaires.

Le savoir-faire et l'équipement d'expérimentation du CEG en ont fait un établissement unique en Europe occidentale, capable de dialoguer avec les physiciens et les ingénieurs des plus grands laboratoires américains, tels que ceux de Livermore et de Los Alamos.

2.2 - Une reconnaissance de performance officialisée

Le CEG est, en 1982, un établissement annexe de l'Etablissement technique central de l'armement. En 1984, l'effectif du CEG s'élève à 320 personnes, dont 15 ingénieurs militaires et officiers, 55 ingénieurs civils, 58 techniciens civils, assistés de 13 scientifiques du contingent et de 4 thésards.

L'organisation est bâtie autour de deux départements techniques :

- le département Armes et Vulnérabilité qui centralise les problèmes de détonique et balistique terminale au sens large ;
- le département des Etudes de Durcissement qui traite des effets mécaniques, électromagnétiques et radiatifs des explosions nucléaires.

C'est ainsi que les ingénieurs et techniciens du Centre traitent de la détonique nucléaire, première vocation du Centre, et de la détonique conventionnelle appliquée principalement aux problèmes de blindage et de perforation. Le CEG justifie ainsi pleinement sa nomination, en 1981, comme Centre technique de la DGA pour la détonique, la dynamique des matériaux, la vulnérabilité, notamment aux charges antiaériennes et la physique des explosifs. En outre, sa spécialisation dans la mesure des effets du souffle nucléaire, ainsi que dans les analyses électromagnétiques lui vaut d'être nommé en 1982 Centre technique de la DGA dans ce domaine.

Enfin l'étude des effets des rayons X après une explosion nucléaire conduit à le nommer, en 1986, Centre technique de la DGA pour le rayonnement initial.

Au cours de cette décennie des années 80, la simulation commence à prendre un essor significatif. Elle ne supprime pas les irremplaçables essais dans le cadre d'un certain équilibre entre expérimentation réelle et représentation virtuelle. Les tirs jouent pleinement leur rôle dans le but essentiel de vérifier la justesse des calculs numériques effectués au préalable.

Cette décennie 1981-1990 verra passer à Gramat deux nouveaux directeurs : en 1981, Jean-Marc Peyrard succède à Jean Crosnier et, en 1985, arrive Pierre Gaudillière qui reste en poste jusqu'à la fin 1990.

C'est à Jean Deveaux que reviendra le rôle de débiter la décennie 1991-2000 comme directeur du CEG. Jean Fropier lui succède au début de l'année 1995 et c'est Michel Joubert qui prend les rênes de l'établissement en 1998.

2.3 - Des équipements expérimentaux et informatiques toujours plus performants

Pendant ces deux décennies, de 1980 à 2000, le CEG se dote d'équipements exceptionnels tant en moyens expérimentaux que numériques, dans une démarche de durcissement équilibré des systèmes stratégiques que lui permet sa large panoplie de moyens. Il intéresse à la fois les domaines terrestres, aériens et maritimes. Avant le début des années 2000, le budget du Centre franchit la barre des 300 millions de francs. Il compte plus de 300 employés, sur un territoire d'un peu plus de 300 hectares, voué à la recherche.

Le CEG joue pleinement son rôle de prévision des menaces pesant sur la Défense nationale afin de toujours accroître son efficacité. Il est un lieu privilégié pour à la fois reproduire en laboratoire ces bouleversements structuraux qui modifient les caractéristiques de la matière et bâtir un modèle de comportement qui va servir à la simulation numérique. Ainsi le Centre cherche à détecter et mesurer les effets mécaniques et thermiques des explosions nucléaires. Il travaille aussi sur les effets des rayonnements, la dynamique des matériaux, la détonique appliquée, la physique des explosifs, les ondes électromagnétiques ou la défense anti-aérienne élargie.

La simulation numérique est de plus en plus utilisée. Elle permet notamment d'observer « au ralenti » les changements intervenus dans la matière à la suite d'une explosion, classique ou nucléaire. Le CEG est le spécialiste de la description de ce qui se passe dans l'instant le plus proche après une explosion, qualifiée par « la connaissance absolue du $T_0 + \epsilon$ ».

Il faut saisir le visible et capter l'invisible, comprendre avec un temps d'avance. C'est la *trilogie* « *recherche-calcul-expérimentation* ». Le CEG met en place des moyens exceptionnels. Une presse dynamique, des lanceurs à gaz ou à poudre, à simple ou double étage capables de propulser des projectiles à plusieurs milliers de m/seconde, font leur apparition sur le site (figure 8).

Les simulateurs d'impulsion électromagnétique deviennent des sites phares du CEG tant pour la polarisation horizontale (DPH) que verticale (SSR). C'est le début des travaux sur les Hautes Puissances Pulsées. On voit donc apparaître le projet SYRINX avec le site Magix.

2.4 - Une nouvelle menace électromagnétique : les micro-ondes

Les études sur les micro-ondes de forte puissance, considérées comme une nouvelle menace électromagnétique, font leur apparition à Gramat et sont l'occasion de créer le site Hyperion (figure 9).

Ce rayonnement, présenté comme un nouveau système d'arme crédible, se compare à l'impulsion électromagnétique d'origine nucléaire. La compétence théorique et expérimentale du CEG lui permet d'examiner tous les aspects de cette nouvelle menace. Ce sont autant de moyens d'irradiation qui font du CEG un pôle de recherche performant.

2.5 - La place de plus en plus importante des numériciens

La puissance de calcul numérique atteint au CEG des sommets, avec la mise en place successive de plusieurs ordinateurs, les plus puissants de la DGA. L'ICA Jean-Claude Barbance joua un grand rôle pour doter le CEG de ces importants moyens de calcul. Les ingénieurs du Centre profitent de ces évolutions informatiques pour développer des logiciels de plus en plus élaborés (figure 10), comme le logiciel Ouranos.

La détonique classique n'est pas en reste dans ces évolutions techniques. La connaissance de l'action des jets de charge creuse, des charges génératrices de noyau, du mécanisme de perforation des blindages font de rapides progrès. Cela, notamment, avec des moyens de mesures exceptionnels comme l'interférométrie doppler-laser ou la cinématographie ultra-rapide.

Le lanceur Perséphone et le Pôle perforation blindage (PPB) remplacent avantageusement plusieurs sites détonique anciens.

2.6 - Un passage obligé pour les bonnes décisions

Autant de moyens qui, conjointement, permettent de définir de nouveaux concepts, d'aider à faire les bons choix, de comprendre pour appliquer et de passer de la fiction à la science. La qualité des travaux effectués au CEG, grâce à la polyvalence et la compétence de ses équipes, lui vaut d'obtenir à la veille de l'année 2000 la certification ISO 9001 qui garantit un fonctionnement rigoureux du Centre, ainsi qu'une grande fiabilité de ses productions.

Le CEG est bien là pour conseiller, apporter des solutions, et jouer son rôle d'expert étatique incontournable. Avec imagination et rigueur il doit penser l'avenir, en le gardant « en ligne de mire ».

NOTA :

Le Centre d'études de Gramat est devenu, le 1^{er} janvier 2010, un établissement du CEA/DAM. Son directeur actuel (avril 2013), Jacques Authesserre, confirme que le CEG est, grâce aux choix faits par le passé qui sont décrits dans ce document et aux décisions ultérieures, une référence mondialement reconnue dans ses domaines d'activités.

BIBLIOGRAPHIE

Plaquette CEG : *Le Centre d'études de Gramat 1968-1970.*

Plaquette CEG : *Le Centre d'études de Gramat 1975.*

Plaquette CEG : *Le Centre d'études de Gramat 1981.*

La Direction des Recherches, Etudes et Techniques (DRET), 1980.

Bulletin de l'Armement n° 26, 1973.

« Le Centre d'études de Gramat 1960-2000, quarante ans d'histoire au service de la Défense nationale ».

Documents audiovisuels : « L'instant d'après », Présentation 90-93-98 MFP (micro-ondes).

Photographies : Ciel-Bleu, CEG.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les IGA Jean Carpentier et Jean-Claude Barbance pour l'aide apportée dans l'élaboration de ce chapitre.

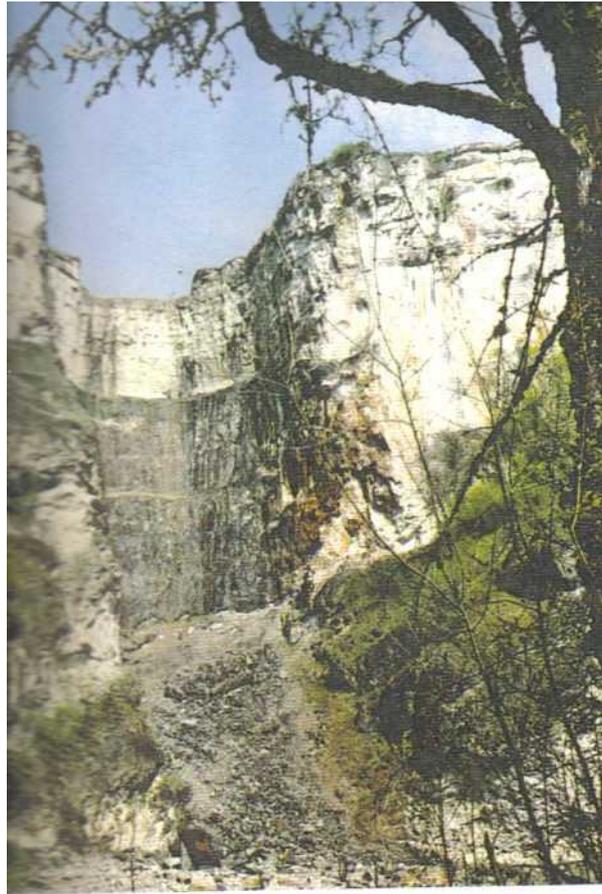


Fig. 1
Paroi du gouffre de Bèdes



Fig. 2
Site d'essais, vu du créneau du gouffre

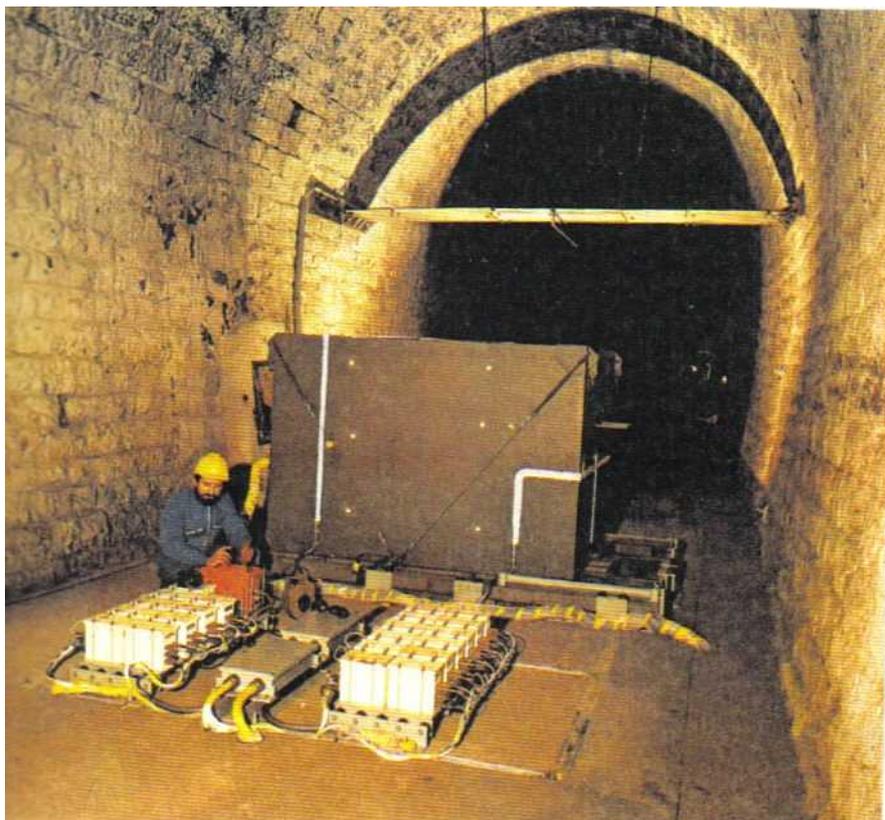


Fig. 3
Préparatifs de test d'équipements de télécommunications
dans le tunnel de Sauclières



Fig. 4
Mise au point d'un appareillage de mesures accélérométriques et vélocimétriques sur
un engin blindé léger, avant son départ pour le tunnel de Sauclières



Fig. 5
Tube à choc de 300 mm, à veine élargie



Fig. 6
Simulateur de souffle à grand gabarit (SSGG)



Fig. 7
Simulateur d'effets électromagnétiques



Fig. 8
Le lanceur Perséphone



Fig. 9
Le site Hyperion

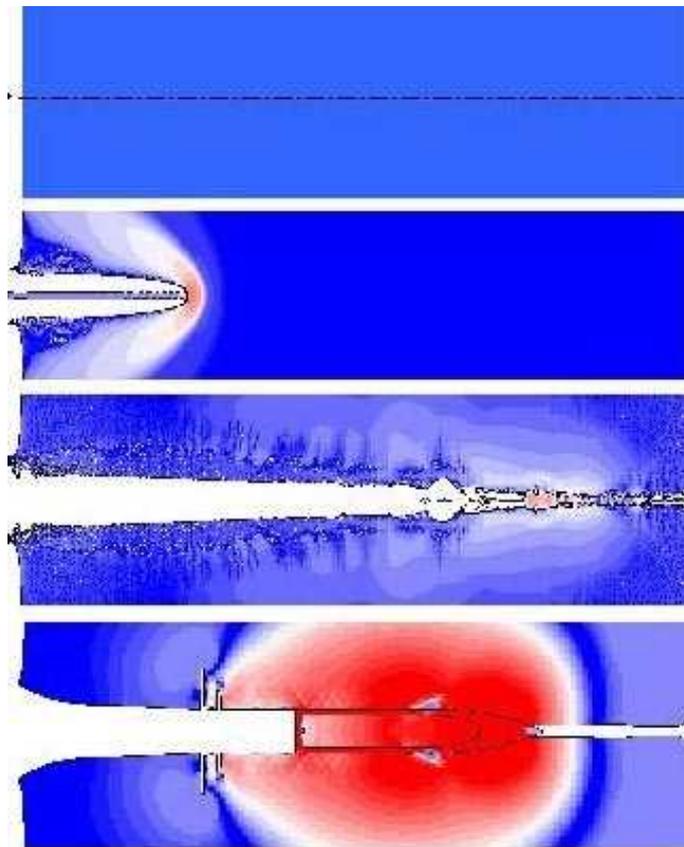


Fig. 10
La simulation numérique prend une importance croissante

CHAPITRE 12

Le CELAr (Centre d'électronique de l'armement)¹

INTRODUCTION

La Délégation ministérielle pour l'armement (DMA), créée en avril 1961, regroupe les anciennes directions techniques rattachées aux états-majors. L'importance croissante de l'électronique et de l'informatique dans les systèmes et matériels des armées amène très rapidement à se poser la question du regroupement des équipes dans ce domaine, pour favoriser les échanges et supprimer les duplications de certains moyens d'essais.

Dès 1961, des rapports signalent en effet ces duplications, car chaque direction technique de la Délégation possède ou crée ses propres équipes de direction de projets ou de programmes, ses bureaux d'études, ses laboratoires et ses centres d'essais. Il est préconisé de créer une grande direction technique de l'électronique, mais face aux réticences des directions techniques de milieux, lors de la réorganisation de la DMA en 1965, on se contente de créer un service, le Service central des télécommunications et de l'informatique (SCTI), rattaché pour son soutien administratif à la Direction technique des armements terrestres (DTAT). Ceci montre que quatre ans après, les réticences et les oppositions à la création de la DMA étaient encore très fortes.

Trois centres doivent être rattachés à ce Service : le Centre d'électronique de l'armement (CELAr), le Centre de calcul scientifique de l'armement (CCSA) et le CERTI (Centre d'études et de recherches en télécommunications et informatique). Les deux premiers seront effectivement créés et mis en service respectivement en septembre 1968 et en septembre 1966, mais le troisième ne verra jamais le jour.

1 - LE SCTI

Les décrets n° 65-704 et 65-707 du 16 août 1965, parus au Journal officiel du 24 août 1965 (pages 7508 et 7509), créent le SCTI et font disparaître le Département télécommunications et mesures électromagnétiques créé en avril 1961. Le SCTI est chargé des études et des essais des matériels électroniques indissociables des armements auxquels ils sont destinés.

Son premier chef est l'ingénieur général des télécommunications de 1^{ère} classe Marie Lacoste ; il sera remplacé par l'ingénieur général des télécommunications de 2^e classe Lucien Gobin le 3 février 1966, puis, le 1^{er} juillet 1969, par l'ingénieur général de 2^e classe de l'armement Jacques Alberge.

Le SCTI sera remplacé par la Direction technique de l'électronique et de l'informatique en 1983, qui deviendra la Direction de l'électronique et de l'informatique (DEI), créée par le décret n° 84-375 du 26 avril 1984 paru au Journal officiel du 19 mai 1984 (page 1455). Son premier directeur est l'ingénieur général de l'armement de 1^{ère} classe Jacques Alberge, pour trois mois avant son départ en deuxième section, auquel succède l'ingénieur général de l'armement de 1^{ère} classe Gilbert Margier, le 28 juillet 1984. Après viendront, le 29 juillet 1986, l'ingénieur

¹ Par Jean-Paul Gillyboeuf.

général de 1^{ère} classe de l'armement Pierre Givaudon, puis, le 16 mai 1990, l'ingénieur général de 1^{ère} classe de l'armement Michel Javelot, un ancien du CELAR.

La DEI est regroupée avec les armements terrestres par les décrets n° 95-18 et 95-19 du 9 janvier 1995, pour devenir la Direction des systèmes terrestres et d'information (DSTI), dont le premier directeur est l'ingénieur général de l'armement hors classe Michel Javelot.

Détaillons un peu l'historique.

2 - LA CREATION DU CELAR

Dans le cadre de la politique d'aménagement du territoire, le Conseil interministériel présidé par Georges Pompidou décide, le 21 octobre 1961, de favoriser le développement économique de la Bretagne en y implantant des activités électroniques. Le 24 mars 1964, ce même conseil, toujours présidé par Georges Pompidou et auquel participent, entre autres, le ministre des Armées, Pierre Messmer et le délégué ministériel à l'aménagement du territoire, Olivier Guichard, décide donc de créer, près de Rennes, un centre d'électronique regroupant l'ensemble des services de télécommunications.

À la suite de quoi, la DMA, par la décision rétroactive n° 25491 DMA/DEV/B2 du 10 décembre 1964, charge l'ingénieur militaire en chef de 1^{ère} classe des télécommunications Émile Rombout de diriger les opérations de création du Centre d'électronique de l'armement à compter du 1^{er} juillet 1964. Le choix de cet ingénieur ne surprend pas. Une note de la DMA du 22 juin 1964 précise qu'il est tout à fait qualifié pour cela car, étant « *un des principaux artisans de la création de l'industrie française du radar, cet ingénieur, qui a à son actif de nombreuses réussites techniques et industrielles, est particulièrement bien doué pour mener cette opération avec tout le dynamisme souhaité* ».

La création du CELAR s'est faite contre l'avis non seulement des directions techniques mais plus précisément de leurs services électroniques et notamment du Service technique des télécommunications de l'Air, le STTA. Cette opposition du STTA est devenue encore plus forte quand l'ingénieur général Jacques Alberge, comprenant que la création du CELAR n'était raisonnable que si on y transférait les laboratoires correspondants de Paris, a demandé et obtenu le transfert à Bruz des laboratoires du STTA installés à Palaiseau. Il devra contrer l'opposition du directeur du STTA et des personnels de Palaiseau ainsi que de leur patron, l'ingénieur en chef de l'air Henri Frossard, dernier ingénieur de l'air en fonction qui avait manifesté son indépendance d'esprit en refusant son intégration dans le corps de l'armement, ce qui n'a d'ailleurs pas empêché sa promotion au grade d'ICA. Henri Frossard refusera de se voir muter à Bruz ; il sera muté d'office et répliquera en demandant un congé sans solde de six mois qui ne lui sera pas refusé. Ceci se traduira par la nomination pour un temps de l'IGA Jacques Alberge comme directeur du STTA, au départ de l'IGA Francis Pénin, tout en restant chef du SCTI, préfigurant l'embryon d'une direction de l'électronique qui verra le jour plus tard.

2.1 - Les missions du début

Une de ses premières tâches, est de préciser et de faire admettre les missions du nouvel établissement. Cela donnera lieu à de nombreuses discussions et remises en cause et à deux rapports d'inspecteurs de l'armement. Ces missions évolueront aussi par la suite, mais dans la première version il est indiqué qu'il paraît possible de

créer un groupe de laboratoires, un groupe d'expérimentations, un atelier de prototypes et un atelier de réparations.

Le groupe de laboratoires doit mener des études dans les domaines de la guerre électronique, des composants, des applications spatiales (pour les satellites militaires de détection, de navigation et de télécommunication) et des matériels électroniques pour les commandos et les services de renseignement.

Le groupe d'expérimentations doit mener des essais d'évaluation et des essais en vraie grandeur des prototypes électroniques développés par l'industrie.

L'atelier de prototypes est chargé de l'industrialisation des maquettes issues des laboratoires et de la réalisation de très courtes séries.

L'atelier de réparations doit effectuer certaines remises en état du niveau du 5^e échelon. Cet atelier ne sera jamais mis en service.

2.2 - L'implantation

L'implantation dans la région rennaise suscite des réactions. C'est ainsi que dans la note de la DMA du 22 juin 1964, on peut noter que : « *Le choix de Rennes, peu attractif sur le plan psychologique et où tout reste à faire en matière d'électronique, constitue au départ un handicap très sérieux.* » Il est rajouté que : « *L'opération Rennes constitue un facteur de dispersion générateur de difficultés psychologiques supplémentaires et se révèle en cela particulièrement inopportune.* » Il est suggéré de réaliser « *une décentralisation vers le midi, plus facile sur le plan des personnels, ou dans la zone en croissant allant des Pyrénées aux Alpes* ».

Pour les relations avec ses interlocuteurs, cette note formule le souhait que le Centre dispose de « *liaisons faciles et rapides non seulement sur Paris mais avec les autres centres de l'Armement tels que ceux de Toulouse, pour les questions aérospatiales, et de Toulon, pour l'électronique navale. L'électrification de la ligne de chemin de fer Paris-Rennes facilitera les liaisons avec Paris. Il restera cependant la nécessité de doter le Centre d'un avion d'affaires* ». La ligne Rennes-Paris sera totalement électrifiée en 1966, mais le Centre ne sera jamais doté d'un avion d'affaires.

Dans le cahier des charges, le terrain nécessaire est évalué à une surface de 15 à 30 hectares et il doit être situé à 15 km de Rennes au maximum. En raison des activités du futur établissement, ce terrain doit avoir une vue dégagée, être éloigné des sources de perturbations d'origine radioélectrique et, en outre, doit avoir des zones plantées en arbres pour être attractif.

La municipalité rennaise proposera un terrain proche de la future université Rennes 1 à Beaulieu mais, du fait de la proximité d'une antenne hertzienne des PTT et du côté peu attractif du lieu, ce projet ne sera pas retenu.

Finalement dès juillet 1964, Émile Rombout décide de choisir un terrain de 108 hectares situé sur la commune de Bruz au sud de Rennes. Ce terrain pittoresque, bordé par la voie communale n° 17 à l'est et par la Vilaine encaissée à l'ouest, présente l'avantage d'avoir des points hauts donnant des vues à longue distance vers le nord et vers l'ouest. C'est un terrain sans aucune habitation, composé essentiellement de landes et de bosquets, et de parcelles de champs de faible valeur agricole. Sa situation, son environnement et sa taille permettent d'envisager d'y prévoir un héliport, de réaliser des essais sur le terrain, et il est suffisamment vaste pour réserver des possibilités d'expansion. De plus sa proximité avec Rennes laisse la possibilité aux membres du personnel de s'établir dans cette

ville pour y loger et bénéficier des établissements d'enseignement jusqu'au niveau supérieur, d'un environnement culturel et de commerces de toutes sortes.

2.3 - Le personnel, son accueil et son logement

Dès le départ il est prévu de recruter, ou d'affecter en deux temps, une première partie de 200 personnes de 1967 à 1968, puis une seconde de 300, de 1969 à 1970. La répartition souhaitée est la suivante : 10 cadres de direction, 80 ingénieurs d'exécution, 80 techniciens supérieurs, 120 techniciens et 210 ouvriers professionnels, employés administratifs et manœuvres. Il s'agit, d'une part, du personnel transféré des services électroniques de la région parisienne ou d'autres établissements de la DMA et, d'autre part, du personnel qui doit être nouvellement embauché.

Une note n° 11486 DMA/DEL du 28 mai 1964 souligne la difficulté de réaliser ces embauches : « *Les traitements et salaires pratiqués par l'État ne permettront pas d'attirer à Rennes des personnes qui n'en sont pas originaires. [...] Il faudra donc compléter les rémunérations par des incitations efficaces telles que des logements de qualité suffisante à un prix raisonnable ou des primes et indemnités compensatrices.* » L'environnement rennais comprend un IUT et l'INSA qui pourront servir de vivier. Dans la même note, on se projette dans le futur : « *Dans un avenir plus lointain, le Centre pourrait contribuer à la formation des jeunes électroniciens de l'Armement ; les ingénieurs y feraient leurs premières armes sur le tas, les ressources de main d'œuvre bretonne permettraient de recruter puis de former des techniciens de valeur. Dans cette perspective, un système de formation technique et de promotion sociale devrait être constitué, dont le premier maillon, une école d'apprentissage, doit être mis en place au plus tôt.* »

L'école d'apprentissage ne sera jamais mise en place, par contre la formation « sur le tas » des jeunes ingénieurs et techniciens sortant d'école sera et restera une réalité.

Enfin en 1964, il est estimé que les embauches massives réalisées par Citroën pour son usine de Chartres-de-Bretagne, ouverte en 1961, peuvent limiter les embauches en personnel non spécialisé. Cette inquiétude disparaîtra après l'ouverture du Centre.

En matière de logements, il est prévu de mettre à disposition 6 villas de standing, 40 appartements de standing élevé, 50 appartements de standing moyen, 100 appartements HLM améliorés dans l'ensemble de l'agglomération rennaise. Par ailleurs, il est prévu de réaliser des équipements sportifs à l'intérieur de l'établissement.

La ville de Rennes propose des logements disponibles bien avant l'ouverture du Centre, ce qui ne convient pas. Finalement le CELAR met à disposition du personnel des appartements dans la ZUP de Villejean et dans la ZUP Sud. En complément, en application d'un rapport n° 89/CELAR/ICCM/DR du 31 décembre 1966, il fait construire, en 1971, 30 pavillons au lieu-dit « La Forestière » sur un terrain de sport désaffecté de l'Arsenal de Rennes : « *Ce programme est très important car la qualité de sa réalisation sera certainement un élément d'attrait pour les cadres supérieurs nécessaires au CELAR.* »

Deux villas pour le directeur et son adjoint, ainsi que quatre plus modestes pour les agents assurant la sécurité, seront finalement construites sur le terrain du CELAR, en périphérie.

2.4 - Le chantier des bâtiments

La note n° 1349 DMA du 24 septembre 1965, signée du délégué ministériel pour l'armement, fixe l'échéancier des travaux, qui doivent débiter en septembre 1966, et fixe le démarrage du Centre à la mi-1968.

Le terrain étant choisi, le 2 décembre 1965 le préfet d'Ille-et-Vilaine prend un arrêté dans lequel il précise que : « *Les fonctionnaires et les agents du ministère des Armées sont autorisés à effectuer toutes opérations topographiques nécessaires à l'étude du projet d'implantation du Centre d'électronique de l'armement et à pénétrer à cet effet dans les propriétés privées, closes ou non closes (à l'exclusion des maisons d'habitation), situées sur le territoire de la commune de Bruz et dont les parcelles sont désignées sur la liste des propriétaires, annexée au présent arrêté [...] qui sera, par les soins du maire de la commune de Bruz, affichée en mairie et en tout autre lieu jugé utile [...].* » Cet arrêté est adressé aux 22 propriétaires des 98 parcelles couvrant 107,9 hectares (parcelles de terre de landes, de prairies pour le bétail, d'étangs, de cultures de l'avoine en particulier et d'anciennes carrières désaffectées). Parmi ces 22 propriétaires, deux sont particulièrement concernés car ils possèdent, à eux deux, 77 hectares.

En janvier 1966, l'affaire est classée d'extrême urgence par le ministre des Armées. L'étude d'architecture est confiée à Louis Arretche. Il s'agit d'un très grand architecte, urbaniste des villes de Rouen, Rennes, Orléans et Cachan. A cette date on lui doit, en particulier, la reconstruction de Saint-Malo et de Coutances, l'usine marémotrice de la Rance, le centre de tri postal de la gare Montparnasse, l'aménagement de la ZUP de Villejean à Rennes. Plus tard il réalisera le campus de Beaulieu et de Villejean à Rennes, le plan de la mise en valeur du quartier du Marais à Paris, la faculté de droit et des sciences politiques de Nantes, l'église Sainte Jeanne d'Arc sur la place du vieux marché à Rouen, le centre des télécommunications de Rennes, les bâtiments Sully et Turgot du ministère des finances à Bercy, le dessin du pont Charles de Gaulle à Paris. Trois autres architectes lui sont associés ; ils doivent présenter leur projet sous huit mois.

Un décret du premier ministre paru en septembre 1966 autorise « *la prise de possession d'extrême urgence de terrains situés à Bruz en vue de l'exécution immédiate des travaux intéressant la défense nationale* ». Ce décret est aussitôt affiché à la porte de la mairie de Bruz et sur un panneau de la place de Bruz. Chaque propriétaire est invité à l'état contradictoire des lieux pour estimation des parcelles, ce qui est réalisé le 19 septembre.

Les travaux de terrassement débutent dès la fin du mois d'octobre et le lundi 21 novembre 1966, le ministre des Armées, Pierre Messmer (figure 1), vient à Bruz pour marquer l'ouverture du chantier et se faire présenter les plans et la maquette du futur Centre par Émile Rombout.

Les constructions débutent au printemps 1967. A l'ouverture mi-1968, les bâtiments du poste d'entrée, du centre administratif et du centre technique avec sa tour à neuf niveaux, doivent être disponibles. Viendront ensuite le restaurant, l'héliport, les parkings. Symboliquement, le 2 septembre 1968, une quarantaine de personnes rejoignent le site et s'installent dans une baraque de chantier : le CELAR est ouvert.

2.5 - Les premières équipes et le démarrage de l'activité

L'équipe de direction comprend Émile Rombout, le colonel André Lapierre et Jean Ségalen.

Le service technique est dirigé par l'ingénieur en chef Jean Ségalen. Il comprend quatre départements : ES (Évaluation et systèmes de simulation), dirigé par l'ingénieur en chef Michel Javelot ; EM (Évaluation de matériels), dirigé par Gabriel Coz ; IC (Informatique et calcul), dirigé par Yves Le Baron puis par l'ingénieur en chef Henri Lazennec ; et ME (Mesures et essais), dirigé par Marius Thorat.

Les difficultés que rencontre le Centre, créé contre la volonté des directeurs centraux de la DMA, conduisent le chef du SCTI à en faire évoluer les missions. La mission du Centre se limite aux essais des matériels électroniques de l'armement depuis la conception jusqu'à la réalisation en série. Trois types d'essais sont ainsi répertoriés : essais en laboratoire, essais en milieu simulé et essais en milieu réel (selon les moyens disponibles sur place). Les directions ne seront toujours pas favorables, les bâtiments suscitent aussi des réactions hostiles, mais le Centre est ouvert et il est un symbole de la politique d'aménagement du territoire.

En août 1969, le Contrôle général des armées diligente une enquête. Il constate que :

- les effectifs ne représentent que 25% de ceux promis à la DATAR (Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale) qui a largement financé le Centre ;
- il y a un déséquilibre important entre les réalisations faites au CELAr et les effectifs en place ;
- les investissements importants réalisés entraînent des frais de fonctionnement de plus en plus considérables, alors qu'il semble difficile de remplir un plan de charge en rapport.

Le contrôleur conclut : «...*La construction du CELAr n'était pas indispensable et il eût été plus économique, toute industrialisation de la Bretagne mise à part, de continuer à investir dans des établissements similaires. [...] Quoiqu'il en soit, le CELAr est maintenant réalisé sur le plan matériel. La question posée est d'utiliser au mieux les investissements faits. [...].* » Et il propose de : « [...] *trouver une autre affectation aux bâtiments du CELAr et entreprendre dès maintenant une étude des possibilités de transfert à Bruz de l'École supérieure de l'électronique de l'armée de Terre ou d'une autre unité.* »

3 - CREATION DU CCSA

En 1965 il est décidé de créer un grand centre informatique pour fournir de la puissance de calcul à la communauté de défense. L'ingénieur en chef du génie maritime de 1^{ère} classe Henri Boucher (figure 2) est chargé de l'opération. Le Centre de calcul scientifique de l'armement (CCSA) ouvre son service en 1966. Il est installé dans les locaux du Laboratoire central de l'armement (LCA) au fort de Montrouge, situé à Arcueil.

Il est équipé d'un double processeur Univac 1108, un des ordinateurs les plus puissants de l'époque, auquel sont reliés des terminaux situés dans divers établissements parisiens et en province. Les « clients » peuvent soumettre leurs travaux à travers des terminaux « en *batch* » ou des consoles « en *time-sharing* ».

Le Centre comprend un service système, un service de soutien à la clientèle et un service chargé de développer une bibliothèque de logiciels mathématiques. Il met en œuvre une comptabilité prenant en compte tous les frais de fonctionnement et l'amortissement des investissements, pour facturer ses prestations à chaque client, en tenant compte des priorités demandées pour chaque travail qu'ils soumettent. L'équipe système développe des modifications au système d'exploitation d'Univac pour gérer les priorités, comptabiliser les prestations et tenir compte des demandes spécifiques des utilisateurs.

Sous l'impulsion d'Henri Boucher, reconnu comme un des meilleurs spécialistes de l'informatique (il donne des cours à Sup'Aéro, puis ensuite à l'ENSTA), le réseau des clients se développe, les applications aussi. Afin de soulager les ordinateurs centraux dédiés essentiellement au calcul, il est décidé de mettre en place un calculateur frontal Univac 418 pour gérer le réseau. L'équipe système est chargée de développer le logiciel du système d'exploitation pour la liaison entre le frontal et le central et pour la gestion du réseau, sous la direction de Paulette Dreyfus. Cette architecture servira de prototype pour la suite.

Le centre s'équipe d'une des premières consoles graphiques développée par Univac pour les applications de conception assistée par ordinateur. La bibliothèque de logiciels mathématiques s'enrichit avec les travaux internes du service mais aussi avec l'apport extérieur.

L'équipe de soutien aux utilisateurs répond à leurs demandes par téléphone et suscite la création d'une association des utilisateurs. Celle-ci se réunit tous les mois pour un échange entre les clients et le CCSA. Afin de normaliser ces échanges et pour se donner le temps nécessaire à l'analyse de toutes les requêtes, l'ingénieur de l'armement Jean-Paul Gillyboeuf fait formaliser les demandes par écrit comme cela se pratique dans l'association des utilisateurs de matériels Univac, à laquelle il participe pour représenter le CCSA et dont il deviendra le président pour la section française jusqu'en 1978. Le réseau du CCSA s'étend sur toute la France et ne se limite pas aux établissements du ministère ; il s'ouvre aussi aux industriels de l'armement.

4 - LES ANNEES 1970

4.1 - Recentrage des missions

Le SCTI soutient le développement du CELAR pour tenir, entre autres, les engagements pris vis-à-vis de la DATAR, mais aussi parce qu'il estime que c'est une « *marque de confiance en l'avenir de l'électronique* ». Il souhaite en faire un établissement d'une taille économiquement viable. Pour cela, il ne veut pas limiter son domaine d'intervention à un rassemblement d'activités mineures et disparates. Il s'agit de le placer dans un plan porteur d'avenir au service des différents services de programme et cohérent avec la politique industrielle dans ce domaine de l'électronique et de l'informatique.

Suivant les propositions du SCTI, le délégué ministériel recentre les missions du CELAR et décide :

- d'accroître les moyens de simulation pour l'évaluation des systèmes, en évitant les duplications avec d'autres moyens existants ;
- de poursuivre et de réorganiser l'activité dans le domaine de l'informatique avec le transfert des moyens centraux du CCSA ;

- de lui confier une mission d'expertise et de conseil en matière de guerre électronique ;
- de confirmer la mission d'essais des matériels d'électronique au profit de l'ensemble des services techniques de la DMA.

4.2 - Activités transférées depuis la région parisienne

En 1970, le délégué décide de rattacher au CELAr les laboratoires d'essais de la SEFT (Section d'études et de fabrication des télécommunications) à Issy-les-Moulineaux, ainsi que ceux du STTA (Service technique des télécommunications de l'Air), rue de la Convention et à Palaiseau. Le transfert des moyens de ces laboratoires et du personnel s'étalera jusqu'en 1976. Une antenne parisienne de deux personnes subsistera jusqu'en 1990.

En 1971 et 1972, le ministre de la défense décide les transferts au CELAr des moyens de calcul et de stockage centraux du CCSA, du Bureau interarmées de codification des matériels (BICM), qui deviendra le CIMD (Centre d'identification des matériels de défense) et du Centre informatique de la gendarmerie.

Pour réaliser ces transferts, de nouveaux bâtiments sont nécessaires. La conception de ceux du futur CCSA est confiée à l'architecte qui a déjà réalisé les premiers bâtiments, Louis Arretche.

Le suivi de l'ensemble de l'opération de transfert du CCSA est confié à l'IPA Jean-Paul Gillyboeuf. Il se rend à Bruz pour localiser le nouveau Centre sur le terrain du CELAr. La proximité du radar STRADIVARIUS (Station radar automatique et diversifiée, apte à la recherche de l'identification universelle des satellites) (figure 3) et son impact sur le fonctionnement du centre de calcul, amèneront à revoir le dessin du bâtiment comprenant la salle de calcul, initialement prévue toute vitrée. Il s'avérera nécessaire de réaliser une cage de Faraday pour protéger les ordinateurs vis-à-vis des rayonnements du radar, cage qui, en outre, évitera le rayonnement vers l'extérieur des ordinateurs et permettra de traiter dans des sessions spécialisées des programmes et données très classifiés.

Le chantier des bâtiments débute en 1973 et Jean-Paul Gillyboeuf participe à toutes les réunions de chantier sur le site. Il suit par ailleurs le dossier technique avec le fournisseur Univac. Cette opération consiste à relier un centre de gestion du réseau qui reste à Arcueil dans les locaux initiaux du CCSA, au centre de calcul proprement dit, situé à Bruz, par l'intermédiaire d'une liaison par faisceau hertzien numérique à 2 mégabits, ce qui est une première mondiale pour l'époque. Enfin, il s'occupe de l'accueil et du recrutement du personnel destiné à s'installer en Bretagne.

La STBFT (Section technique des bâtiments et fortifications de l'armée de Terre) est chargée du pilotage de la construction des bâtiments pour le compte du ministère. Les marchés passés avec les entreprises du bâtiment comprennent des pénalités très fortes en cas de non-tenu des délais. En effet le marché passé avec Univac pour la fourniture des ordinateurs Univac 1110, fixe la date de livraison en octobre 1974, ce qui implique la disponibilité de la salle de calcul à cette date. Elle sera effectivement respectée. Le premier détachement de personnel arrivera sur le site du CELAr à partir du mois de juin 1974.

La mise au point des logiciels d'exploitation pour la liaison entre les deux centres s'avérera délicate, mais elle fonctionnera avant la fin de l'année. L'opération de transfert des fichiers de données et des programmes d'application des utilisateurs se

déroulera sur plusieurs mois en faisant un biseau avec le centre d'Arcueil. Le CCSA sera pleinement opérationnel sur ses deux sites en 1975.

Le transfert du BICM nécessitera plusieurs confirmations de la décision du ministre et sera effectif en 1983. Ses applications informatiques étant réalisées depuis le début des années 1970 sur les moyens du CCSA, il se dotera par la suite de ses propres moyens et deviendra le CIMD rattaché à l'état-major des Armées.

Le Centre informatique de la gendarmerie ne viendra jamais à Bruz.

Enfin, en 1975, l'état-major des Armées décide d'implanter à Bruz le Centre de gestion automatisée des fréquences et de la compatibilité électromagnétique (CGAFCEM), dont les applications informatiques sont portées par les moyens du CCSA. Ce centre est chargé de gérer les fréquences militaires et d'attribuer les fréquences aux différents réseaux et liaisons d'infrastructures des armées. Dans le cadre des réorganisations postérieures, il reviendra à Maisons-Laffitte en 2004.

En fin 1976, l'ICA Jean-Paul Gillyboeuf propose au chef du SCTI, l'IGA Jacques Alberge, d'étudier la faisabilité de la mise en réseau des différents centres de calcul scientifiques existants au sein du ministère, pour tenir compte de l'évolution de l'informatique et offrir à l'ensemble des utilisateurs une palette plus complète de services et de prestations. Quittant le CCSA en 1978, il ne pourra pas mener à bien cette étude.

4.3 - Les réalisations nouvelles

Dans les années 1960, en pleine guerre froide, apparaît la nécessité de lancer la réalisation d'un démonstrateur radar capable de détecter et d'identifier les satellites (à défaut des missiles balistiques intercontinentaux). Le projet est appelé STRADIVARIUS, déjà cité. Il est confié aux sociétés CSF (Compagnie générale de télégraphie sans fil), Thomson (qui fusionneront pour devenir Thomson-CSF en 1968), Sintra et IBM associées. Il s'agit d'un radar à balayage électronique chargé de détecter et de déterminer les trajectoires des satellites, puis de les identifier par comparaison avec les éphémérides fournies par la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Du côté étatique ce projet est piloté par l'IPA Jacques Darricau, spécialiste du radar au STTA. Unique en Europe de l'Ouest, ce radar est à la pointe de la technique du moment. Initialement prévu à Brétigny-sur-Orge, il sera monté sur une plate-forme au CELAR en 1970 et démonté en 1976. Cette affaire sera suivie par Pierre Gaudon et Jean-Louis Coatanhay, à Bruz. L'installation est complétée par un pylône de 85 m (hauteur limite pour ne pas être vu du site classé du Boël), destiné à recevoir un émetteur pour l'évaluation de l'antenne. Celle-ci mesure 25 m de large sur 15 m de haut ; le plateau sur lequel elle est montée tourne sur 360° pour le prépositionnement en azimut, le pointage fin étant effectué par balayage électronique.

Une fois démonté, le plateau tournant sera conservé pour servir de base de mesures qui portera le nom de STRADI (figure 4). Ce démonstrateur aura un successeur, le radar GRAVES (Grand radar adapté à la veille spatiale). Son émetteur est situé en Haute-Saône et son récepteur sur le plateau d'Albion. Opérationnel depuis 2005, il est l'un des rares systèmes de veille satellitaire existant au monde.

Une autre installation voit le jour dans les années 1970 ; il s'agit de la chambre anéchoïque (figure 5), moyen unique en Europe à l'époque du fait de ses dimensions de 25 m de long sur 12 m de large et 12 m de haut. Ce moyen, sous la responsabilité de Philippe Gadenne, sert à évaluer la SER (Surface équivalente radar) de matériels

tels que ceux qui intéressent la FNS (Force nucléaire stratégique), comme les têtes nucléaires ou les leurres. Il sert aussi à évaluer les fusées de proximité, comme celles du missile Roland.

Enfin un autre moyen va être réalisé et utilisé : le simulateur de combat aérien (figure 6). Lors d'une visite de la base de Langley aux États-Unis, par un groupe d'officiers de l'armée de l'Air, ces officiers découvrent un simulateur de combat aérien et sont enthousiasmés. À la suite de quoi, l'armée de l'Air manifeste son intérêt pour disposer d'un moyen similaire. Elle rencontre peu d'intérêt de la part des services techniques de la DTCA (Direction technique des constructions aéronautiques) et de la part des industriels du milieu aéronautique. L'ICA Michel Javelot propose alors de réaliser cet outil au CELAr. Son équipe se lance dans cette aventure avec un budget très restreint. Elle fait appel à un constructeur de coques de bateaux en plastique pour réaliser les deux sphères servant d'écran, dans lesquelles elle installe deux cockpits de vieux SMB2. Elle conçoit le dispositif de projection animée de la cible dans chacune des deux sphères ainsi que tout le logiciel qui permet de faire fonctionner ce simulateur. Celui-ci deviendra une des installations les plus visitées du fait, en particulier, de son côté un peu ludique.

Au début de l'année 1978, l'ICA Jean-Paul Gillyboeuf remplace l'ICA Jean-Claude Guiguet à la tête du département ES, tout en restant pendant sept mois chef du CCSA en attendant l'arrivée de l'ICA Louis Barlet pour lui succéder dans ce dernier poste en juillet 1978. Il présente au directeur, l'IGA Émile Rombout, un plan d'investissement immobilier et technique pour accueillir les simulateurs d'étude destinés à l'hélicoptère HAP/HAC (qui deviendra le Tigre) et au char Leclerc (figure 7), pour la modernisation du simulateur de combat aérien utile aux études destinées au Mirage 2000 et au futur Rafale, et pour la chaîne de simulation de la chaîne image relative au satellite SAMRO qui préfigurera le satellite Helios. Ce plan, rapidement approuvé par le directeur, sera mis en œuvre avec la construction d'un ensemble de bâtiments dont un centre de calcul spécifique pour l'animation des simulateurs. Ces bâtiments sont localisés près du CCSA pour bénéficier du bâtiment énergie et climatisation. Dès 1979, sous la direction de Pascal Leray (figure 8) et Yves Fouché, le simulateur de combat aérien sera doté de deux machines de synthèse d'images en temps réel réalisées par une petite société de six personnes, INFOREL (cette équipe sera reprise ultérieurement par Sogitec). Il s'agit d'une grande première en Europe, les travaux financés par le STTA auprès de Thomson-LMT depuis plusieurs années n'ayant pas encore abouti. Les responsables de cette activité chez General Electric aux États-Unis, venus sur le site, seront extrêmement surpris par cette réalisation, la taille réduite des machines (cube de 50cm de côté) et leur coût très faible (300 000 F) [1].

4.4 - L'évolution de l'organisation du Centre

Le Centre s'organise autour de trois grands domaines d'activités : l'informatique, l'évaluation de systèmes par simulation et les essais de matériels.

Le domaine informatique comprend la production de calculs, qui est confiée au CCSA, et la mission d'étude, de conseil et d'assistance en informatique de service, confiée au département IC (Informatique et calcul).

Le CCSA est organisé en quatre services : deux à Bruz et deux à Arcueil. À Bruz se trouve le service exploitation, qui fait fonctionner le centre de calcul avec ses équipes d'ingénieurs systèmes et ses opérateurs, et le service mathématiques, qui entretient et développe une bibliothèque d'applications mathématiques mise au

service des utilisateurs. À Arcueil restent le service clients, en interface avec les utilisateurs, et le service réseau, pour le soutien des interfaces et des moyens de connexion.

Le département IC est organisé en laboratoires : calcul numérique, software de base, systèmes informatiques et technique digitale. Ce dernier laboratoire accueillera une activité venue de la SEFT portant sur les essais de composants : essais de quartz, de composants passifs ou discrets actifs, de circuits intégrés et de composants opto-électroniques.

Le département Évaluation de systèmes et simulation (ES) couvre le domaine de la simulation. Il est découpé en quatre laboratoires : études générales, moyens, système n° 1 et système n° 2.

Les essais de matériels se partagent entre plusieurs départements : le département DT (Détection), pour les essais de radars, brouilleurs et composants hyperfréquence ; le département TL (Télécommunications) pour les essais de matériels de radiocommunication, de radionavigation, de faisceaux hertziens, de compatibilité électromagnétique ; et le département ME (Mesures et essais) pour les essais en environnement mécanique et climatique. En 1976, s'y ajoute le département TK (Technologie), pour les essais de composants et la métrologie des appareils de mesure, puis la cellule de guerre électronique.

La création de cette dernière cellule, décidée par le délégué en février 1973, correspond au souci de connaître l'état de l'art dans les pays étrangers, de reconstituer des matériels électroniques étrangers et d'apporter son expertise et son conseil en matière de guerre électronique.

De 1975 à 1980 les activités optroniques démarrent au CELAR. L'équipe responsable de ce domaine est chargée de soutenir les services de programme dans le suivi des études de matériels optroniques de défense. Un laboratoire d'essais de prototypes est créé. Le premier équipement à être ainsi évalué en 1976 est le prototype de caméra TV bas niveau de lumière proposé pour l'Atlantic 2 NG. À la même époque, le CELAR accueille l'une des sept stations européennes de la campagne de mesures OPAQUE pour, dans un cadre OTAN, caractériser les effets optiques de l'atmosphère en Europe.

4.5 - Les effectifs

L'effectif du CELAR passe de 420 personnes en 1970 à 610 en 1980, dont un peu moins de la moitié en personnes de niveau 3 et le reste à égalité entre les personnes de niveau 2 et celles de niveau 1. Parmi le personnel de niveau 1, le CELAR accueillait un bon nombre de scientifiques du contingent (leur effectif ira jusqu'à une cinquantaine). Cet apport permettait de compléter les équipes d'ingénieurs et d'apporter des connaissances nouvelles. Certains ont pu être embauchés par l'établissement à la fin de leur service, d'autres l'ont été par les industriels (c'est ainsi qu'un des plus brillants ayant travaillé sur les algorithmes de l'autodirecteur électromagnétique du MICA (Missile d'interception, de combat et d'autodéfense) et ayant proposé des améliorations dans le cadre des évaluations par simulations numériques sera embauché par Dassault Électronique).

5 - LES ANNEES 1980

Le Décret n° 84-375 du 26 avril 1984 crée la Direction de l'électronique et de l'informatique (DEI).

L'Arrêté du 19 mai 1984 porte sur l'organisation de la DEI, dirigée par : Jacques Alberge jusqu'au 28 juillet 1984, puis Gilbert Margier, ensuite, le 29 juillet 1986, Pierre Givaudon, puis le 16 mai 1990 Michel Javelot.

5.1 - Le départ du fondateur et la nomination de ses successeurs

Le 30 janvier 1980, le directeur et fondateur du centre, l'IGA Émile Rombout est admis en 2^e section. Il choisit de rester à Bruz, sa terre d'adoption, mais profitera très peu de sa nouvelle vie car il décèdera le 8 mai 1981. Resté presque 12 ans à la tête du Centre, il l'a marqué de son empreinte. Un hommage solennel lui sera rendu, son cercueil placé sur un catafalque dans la cour d'honneur du Centre et une fanfare militaire faisant retentir la sonnerie aux morts. Il sera inhumé dans le cimetière de Bruz.

Lui succèdent en 1980, l'IGA Michel de Launet, qui avait remplacé l'IGA Jean Ségalen comme sous-directeur technique en 1975 puis le colonel André Lapierre comme directeur-adjoint, puis l'IGA Henri-Paul Receveur en 1984 et l'IGA Jean Le Gad en 1989.

5.2 - Une nouvelle organisation

L'IGA Michel de Launet met en place une nouvelle organisation en créant quatre divisions au sein de la sous-direction technique. Il s'agit des divisions CCSA, ESSY (Évaluation et simulation de systèmes), ICEV (Informatique, conseil, évaluation) et EMAC (Essais de matériels et de composants).

La division CCSA assure des prestations de calculs scientifiques pour les établissements de la DGA, divers organismes du ministère et certains industriels de l'armement. Son effectif est d'une centaine de personnes réparties entre Bruz (2/3) et Arcueil (1/3).

La division ESSY a pour mission d'évaluer les performances des systèmes d'armes dans leur phase de développement pour aider à leur mise au point. Elle comprend une centaine de personnes. Au départ de l'ICA Jean-Paul Gillyboeuf en 1984, elle sera dirigée par l'ICA Dominique Berthet.

La division ICEV est chargée du conseil informatique aux établissements du ministère de la défense et de l'évaluation de logiciels et de matériels informatiques. Elle est dirigée par l'ICA Dominique Truchetet, auquel succéderont l'ICA Pierre Parayre puis l'ICA Patrick Gerlier.

La division EMAC comprend près de 240 personnes et regroupe toute l'activité d'essais précédemment répartie dans quatre départements. Elle est dirigée successivement par l'ICA Bernard Aimelet, l'ICA Robert Barbotin, puis l'ICA Patrice Latron.

En 1985, le nouveau directeur, l'IGA Henri-Paul Receveur, procède à une nouvelle organisation en regroupant les activités par type de systèmes. C'est ainsi que sont créées les divisions :

- ITES (Informatique, télécommunications, sécurité), chargée de mener les études et essais de systèmes de communication et d'informatique et de développer le même type d'activités dans les domaines de l'informatique et de la sécurité informatique. Se succèdent à sa tête Patrick Gerlier, Roger Lars et Patrick Fermier ;

- ODSA (Observation, détection, systèmes d'armes), qui doit assurer les évaluations des systèmes d'observation, de détection et des systèmes d'armes en ambiance claire ou de guerre électronique, en développant et mettant en œuvre des simulations numériques ou hybrides. Elle est dirigée successivement par Roger Lars, Henry Sauvan, André L'Haridon et Yannick Le Guennic ;

- TECN (Technologie, environnement, composants, normalisation), qui prend en charge les activités d'essais de composants électroniques (discrets, hyperfréquences, optoélectroniques, circuits intégrés) et de normalisation, d'instrumentation et de mesures électroniques.

Est également créé le groupe ASRE (Analyse des signatures et rayonnements électromagnétiques) chargé des mesures de signatures radar et optronique, ainsi que des essais en environnement mécanique et climatique. Pierre Gaudon en est le premier chef, auquel succède ensuite Didier Queffelec.

Quant à la division CCSA, elle est maintenue.

5.3 - L'évolution des activités

Pour s'adapter à la demande, le CCSA s'équipe d'un ordinateur vectoriel CRAY 1 (figure 9) qui vient de chez Météo France. Ce CRAY sera remplacé par un CRAY X-MP plus puissant et, pour les besoins de puissance supérieure, il se connectera au CRAY 2 de l'École polytechnique au travers d'un hypercanal.

Pour faire face aux besoins de mesures, la chambre anéchoïde désignée par l'acronyme CHEOPS (Chambre hyperfréquence pour l'évaluation optimale de signatures), qui ne peut pas accueillir des cibles de grande taille, est complétée par deux moyens :

- le premier utilise le plateau tournant du radar STRADIVARIUS démonté en 1976, pour supporter des véhicules terrestres comme les blindés, et un pylône voisin de 85 m comme porte-antenne de mesures. Ce moyen est baptisé STRADI (Système de translation et rotation pour l'acquisition de données d'imagerie) ;

- le second est destiné à mesurer la signature d'avions d'armes. Il s'agit de la base SOLANGE (Système orientable lourd pour aéronefs et gros engins) (figure 10). Ce moyen comprend une enceinte sous forme d'un cylindre en béton presque complet de 39 m de haut et de 58 m de diamètre, un portique auquel est suspendue la cible à mesurer et une plate-forme portant l'instrumentation de mesures. Placé tout d'abord à l'air libre, il s'avérera nécessaire de couvrir cet ensemble par un toit et de le fermer par deux très grandes portes pour être moins gêné par les intempéries.

En matière de guerre électronique, la division EMAC développe un prototype de banc d'essai pour effectuer les expérimentations sur le radar du Mirage F1 et sur l'autodirecteur de l'Exocet. Il servira à concevoir un nouveau banc, BEDYRA (figure 11), qui sera mis en œuvre par la division ODSA et complété par les bancs MAESTRO (figure 12) et BAGUERA. Ces moyens ont permis de tester, brouiller, valider et qualifier toutes les générations de radars et d'autodirecteurs électromagnétiques.

À cela s'ajouteront le banc SPARTE (figure 13) utilisé tout d'abord pour tester et évaluer les détecteurs d'alerte du Mirage 2000, les bancs SARDA et SARMO puis la base EPIDAURE (figure 14) constituée d'une plate-forme destinée à accueillir le radar en essai et complétée par trois pylônes de 120 m, 100 m et 63 m de hauteur portant les simulateurs de cibles et de brouilleurs.

Enfin on peut ajouter la mise en œuvre des bancs :

- BEDYSSO (Banc d'essai dynamique pour systèmes optroniques) pour l'évaluation des autodirecteurs infrarouges des missiles air-air Magic 1, Magic 2 puis Mica, du missile antichar de 3^e génération à longue portée AC3G-LP et du missile sol-air à très courte portée Mistral ;
- BEDYMI (Banc d'évaluation dynamique des autodirecteurs fonctionnant en bande millimétrique).

Dans le domaine de la simulation numérique, l'ICA Jean-Paul Gillyboeuf rationalise l'approche allant de la modélisation détaillée du fonctionnement d'un système d'armes jusqu'au jeu de guerre « n » passant par des modèles emboîtés de duels entre plusieurs systèmes [2]. Cette approche sera en particulier utilisée pour comparer les différentes solutions proposées pour la défense sol-air à très courte portée. Une équipe de deux ingénieurs du CELAR modéliseront le fonctionnement des différents systèmes à partir des informations normées fournies par les industriels. Les modèles présentés à ces industriels seront respectivement validés par eux. Des scénarios types, définis par un groupe piloté par le CAD (Centre d'analyse de défense), seront ensuite opposés à chacun des projets de systèmes sous forme, tout d'abord, de duel, puis de plusieurs attaquants contre une batterie de systèmes, et enfin dans le cadre plus vaste du champ de bataille, avec le programme CESAR développé par le CELAR. En six mois, se dégagera ainsi sans contestation un projet, celui de Matra, qui aboutira au missile Mistral.

Au début de la décennie, Yves Fouché sera appelé par les représentants des services techniques pour préparer un dossier s'appuyant sur des résultats de simulation afin de soutenir le projet de missile air-air MICA (Missile d'interception, de combat et d'autodéfense) contre les projets AMRAAM et ASRAAM lancés par les Américains et qu'ils voulaient ouvrir à la coopération. Il accompagnera les représentants des services parisiens aux États-Unis et présentera son dossier pour justifier la position de la France, à la suite de quoi le programme MICA sera lancé.

Dans le même temps, Jean-Paul Gillyboeuf définit la méthodologie de « conception assistée par l'utilisateur » qu'il présente avec le colonel Voiney, adjoint militaire du directeur à l'École d'artillerie de Draguignan. Il s'appuie pour cela sur le projet MARIOTTE développé pour l'armée de l'Air pour étudier la pénétration des avions en territoire ennemi et optimiser les contre-mesures. Il s'agit d'un programme interactif sur console graphique initialement destiné à des études techniques. Présenté au colonel Christian Auzepy pour validation et amélioration, celui-ci le fera évoluer vers un moyen qui sera progressivement intégré avec son aide dans le système de commandement de la FATAC. Conscient de la difficulté à exprimer le besoin pour les systèmes de commandement en particulier, Jean-Paul Gillyboeuf mettra deux ingénieurs à la disposition de l'amiral Bovis en charge de l'informatique de l'EMA pour l'aider à définir précisément les besoins en matière de système de commandement. Cette méthodologie sera reprise indirectement dans les laboratoires technico-opérationnels parisiens pour aider à la conception des systèmes de commandement.

L'armée de l'Air, qui a soutenu fortement le développement du simulateur de combat aérien, convaincue de l'intérêt de cet outil, dégagera le financement pour réaliser un simulateur d'entraînement à Mont-de-Marsan. Le CELAR servira d'expert technique auprès du STTA pour ce projet et fournira, *in fine*, tous les plans et tous les logiciels de son propre simulateur à l'industriel choisi par le service technique. Ce choix s'est porté sur Thomson, contre l'avis des experts du CELAR qui estimaient meilleure la proposition concurrente de Sogitec. Il est intéressant de mentionner que seule aujourd'hui la société Sogitec, rachetée depuis par Dassault, continue à

développer en France des machines de synthèses d'images en temps réel pour simulateurs.

Les activités spatiales militaires se développent. Le gouvernement ayant décidé le lancement de trois satellites de télécommunications TELECOM 1-A, 1-B et 1-C, le ministère décide de prendre une part dans ce projet pour avoir une charge utile spécifique. Il s'agit du programme SYRACUSE-1. Le CELAR intervient dans toutes les étapes du programme et dans tous les maillons de la chaîne de transmission, avec l'aide à la rédaction des spécifications, la déclaration des fréquences auprès des instances internationales, jusqu'à l'aide aux opérationnels.

Pour l'observation spatiale, le CELAR intervient depuis 1978 dans le projet SAMRO et développe un programme de simulation LOCOMOTIVE avec l'équipe dirigée par Michel Busson. Ce moyen permettra d'évaluer toute la chaîne image et servira à démontrer tout l'intérêt d'un tel satellite. Cela débouchera sur les spécifications des caractéristiques de cette chaîne pour le satellite HELIOS dont le programme sera décidé en 1986 et auquel se joindront l'Italie et l'Espagne. En 1989 cette équipe apportera son soutien à la direction de programme pour spécifier et valider les choix faits pour les centres de réception des images HELIOS qui seront installés à Creil, Madrid et Rome.

Dans le domaine de la Sécurité des systèmes d'information (SSI), le CCSA avait pris des mesures pour protéger les informations traitées sur ses moyens (cage de Faraday, traitements hors connexion avec l'extérieur, etc.). Dès la fin des années 1970, ses mathématiciens, Yves Correc et Philippe Villoing, se sont intéressés aux premières publications américaines sur le chiffrement à clé publique. Jean-Paul Gillyboeuf les a mis en contact avec « Le » mathématicien de la division ESSY, René Guillou, et leur a demandé de poursuivre les investigations sur le chiffrement. Ce sera le début des activités de SSI au CELAR. Celles-ci vont se développer dans le cadre de la nouvelle organisation interne et en tenant compte de la création, en 1986, du Service central de la sécurité des systèmes d'information (SCSSI) rattaché au Premier ministre. Il en résultera une nette séparation entre le domaine commercial, sous la responsabilité du ministère des télécommunications, et le secteur gouvernemental, pris en charge par le ministère de la défense. Le CELAR se trouvera ainsi chargé d'évaluer des produits de chiffrement gouvernementaux et d'évaluer la protection des matériels vis-à-vis du rayonnement et des signaux compromettants (mesures dites Tempest).

En 1986, la brigade de gendarmerie de l'armement de Bruz s'installe dans des nouveaux bâtiments sur le terrain du CELAR.

Le CELAR recevra la visite du ministre de la défense, Charles Hernu (figure 15), en octobre 1982, et celle du directeur de cabinet du ministre Jean-Pierre Chevènement, Louis Gallois (figure 16), en septembre 1988.

Enfin, en 1989, deux ingénieurs du CELAR, Gaston Levannier et Jean-Luc Levionnois, reçoivent le prix Chanson des mains du DGA, Yves Sillard.

6 - LES ANNEES 1990

Les décrets n° 95-18 et 95-19 du 9 janvier 1995 créent, en particulier, la Direction des systèmes terrestres et d'information (DSTI) qui fusionne la DEI et la DAT (Direction des armements terrestres), et à laquelle est rattaché le CELAR. Son directeur en est l'IGA Michel Javelot. En 1997, une nouvelle réorganisation de la

DGA crée la Direction des centres d'expertise et d'essais (DCE). Michel Javelot en sera le premier directeur, jusqu'à ce qu'il parte en deuxième section en début 1998. Il ne profitera malheureusement pas longtemps de sa nouvelle position car il décédera le 21 avril 1998. En son hommage, le CELAr donnera son nom à l'auditorium au cours d'une cérémonie qui se déroulera en présence de sa famille et du délégué général pour l'armement, Jean-Yves Helmer, le 15 octobre 1998.

Lui succéderont à la tête de la DCE, Jean-Marie Pimboeuf puis Daniel Reydellet.

6.1 - Les directeurs

L'IGA Jean Le Gad est remplacé par l'IGA Michel Kervella en 1994, auquel succède l'IGA François Fayard en 1997.

6.2 - La fin du CCSA et de la simulation pilotée

L'évolution de l'informatique, avec le développement de la puissance de calcul et la baisse des prix des machines, conduit les divers établissements à s'équiper en propre. C'est pourquoi le CCSA ferme ses portes en 1991. Son bâtiment, sa salle de calcul en cage de Faraday sont réutilisées pour les activités de SSI. Les équipes sont reclassées dans les activités techniques du CELAr.

L'activité utilisant les simulateurs pilotés s'arrête progressivement du fait de la réorientation des missions du CELAr :

- en 1991 pour le simulateur de combat aérien, après la réalisation du simulateur d'entraînement à Mont de Marsan ;
- en 1996 pour le simulateur de tourelle du char Leclerc, dont certains développements seront repris par l'ETAS d'Angers ;
- en 1997 pour le simulateur d'hélicoptère, les logiciels modélisant la conduite de tir du Tigre étant transférés au CEV (Centre d'essais en vol) d'Istres sur son simulateur.

6.3 - Conséquences des réorganisations de la DGA sur le rattachement, les missions et l'organisation du Centre

La rationalisation des moyens d'expertise et d'essais confiée à la DCE, la disparition progressive des scientifiques du contingent suite à la professionnalisation des armées, l'importance croissante de l'électronique et de l'informatique, entraînent des évolutions dans les missions et l'organisation du CELAr.

Lorsque le CCSA cesse son activité, est créée une nouvelle division appelée SSIG (Sécurité des systèmes et informatique générale). Elle réunit les activités de sécurité des systèmes d'information et celles d'informatique générale. Son chef est Pierre Gaudon.

La division ODSA et le groupe ASRE sont fusionnés pour donner naissance à la division GEOS (Guerre électronique, observation, signatures) dirigée par Didier Queffélec puis Pierre Grandclément et ensuite Philippe Margot.

Ainsi, de 1992 à 1996, le CELAr comprend quatre divisions techniques : GEOS, ITES, TECN, SSIG.

En 1996 est créé le CASSI (Centre de l'armement pour la sécurité des systèmes d'information). Il est dirigé par François Debout puis Marc Liautard. Il constitue une cinquième division, les autres étant : GEOS, TECN et deux nouvelles divisions :

TCOM (Télécommunications), dirigée par Patrice Grabas puis Denis Raguin, et S3I (Systèmes d'information, interopérabilité et informatique générale) dirigée par Jean-François Avril.

A cela s'ajoute les équipes du CTP (Centre technique parisien) rattaché au CELAR en 1996.

6.4 - L'évolution des activités

Le développement de nouveaux systèmes d'armes conduit le CELAR à moderniser et adapter ses moyens. C'est ainsi que le banc BEDYRA voit sa surface de panneaux de points brillants doubler et se compléter de tables 3 axes et de nouvelles capacités de brouillage. Ces moyens seront utilisés pour évaluer les performances du radar RBE2 du Rafale en ambiance de guerre électronique. Ils seront complétés par les bancs BEST et COBRA qui contribueront à resserrer les liens avec les opérationnels des armées.

Les activités portant sur le SAR (*Synthetic Aperture Radar*) haute résolution, dont les évaluations ont démarré sur le simulateur SIROS (Simulateur d'images de radar à ouverture synthétique), se développent avec les expérimentations sur STRADI puis SARAPE (figure 17) pour aider à la spécification de deux projets de systèmes spatiaux militaires Horus et OSIRIS qui resteront à l'état de projet.

Dans le domaine du renseignement d'origine électromagnétique, le CELAR intervient pour spécifier et qualifier le programme de microsatellite CERISE qui sera détruit par un débris de fusée Ariane en juillet 1996. Il interviendra ensuite sur son successeur CLEMENTINE.

En optronique, le CELAR développe la simulation VHEDAA (Vulnérabilité des hélicoptères vis-à-vis d'une défense antiaérienne adverse) et participe aux essais internationaux OTAN Embow.

En matière de guerre électronique des télécommunications, le CELAR intervient en soutien sur les moyens d'écoute pour la direction du renseignement militaire (SARIGUE, MINREM) et la situation tactique (Gabriel).

La simulation numérique continue à se développer et à servir pour l'évaluation et la qualification des systèmes. Elle sera en particulier utilisée en se nourrissant des mesures de signature radar pour les systèmes *hard-kill* (ou armes dures destinées à détruire un missile assaillant plutôt qu'à le faire dévier de sa trajectoire avec les systèmes *soft-kill* ou armes douces).

En 1993, le CELAR reçoit la maîtrise d'ouvrage déléguée des études amont et des développements des composants de chiffrement ainsi que le pilotage de la convention d'Etat de 1988 sur la cryptographie avec Thomson-CSF. Le CASSI est chargé, après avoir travaillé sur la sécurisation des composants cryptographiques et sur l'analyse de cartes cryptographiques, de développer les travaux de rétroconception.

Le CELAR est officiellement certifié ISO 9001 le 5 février 1998.

Le 16 avril 1991, Pierre Joxe, ministre de la défense, vient au CELAR et se fait présenter les activités du Centre en pleine Guerre du Golfe. Le 15 janvier 1999, le Président de la République Jacques Chirac (figure 18), accompagné du ministre de la défense Alain Richard, est accueilli par le DGA Jean-Yves Helmer, le DCE Jean-Marie Poimboeuf et le directeur du CELAR François Fayard. Lui sont présentés les grands moyens d'essais BEDYRA et SOLANGE ainsi que les activités SSI.

7 - LA SUITE

Les réorganisations successives de la DGA se répercutent aussi bien dans l'organisation du CELAr, dans ses missions et dans son mode de fonctionnement, jusqu'à faire disparaître son nom en 2009 pour devenir l'entité « DGA Maîtrise de l'information » et regrouper les équipes de l'ancien LRBA de Vernon.

Il est désormais complètement reconnu pour son expertise.

BIBLIOGRAPHIE

1 – *CELAr : 40 ans et un avenir*. Livre édité par le CELAr pour ses quarante ans et auquel beaucoup d'informations ont été reprises ici. Paru en 2008.

2 – Jean-Paul Gillyboeuf et Pascal Leray, « La génération synthétique d'images tridimensionnelles », *L'Armement*, n° 63, décembre 1980. Cet article décrit les grands principes de la synthèse d'image.

3 – Jean-Paul Gillyboeuf, « La simulation », article dans la *Revue des ingénieurs en électricité et électronique*, en 1984. Cet article décrit les différents types de simulations, et les liens entre eux et avec les essais réels.

4 – Didier Queffélec, « Les moyens de mesure de signatures », *L'Armement*, n° 31, octobre 1992, 50-55.

5 – Bruno Chatenet, « Les bancs d'essais dynamiques », *L'Armement*, n° 31, octobre 1992, p. 56-62.

6 – Jean Le Gad , « Les grands moyens du CELAr pour la guerre électronique », *L'Armement*, 1993.



Fig. 1
Le ministre Pierre Messmer découvrant les plans du CELAr en 1966



Fig. 2
L'ICA Henri Boucher

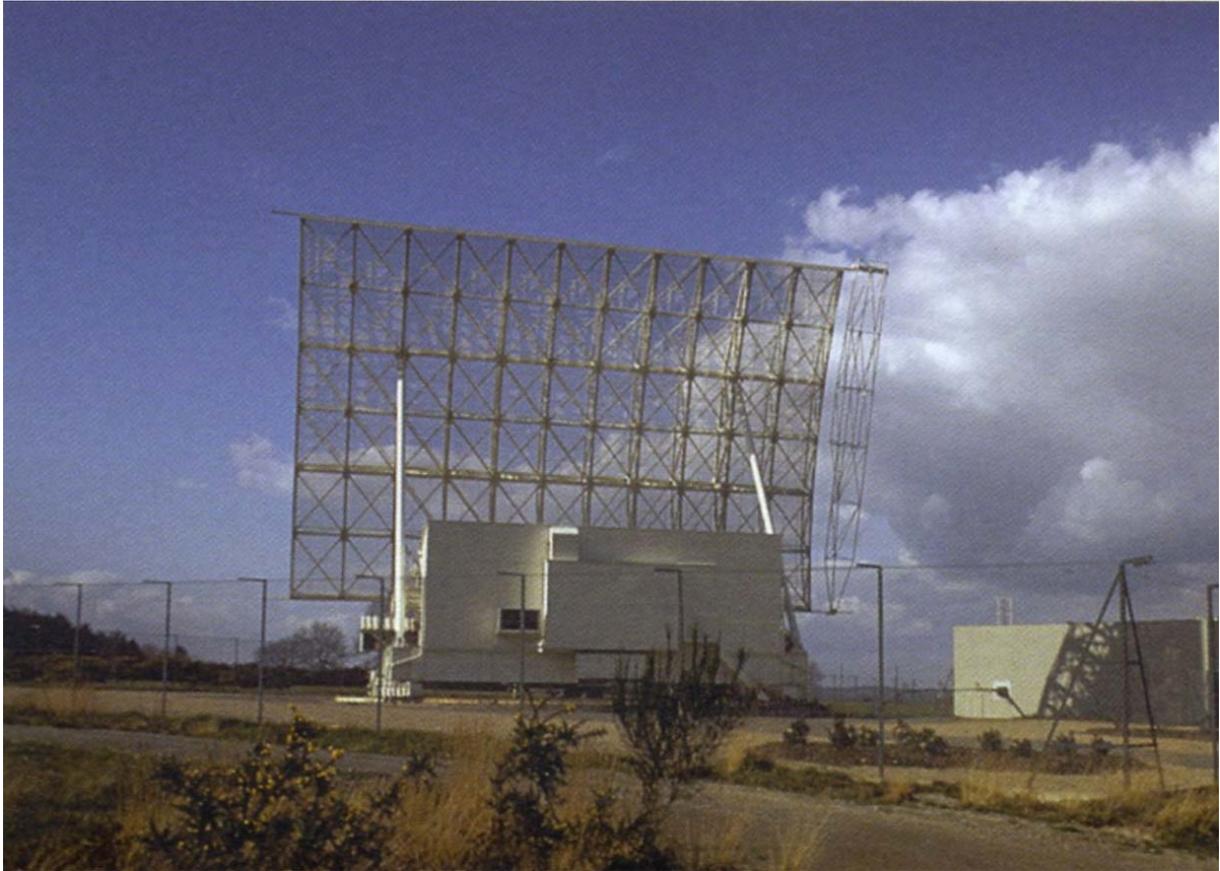


Fig. 3
STRADIVARIUS

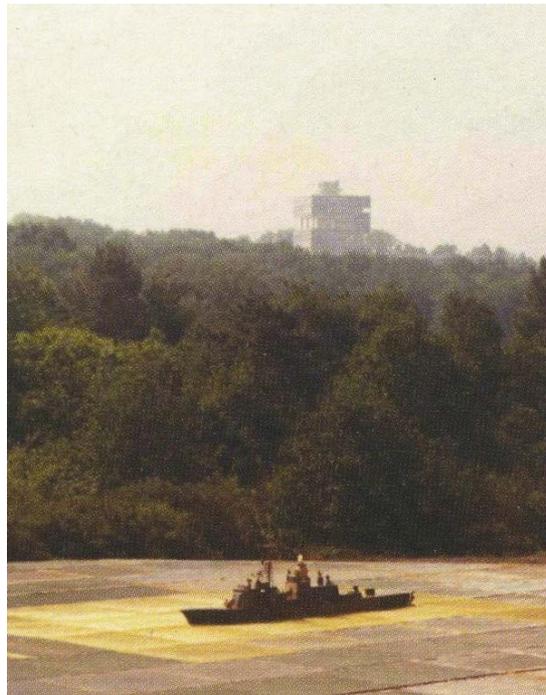


Fig. 4
STRADI

COMAERO



Fig. 5
Visite du ministre Michel Debré en 1972 – La chambre anéchoïque

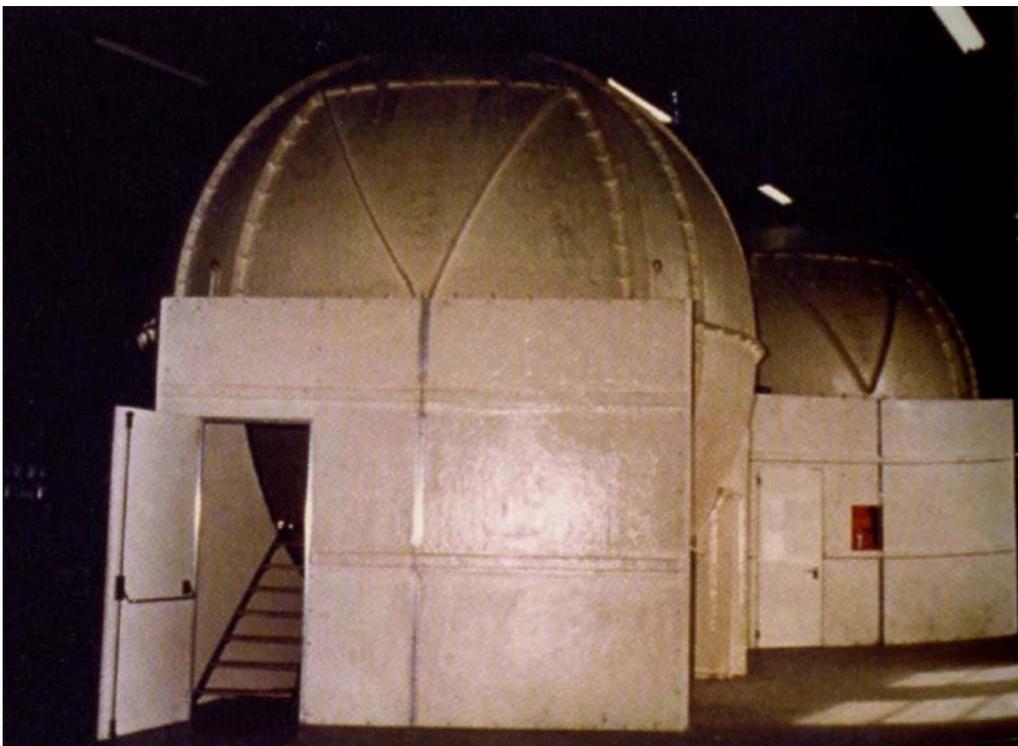


Fig. 6
Simulateur de combat aérien



Fig. 7
Visite du simulateur du char Leclerc



Fig. 8
Pascal Leray



Fig. 9
Cray 1



Fig. 10
SOLANGE

COMAERO

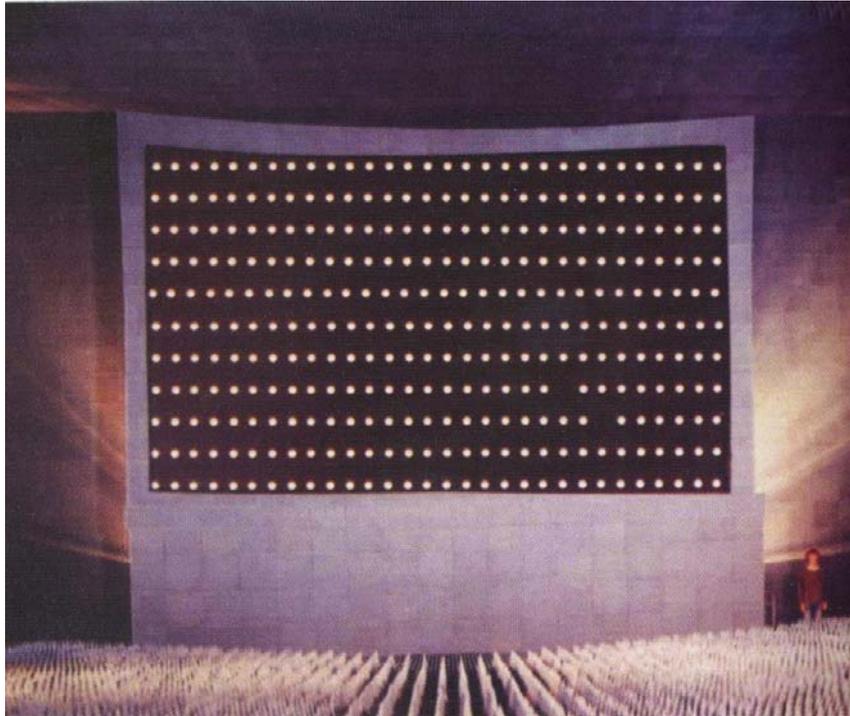


Fig. 11
BEDYRA

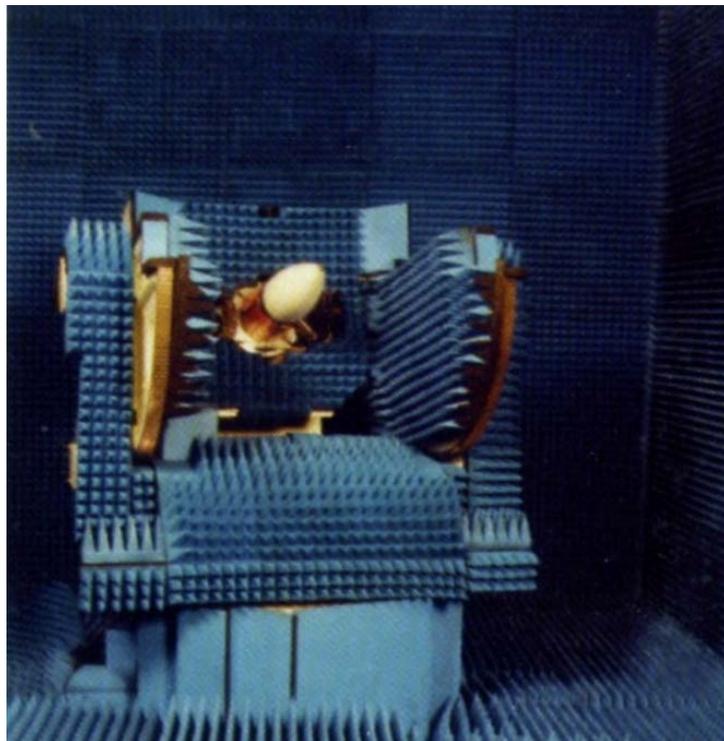


Fig. 12
MAESTRO



Fig. 13
SPARTE



Fig. 14
EPIDAURE



Fig. 15
Visite de Charles Hernu (1982)



Fig. 16
Visite de Louis Gallois (1988)



Fig. 17
SARAPE



Fig. 18
Visite de Jacques Chirac (1999)

CHAPITRE 13

L'ONERA (Office national d'études et de recherches aérospatiales)¹

INTRODUCTION

On se limite ici aux moyens d'essais les plus importants de l'ONERA (pour l'aérodynamique, la propulsion, la mécanique du vol, l'analyse modale des structures), ceux qui sont utilisés essentiellement dans le cadre de l'assistance technique aux industriels pendant la phase de développement, ce qui n'exclut pas leur utilisation pour des recherches appliquées ou même des recherches de base. Les autres moyens expérimentaux, comme par exemple les « souffleries de recherche » des centres de Meudon, de Lille et de Toulouse, sont évoqués dans le document du COMAERO *Etudes et recherches*² à propos des différentes finalités. Ce document présente également des généralités sur l'ONERA³.

Dans ce chapitre, il est largement fait appel aux textes rédigés à l'occasion des anniversaires décennaux de l'ONERA, aux différentes plaquettes décrivant l'Office, au livre *De l'aérostation à l'aérospatial* sur le Centre de Meudon paru en 2007, et à diverses publications à caractère historique, notamment celles de Marcel Pierre sur les grandes souffleries de Modane, de Philippe Poisson-Quinton et de l'ingénieur général Jean Carpentier⁴.

Pour la plupart des moyens d'essais présentés ici, des rappels historiques – limités, sauf exception, à la période considérée (1946-1995) – concernent leur définition, leur construction, leur évolution et leur exploitation⁵. Une description assez précise en est parfois donnée ; les moyens d'essais ayant évidemment souvent beaucoup évolué, dans une recherche constante d'adaptation aux besoins et d'amélioration de la productivité, il s'agit le plus souvent d'une photographie en fin de période, c'est-à-dire au début des années 1990.

¹ Par Jean-Pierre Marec, avec le concours de Marcel Cado (SOPEMEA), Jean Carpentier (F4) et Alain Cochet (Cellules ATD).

² Paru en 2008.

³ Rappelons seulement ici, pour être homogène avec les autres chapitres, que l'ONERA a été successivement dirigé par : René Jugeau (1946), Eugène Vellay (1948), Maurice Roy (1949), Lucien Malavard (1962), Paul Germain (1963), Raimond Castaing (1968), Pierre Contensou (1973), André Auriol (1979), Jean Carpentier (1984), Marcel Bénichou (1991), Michel Scheller (1995), puis Jean-Pierre Rabault (1999) et Denis Maugars (2003).

⁴ Voir la bibliographie à la fin du chapitre.

⁵ Pour l'exploitation, d'autres détails peuvent être trouvés dans le document *Etudes et recherches*, Tome II.

Après la présentation des grandes souffleries et des bancs d'essais de l'ONERA, puis des moyens d'analyse modale ONERA-SOPEMEA, quelques actions menées par l'ONERA en liaison avec certains centres d'essais de la DCAé (CEV, CEAT, CEPr) sont brièvement rappelées.

1 - LES GRANDES SOUFFLERIES ET LES BANCS D'ESSAIS

1.1 - Introduction

Le principe de la soufflerie est simple (figure 1). Il est basé sur la « similitude » existant entre l'écoulement aérodynamique autour du véhicule en vol et l'écoulement autour d'une maquette fixe placée dans un courant d'air. L'avantage est évident : permettre l'expérimentation en toute sécurité, dans l'ambiance et avec les commodités d'un « laboratoire ». Rappelons cependant dès à présent que cette « représentativité » du vol par la soufflerie n'est « valable » que si les valeurs d'au moins deux « paramètres de similitude » sont respectées : le nombre de Mach $M = V/a$ (V : vitesse, a : célérité du son) et le nombre de Reynolds $Re = \rho VL/\mu$ (ρ : masse volumique, L : dimension, μ : viscosité) qui conditionne en particulier la similitude de transition entre les régimes d'écoulement laminaire et turbulent (figure 2). Les « effets de paroi » nuisent évidemment à la représentativité, d'où l'utilisation éventuelle de parois perforées ou adaptables. L'« effet de sol » pour les phases de décollage ou d'atterrissage est également mal restitué, sauf utilisation d'un plancher en tapis roulant⁶.

Au début des recherches en aérodynamique puis en aviation, on s'intéresse uniquement aux basses vitesses, et les faibles dimensions de la maquette, imposées par celles de la soufflerie, ne permettent pas de respecter convenablement le Reynolds. La tendance va donc être d'augmenter la taille des souffleries et, en conséquence, leur puissance (à vitesse d'écoulement donnée).

Les premières souffleries apparaissent à l'aube du XX^e siècle, un peu partout en Europe. Le premier prototype rudimentaire est mis au point au Royaume-Uni par Frank Wenham en 1871. En France, Charles Renard réalise en 1896 la première soufflerie de l'Etablissement de Meudon. Tous les grands noms de l'aérodynamique mettent ensuite au point leur outil de recherche : les Frères Wright aux Etats-Unis en 1901, Thomas Stanton en Grande Bretagne et Arturo Crocco en Italie en 1903, Dimitri Rabouchinsky en Russie en 1904, Ludwig Prandtl en Allemagne en 1908.

En 1909, le constructeur Gustave Eiffel bâtit au Champ de Mars la première soufflerie française intéressant directement les avions. Les avionneurs comme Louis Breguet lui demandent de tester des profils d'ailes. En effet, les débuts de l'aviation sont marqués par de nombreux accidents, parfois mortels, et il est difficile de déterminer s'ils sont dus à des erreurs de pilotage ou à un défaut de conception de l'avion. Le passage de prototypes en soufflerie permet de réduire les risques. Obligé de quitter le Champ de Mars en 1911, Gustave Eiffel construit une nouvelle soufflerie à Auteuil.

Il y a d'autres souffleries à Issy-les-Moulineaux et à l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr⁷, parmi les plus grandes installations au monde avec des veines

⁶ Voir, par analogie, le tunnel hydrodynamique horizontal THALES du CERT/DERAT, dans le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, § 4.2 et Fig. 1.

⁷ Pour certaines de ces souffleries, Gustave Eiffel a joué un rôle important.

d'expérience de 3 m de diamètre. Pourtant, dès la fin des années vingt, elles vont se révéler trop petites.

En 1929, Albert Caquot, devenu directeur général technique au ministère de l'Air, envisage la réalisation d'une soufflerie pour essais d'avions en vraie grandeur, de 10 à 12 m d'envergure, avec pilote à bord et moteur en fonctionnement ! La plus grande soufflerie alors connue est une soufflerie américaine de 6 m de diamètre. Le Centre aéronautique de Meudon, bien abrité au fond d'un vallon (figure 3), est choisi pour accueillir l'installation. Le projet de l'ingénieur en chef Antonin Lapresle est retenu définitivement en 1931, après des essais satisfaisants effectués à Issy-les-Moulineaux. A côté du laboratoire et de l'atelier d'aérostation du colonel Charles Renard, s'ouvre en juillet 1932 un énorme chantier pour la construction de la Grande Soufflerie de Meudon.

1.2 - Centre de Chalais-Meudon

1.2.1 - Introduction

Lorsque le chantier de la Grande Soufflerie de Meudon débute, le Centre de Meudon a déjà une longue histoire, liée à la fois à l'aérostation (hangars Y et AT de la figure 3) et à l'aviation, et sur laquelle il n'est pas inutile de revenir, car l'ONERA en a hérité.

Rappelons en effet quelques dates (figures 4 et 5) : le 2 avril 1794, la première compagnie d'aérostiers est créée, sous le commandement du capitaine Jean-Marie Joseph Coutelle ; le 31 octobre 1794 voit la création de l'Ecole nationale d'aérostation militaire, qui sera supprimée par Bonaparte en 1799 en même temps que les deux compagnies d'aérostiers ; en 1877 est créé l'Etablissement central de l'aérostation, dirigé par le capitaine Charles Renard ; le 9 août 1884, le dirigeable *La France* (hangar Y), avec à son bord Charles Renard et Arthur Krebs, effectue le premier voyage aérien en circuit fermé, à proximité de l'étang de Chalais ; en 1904, Charles Renard essaye deux modèles d'hélicoptères à deux rotors coaxiaux ; le 27 mai 1905, Ferdinand Ferber réalise le premier vol motorisé stabilisé en Europe, avec son aéroplane *n°6 bis* lancé à vitesse suffisante par un système de câbles ; le 10 février 1910, l'Etablissement de Meudon réceptionne deux biplans Wright, les premiers aéroplanes destinés à l'armée ; en 1911, l'indicateur de vitesse, conçu à Meudon par Albert Etévé pour éviter le décrochage aérodynamique, devient réglementaire à bord de tous les avions militaires français ; en mars 1915 est créé le ballon captif Caquot (hangar AT), mis en service aux armées en mai ; en octobre 1915 sont expérimentés les premiers parachutes opérationnels pour les ballons d'observation.

1.2.2 - Soufflerie S1Ch

Dans ce site historique de Meudon, la construction de la Grande Soufflerie s'étale de 1932 à 1934. Dans son principe, la soufflerie ne pose pas de problème : elle est de type Eiffel (figure 6), concept déjà utilisé dans de nombreuses souffleries. Mais la réalisation d'un monument de cette taille, avec un cahier des charges aussi exigeant, relève de la prouesse technique. Il s'agit alors de construire la plus grande soufflerie au monde.

Description.

La soufflerie, composée de quatre chambres principales, a les dimensions et l'allure d'une véritable cathédrale. Le collecteur d'air est le chœur, donnant sur le transept : la monumentale chambre d'expérience. Le long diffuseur et la chambre d'aspiration forment la nef qui se termine par l'immense rosace des six ventilateurs. La forme originale, elliptique, de sa section est bien adaptée aux essais d'avions en vraie grandeur, ou au moins de grandes maquettes.

L'air extérieur s'engage dans le collecteur par un orifice elliptique de 350 m² (24,8 m x 16,8 m) équipé d'un crible métallique. Il est ensuite canalisé, puis accéléré par le rétrécissement de la section du collecteur à 100 m² (16 m x 8 m), jusqu'à la chambre d'expérience. C'est une veine libre longue de 11 m, dans une immense salle de 21 m sous plafond. Là, les conditions de l'écoulement sont les meilleures, la vitesse de l'air la plus élevée. Un mât supporte l'appareil à tester, équipé des instruments qui doivent mesurer les forces aérodynamiques. Les mesures de pression se font par multimanomètres. Des fils de laine collés à la paroi permettent de visualiser les décollements. L'écoulement est ensuite repris et ralenti dans un conduit divergent, le diffuseur, un tube en béton armé long de 38 m, dont 34 sans appui ! Il débouche dans une chambre d'aspiration, monumentale par son volume, qui sépare le diffuseur des ventilateurs. Absorbant une puissance de 6 000 CV, six ventilateurs de 8,7 m de diamètre créent ainsi par aspiration⁸ l'écoulement qui peut atteindre une vitesse de 180 km/h environ dans la veine d'essai. En fin de course, l'air est rejeté à l'atmosphère.

Les six composantes de l'effort et du moment aérodynamique sur la maquette sont mesurés à l'aide de balances situées dans un local sous la chambre d'essais, où se tient aussi l'équipe d'essais.

Construction.

La construction débute en 1932 (figure 7). L'entreprise chargée du gros œuvre, la Société anonyme des entreprises Limousin, va devoir faire preuve d'ingéniosité pour résoudre toutes les difficultés soulevées. L'ouvrage doit pouvoir supporter la dépression qui règne à l'intérieur du bâtiment pendant les essais (effet Venturi). Il faut éviter que les 6 000 CV des ventilateurs ne fassent vibrer tout l'édifice. Pour cela, le pignon qui les soutient est indépendant de la construction. La structure même du pignon doit être capable de supporter les 51 t que pèsent chaque ventilateur et son moteur. Enfin, le diffuseur doit allier résistance et précision malgré une forme originale en tronc de cône droit elliptique. Réalisé avec une grande précision, le tube en béton armé mesure, comme il a été dit plus haut, 38 m de long, dont 34 sans aucun appui, pour 7 cm d'épaisseur.

En octobre 1934, la construction est achevée. La mise en place des équipements électriques et de mesure s'effectuent au cours de l'année 1935 et en octobre les essais de réception de l'installation commencent. Entre temps, les Américains ont bâti à Langley Field, en Virginie, une soufflerie sœur, mais légèrement plus grande. En 1935, la Grande Soufflerie n'a donc, par sa taille, qu'une rivale au monde, aux États-Unis.

Une chambre de tranquillisation est rajoutée en 1950 en amont de l'entrée du collecteur pour rendre la soufflerie moins sensible au vent extérieur.

⁸ et non par soufflage, comme le laisse supposer un dessin d'Hergé dans l'une de ses bandes dessinées ! L'aspiration permet d'obtenir un écoulement plus régulier dans la section d'expérimentation.

Après avoir été le fleuron de l'histoire industrielle et aéronautique pendant plusieurs années, la soufflerie S1Ch est fermée en 1976 et classée monument historique.

Exploitation.

Comme pour l'historique de la création de S1Ch, avant de nous intéresser à l'exploitation pendant les années relatives à la période considérée dans ce document (1946-1995), il paraît opportun de revenir un peu en arrière.

En effet, l'exploitation commence dès 1936 (figure 8) et elle est surtout consacrée à l'étude de maquettes motorisées, à l'échelle 1/4 ou 1/5 des gros avions en projet de l'époque : Wilbault, avion commercial quadrimoteur de 28 t transportant 25 passagers sur 400 km ; hydravion Breguet 730 de grande croisière, capable de voler sur 4 500 km ; bombardier Amiot 370, bimoteur célèbre pour avoir battu quatre records du monde de charges embarquées ; hydravion Gourdou G 120, destiné à la lutte anti-sous-marine, etc.

D'autres aéronefs originaux sont également essayés : autogire La Cierva ; projet Riout d'un appareil original, dont la propulsion et la sustentation devaient être assurées par le battement et le gauchissement simultanés de deux paires d'ailes en tandem ! ; « Pou du Ciel » HM 14, avion à construire soi-même (nous dirions à présent « en kit »), présenté au Grand Palais en 1934, et qui depuis rencontre beaucoup de succès auprès du public, bien que donnant lieu à des accidents graves du fait de son instabilité en tangage !

En 1939, la seconde guerre mondiale éclate et, en juin 1940, tout le personnel du Service des recherches aéronautiques est replié à Toulouse en zone libre. Lors du retrait français, il n'y a pas de destructions, mais certains éléments servant aux mesures sont démontés et cachés. Le Centre de Meudon est alors occupé par les scientifiques allemands, bien conscients des capacités du Centre et notamment de sa soufflerie S1Ch. Les recherches menées par les Allemands pendant cette période d'occupation semblent avoir porté sur les ailes en flèche à basse vitesse.

Après la guerre, la Grande Soufflerie, appelée désormais S1Ch, est remise en marche dès le deuxième trimestre 1945. Les maquettes des premiers avions à réaction français y sont testées, en particulier pour les dispositifs hypersustentateurs qui permettent de réduire leurs vitesses d'atterrissage et de décollage.

C'est ainsi qu'en 1948 des essais de contrôle de l'écoulement sur le prototype d'avion de combat SO 6020 à aile en flèche sont effectués. La maquette est placée sur les trois mâts de pesée. Des mesures de pression sont effectuées par multimanomètres. Des fils de laine collés à la paroi permettent de visualiser les décollements. Le système d'aspiration et de soufflage de la couche limite permet de doubler la sustentation de l'avion. Cette configuration est appliquée avec succès quelques années plus tard sur un avion expérimental, le Breguet Vultur destiné aux porte-avions.

Pour le Breguet 941⁹, l'hypersustentation est obtenue par utilisation du souffle de ses quatre hélices qui « colle » l'air sur les ailes, même lorsque les volets descendent à la verticale ! La portance de l'avion est ainsi augmentée à vitesse réduite. Ce quadrimoteur de 20 t est capable d'atterrir et de décoller sur un terrain de football. Malgré son avance, le Breguet 941 ne trouve pas son marché. Le concept d'avion à décollage et à atterrissage courts (ADAC) peut cependant s'avérer *a priori*

⁹ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Figs. 31 et 32.

intéressant pour certaines applications, militaires ou civiles (desserte de petites îles, facilitation du trafic aéroportuaire, etc.).

D'autres aéronefs sont essayés à S1Ch : Morane-Saunier 472, le premier avion d'entraînement français à voler après la guerre ; avion Hurel-Dubois ; avion de l'Institut géographique national ; avions commerciaux (Armagnac, Caravelle) ; avion-fusée de combat Trident, détenteur du record du monde d'altitude en 1958 ; hélicoptère Djinn, premier dont le rotor est entraîné par réaction.

Une mention spéciale doit être faite des avions à vitesse de croisière supersonique, essayés en subsonique dans les phases de décollage et d'atterrissage.

En 1954, le Deltaviex est essayé en soufflerie¹⁰ et en vol¹¹. Il s'agit d'un petit avion supersonique expérimental conçu par l'ONERA, de 3,5 m d'envergure, construit pour éprouver en subsonique les qualités de vol de l'aile en queue d'hirondelle alors envisagée pour le vol supersonique. Le projet reste sans suite, car l'avion est instable, cependant il permet de perfectionner les méthodes de contrôle et la connaissance de l'aérodynamique des ailes à forte flèche. Notamment, il conduit à l'élaboration d'un système original de « contrôle actif » mixte, par gouvernes aérodynamiques et jets, qui est à rapprocher de celui que l'on retrouvera plus tard sur la Navette spatiale américaine !

En 1971, des essais permettent l'étude de l'aérodynamique du Concorde¹² à basse vitesse, en phases d'atterrissage et de décollage, à des angles d'incidence et de dérapage inhabituels pour vérifier que l'air alimente bien les réacteurs, même dans des configurations extrêmes.

Enfin, il faut citer quelques essais effectués hors du secteur aérospatial, au titre de la diversification : maquette de train à vapeur ; Renault 4 CV, Volkswagen Coccinelle ; éoliennes ; éléments architecturaux ; skieurs, avant les Championnats du monde de Portillo en 1966, pour démontrer l'intérêt de la « position de l'œuf » ; ballon PEGASE¹³ ; aile Rogallo¹⁴ ancêtre du deltaplane, sur demande de la DGAC, compte tenu des accidents dus aux qualités aérodynamiques insuffisantes de certaines ailes, mises en évidence par les essais (Claudius La Burthe).

1.2.3 - Soufflerie S2Ch

En 1964, une nouvelle soufflerie à basse vitesse vient rejoindre la Grande Soufflerie S1Ch à Meudon. Bien qu'elle ne puisse pas vraiment être considérée comme une soufflerie industrielle mais plutôt comme une soufflerie de recherche, cette soufflerie S2Ch¹⁵ trouve sa place ici compte tenu de ses dimensions. Elle est installée dans le grand hangar AT qui avait servi à la construction de nacelles et de ballons aux époques de Renard et de Caquot. Cette soufflerie n'est pas neuve puisqu'elle a été dessinée et construite à Issy-les-Moulineaux par Gustave Eiffel en 1920. En 1945, les Allemands l'ont dépouillée de tous ses équipements, si bien qu'il n'en reste que le gros œuvre. Son intérêt et son emplacement décident néanmoins le Service technique aéronautique à la remettre en état et à la moderniser. En 1954, elle est prête et donne des résultats exceptionnels. La qualité du courant d'air est

¹⁰ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 25.

¹¹ Voir Fig. 89.

¹² Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 50.

¹³ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 59.

¹⁴ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 55.

¹⁵ A ne pas confondre avec la petite soufflerie S2LCh (voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, § 4.2).

bien améliorée, sa turbulence considérablement diminuée et sa vitesse portée à 430 km/h. Mais en 1962, elle est menacée par le tracé du nouveau boulevard périphérique ceinturant Paris. Les éléments mécaniques essentiels sont sauvegardés et la soufflerie est alors reconstruite à Meudon.

Cette soufflerie de taille modeste, 3 m de diamètre, est bien adaptée à l'étude d'éléments d'avion aux vitesses réelles de décollage et d'atterrissage. On y teste dès 1965 les entrées d'air de réacteurs de l'avion Concorde, des éléments d'avions de combat comme le Mirage IV, le Mirage F1, le Mirage 2000, l'Alphajet, le Jaguar, une maquette BB Rapace préparatoire au programme Rafale, ou de transport comme l'ATSF (Avion de transport supersonique futur) (figure 9). Des recherches de base sont menées sur les tourbillons d'ailes delta et le contrôle de leur éclatement, le décollement tridimensionnel, etc. S2Ch est également utilisée pour le château d'eau de Valence et la Tour Montparnasse afin de déterminer leurs caractéristiques vibratoires, ainsi que pour la carène d'un pétrolier et celle d'un sous-marin nucléaire. Mais la soufflerie va surtout s'illustrer dans l'étude aérodynamique et dynamique des rotors d'hélicoptères (Jean-Jacques Philippe), à partir de 1974, grâce à des bancs d'essais adaptés (figures 10 et 11), et même dans des essais aérodynamiques sur des maquettes d'hélicoptères complets (rotor + fuselage) (figure 12).

La soufflerie S2Ch est fermée en 1999.

Avant de clore cette section consacrée aux grandes souffleries de Meudon S1Ch et S2Ch, aujourd'hui fermées, rappelons que le Centre de Meudon dispose de plusieurs souffleries de recherche en fonctionnement, mentionnées dans le document *Etudes et recherches*, dont l'importante soufflerie transsonique continue S3Ch.

Il faut également rappeler le rôle éminent joué par Pierre Rebuffet dans la conception et l'exploitation des souffleries de Chalais-Meudon. Comme le dit Philippe Poisson-Quinton : « Au cours des 40 premières années de l'ONERA, Pierre Rebuffet a marqué deux générations d'élèves¹⁶ et de collaborateurs qui se souviendront toujours de lui comme d'un merveilleux pédagogue et comme l'"âme" de Chalais-Meudon ».

1.3 - Centre de Modane-Avrieux

1.3.1 - Introduction

Un historique très complet de ce Centre figure dans les ouvrages de Marcel Pierre¹⁷. On se contente ici d'un rappel succinct et de la description de moyens tels qu'ils existent au début des années 1990 (figures 13 et 14).

Créé juste après la seconde guerre mondiale, à Avrieux près de Modane, en Savoie, le Centre de Modane-Avrieux (CMA) reçoit son énergie motrice principale directement de la chute d'Aussois, constituée par deux barrages d'une réserve globale de 12 millions de mètres cubes, alimentant une conduite forcée de 1,40 m de diamètre. La hauteur de chute est de 850 m, le débit maximal autorisé est de 15 m³/s correspondant à une puissance d'entraînement maximale d'environ 110 MW. La

¹⁶ de SUPAERO, par son cours d'*Aérodynamique expérimentale*, Librairie Polytechnique Ch. Béranger, 1958.

¹⁷ le « père » du Centre de Modane, qui avait eu la vision de l'intérêt de l'utilisation directe de l'énergie hydraulique, avant la « découverte » du chantier en Autriche.

conduite se divise en deux collecteurs alimentant soit les groupes de la centrale EDF d'Aussois, soit les turbines des souffleries du Centre.

Les installations d'essai sont les suivantes :

- La soufflerie sonique, à fonctionnement continu, S1MA, dont la veine d'essais mesure 8 m de diamètre et 14 m de long. Elle est mise en service en 1952 et elle est dotée de trois chariots d'essais interchangeables. La puissance maximale est de 88 MW. *Elle reste la seule soufflerie transsonique au monde de 8 m de diamètre.*

- La soufflerie transsonique et supersonique, à fonctionnement continu, S2MA, munie de deux veines d'essais interchangeables (1,80 m x 1,75 m environ), mise en service en 1961. Sa puissance maximale est de 57 MW.

- La soufflerie transsonique et supersonique, à rafales, S3MA pouvant être équipée de plusieurs veines d'essais, de hauteur 0,80 m environ. Elle est mise en service en 1959.

- La soufflerie hypersonique S4MA, équipée d'un réchauffeur à billes d'alumine, est mise en service en 1970. Elle ne dispose alors que d'une tuyère Mach 6,4 (diamètre de sortie 0,68 m environ). Des tuyères supplémentaires jusqu'à Mach 12 sont mises en service en 1989.

- Le caisson à vide S4B, dans lequel la pression peut baisser jusqu'à 15 mbar.

- La soufflerie de grilles d'aubes R4.3, avec veines d'essais en transsonique et en supersonique. Elle est mise en service en 1977.

- Les bancs de d'ynalpie BD1 et BD2 à gaz froid ou à gaz chaud pour l'étude de maquettes de tuyères ou d'arrière-corps de réacteur.

Donnons maintenant quelques détails.

1.3.2 - Soufflerie S1MA

Historique

Comme le dit Marcel Pierre, « la création du centre d'essais de Modane-Avrieux débute par la construction de la grande soufflerie, dont l'histoire commence à Berlin en 1937, se précise à Munich en 1940, se poursuit à Ötztal dans le Tyrol autrichien pendant la guerre, et se termine dans les Alpes françaises ».

Cette soufflerie est en effet une « prise de guerre » française. En 1940, elle fait partie des installations devant constituer le nouveau centre d'essais d'Ottobrunn, situé près de Munich, dans le cadre de l'effort de guerre allemand décidé en 1934 et accentué en 1937. Sa puissance étant incompatible avec les possibilités du réseau électrique régional, il faut se tourner vers une source de puissance hydraulique, les turbines entraînant directement les ventilateurs, ce qui est décidé en 1939, la même année qu'une proposition basée sur le même concept faite par Marcel Pierre et Henri Girerd au ministère de l'Air français, sans succès compte tenu de la conjoncture. Cette proposition est présentée à nouveau en 1940, après l'armistice, au GRA (Groupement français pour le développement des recherches aéronautiques), sans plus de succès. En Autriche, les travaux commencent en 1942 sur le site d'Ötztal, au confluent de l'Inn et de l'Ötz. Un barrage permet de fournir 100 000 CV sous 530 m de hauteur de chute. La fabrication et le montage du circuit aérodynamique, qui pèse environ 5 000 t (Tour Eiffel ~ 7 500 t), sont confiés aux sociétés Dingler et MAN.

En 1945, le chantier est repéré par Louis Girerd, puis à l'occasion d'une mission d'information sur l'état des recherches aéronautiques allemandes et des laboratoires existants ou en construction, à laquelle participent notamment Henri Girerd et Lucien Malavard. La soufflerie d'Ötztal présentant une possibilité de récupération comme prise de guerre, Henri Girerd le signale à l'ingénieur général Paul Dumanois, alors président du GRA, qui charge Lucien Malavard de la comparaison entre la poursuite de la construction soit *in situ*, soit après transfert en France. Le montage à Ötztal est exécuté à 50 %, et 25 % des éléments métalliques sont sur les aires de montage. Les autres pièces sont dispersées dans des zones d'occupation non françaises. Les Américains, Anglais et même Russes se montrent également intéressés ! L'impression générale est que le démontage est difficile mais possible. De plus, le choix d'une chute d'eau d'une hauteur supérieure à celle d'Ötztal serait favorable, ce qui serait vraisemblablement le cas en France. Une étude plus approfondie montre que cela n'est pas possible dans les Pyrénées, mais faisable dans les Alpes, à Bissorte ou mieux à Aussois en Savoie. La décision est prise par le ministre de l'Air, Charles Tillon, sur proposition de l'IG Paul Dumanois. Les usines Dingler de Zweibrücken sont remises en activité (Henri Girerd).

Il s'agit de récupérer 200 t de matériel se trouvant à la société MAN à Augsburg, en zone américaine, pour les diriger vers Zweibrücken. De même pour 200 t de matériel de la société Voith (Heidenheim). Certaines pièces (arbres de ventilateurs) sont déjà parties aux Etats-Unis ! Les Américains ne sont pas toujours très coopérants et il faut signaler l'action conciliante et efficace de Théodore von Karman, en liaison étroite avec Joseph Pérès et Lucien Malavard.

Le démontage à Ötztal et le transport vers Modane présentent des difficultés. Il faut découper la grande structure de la soufflerie en morceaux suffisamment petits pour être placés sur les wagons, sans provoquer des déformations irrécupérables. Un wagon spécial surbaissé sert à transporter la roue Pelton de 35 t, dont il faut démonter quelques augets. Fin mars 1946, la soufflerie est entièrement démontée. La fraction ramenée d'Ötztal sera évaluée à environ 11 % de l'ensemble de la soufflerie¹⁸.

Le responsable de la fabrication à Zweibrücken est Louis Girerd. L'objectif est de « fabriquer de l'ordre de 3 000 t de tôlerie et de mécanique dans un pays sans ressources ». A la fin de 1947, 1 100 t de pièces sont expédiées à Modane, en plus du matériel de montage et d'outillage de chantier. En 1948, les fabrications atteignent le rythme de 300 t/mois lors de la période de pleine activité de montage à Modane. Notons cependant que la production concernant l'ONERA n'est pas expédiée totalement à Modane, une partie va à Chalais-Meudon pour la construction de la soufflerie « pilote » S3Ch¹⁹, à l'échelle 1/8 de S1MA.

En parallèle avec cet effort de transfert de la grande soufflerie de l'Autriche vers la France et afin de préparer l'avenir, des études sont conduites concernant le fonctionnement des souffleries transsoniques et même supersoniques. C'est ainsi que Lucien Malavard effectue une mission en novembre 1945 à Innsbruck pour approfondir nos connaissances sur les souffleries supersoniques du Centre de Kochel. Heinrich Peters est chargé de réfléchir aux enseignements tirés de ces enquêtes, d'approfondir certains points avec les scientifiques allemands et d'établir les bases nécessaires à l'élaboration d'un projet de centre d'essais de Modane. Ce

¹⁸ Il s'agit de la *valeur* du matériel de tôlerie ramené d'Ötztal (2067 t) rapportée au coût total de la soufflerie en état de marche.

¹⁹ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, § 4.2. et Fig. 1.

travail est effectué dans un bureau d'études installé à Munich. L'éloignement de ce bureau constitue un handicap que l'on cherche à faire disparaître par un transfert en France. André Raffin est chargé de trouver des locaux. Il en trouve à La Tronche, quartier résidentiel de Grenoble. Ce bureau d'études travaille en liaison avec celui de la firme Dingler à Zweibrücken et avec tous les bureaux d'études des sociétés participant à la construction de la grande soufflerie et, bien entendu, avec les services du GRA, puis de l'ONERA, intéressés par la conception, la réalisation et le contrôle. La seule charge de travail concernant la grande soufflerie est écrasante. Les études des souffleries supersoniques et d'un banc d'essais de compresseur passent en seconde urgence. La documentation alors disponible en France ne constitue pas une base suffisante pour définir ces souffleries. Des études sont entreprises sur différents sujets. A partir d'avril 1947, les études exécutées à La Tronche sont suivies, de Châtillon, par Guy Fasso. Le premier plan d'ensemble du Centre est établi en mai. Les souffleries supersoniques sont évoquées, ainsi que le banc d'essais de compresseur. En 1953, le bureau d'études de La Tronche est dispersé et les ingénieurs répartis entre Châtillon et Modane.

La construction de S1MA s'échelonne de 1945, avec les premières reconnaissances sur le site, au 19 octobre 1950, date de la première rotation d'un des deux groupes turbine-ventilateur.

André Raffin est chargé de toutes les actions se déroulant à Modane. Il jouera un rôle primordial dans la construction et la mise en route de S1MA. A la mi-1945, les premiers wagons en provenance d'Ötztal arrivent à Modane, ville sinistrée à 90 % ! Le volume du matériel qui arrive d'Ötztal et de Zweibrücken saturant rapidement les aires de stockage disponibles à Modane, les trains sont bientôt dirigés sur Vénissieux, près de Lyon, et sur La Capuche, à côté de Grenoble.

L'organisation du chantier ne va pas sans difficultés, notamment en ce qui concerne l'alimentation en énergie électrique et eau potable. La société Dingler envisage l'envoi de six équipes échelonnées entre le 20 mars et le 1^{er} août 1947. Le personnel est complété par des ouvriers français embauchés par l'ONERA, sur contrat de la DTI (Direction technique et industrielle). En mars 1947, l'Etablissement de recherches de Modane est créé et placé sous la responsabilité de Marcel Pierre. La société Dumez est choisie pour exécuter les travaux de génie civil.

L'étude du sol est effectuée par la Direction des matériaux de l'ONERA (Marcel Mathieu, Arthur Iablokoff) et les sondages par la société Dumez.

Les terrassements concernent, en premier lieu, l'emprise de la voie ferrée, puis les différentes plates-formes. Ils sont exécutés sur plusieurs années.

Dans le cas où la roche n'est pas à faible profondeur, les fondations sont exécutées sur pieux. Celles des ventilateurs sont importantes, non seulement en raison des efforts (poids et poussée), mais également par suite des sollicitations dynamiques des rotors dues aux forces instationnaires aérodynamiques et au déséquilibre résiduel.

Au printemps 1947, la voie ferrée est posée et en mai le pont sur l'Arc est terminé. Le raccordement du chantier avec la SNCF permet l'arrivée massive d'éléments métalliques et de matériaux de chantier provenant de tous les lieux de stockage.

Les travaux s'étalent ainsi de 1946 à 1950, caractérisés par ces quelques chiffres : déblais : 275 000 m³ ; béton : 27 000 m³ ; coffrage bois : 63 000 m² ; fer à béton : 3 300 t ; poids du circuit et des chariots : 5 300 t ; soudures : 42 km de cordon, 40 t de baguettes ; surface de tôles peintes : 94 000 m² (30 t de peinture !).

Le 19 octobre 1950, la soufflerie est mise en marche.

La période de mise en route couvre quatre années, de 1950 à 1954. A cette dernière date, l'état d'avancement de la soufflerie est de 95 %.

La mise au point technologique ne soulève pas de difficultés particulières, notamment en ce qui concerne l'entraînement hydraulique des ventilateurs. Par contre, une rupture des pales se produit²⁰. Heureusement, des rechanges ont été prévues.

La mise au point aérodynamique est plus longue que prévu, car différents réglages interagissent, par exemple ceux des aubages des coudes. Pour mieux caractériser l'écoulement aérodynamique, des prises de pression statique sont réparties à la paroi de la soufflerie. Des peignes de prises de pression d'arrêt, placés dans l'écoulement, sont montés sur des supports profilés situés selon des diamètres ou des extrémités de diamètres.

En juillet 1953, l'organisation du centre évolue. Le service des Grandes souffleries de Modane-Avrieux (GSMA) est créé.

La préparation des premiers essais s'effectue dès que les services officiels et les constructeurs aéronautiques précisent les programmes et le choix des maquettes, pour des essais aérodynamiques ou des essais avec combustion : Caravelle ; moteurs à pistons ; turbopropulseurs ; turboréacteurs ; statoréacteur Arsenal ; avion Breguet M 960 ; déviateur de jet réel sur avion Vampire, pour la SNECMA ; etc.

Pour un fonctionnement correct en transsonique, la veine d'essais est améliorée par affinement de la loi des aires et introduction d'une faible porosité des parois pour éviter le blocage de l'écoulement à Mach 1²¹. Les dispositions envisagées sont préalablement testées dans la soufflerie « pilote » S3Ch de Meudon. A la fin de l'année 1955, Mach 1,02 est obtenu lors d'un essai effectué à l'aide de la demi-aile RAE (*Royal Aircraft Establishment*), sans blocage aérodynamique.

« La grande soufflerie de Modane-Avrieux est devenue transsonique ».

Description

La soufflerie S1MA (figures 15 et 16) frappe par ses dimensions. Elle est animée par deux ventilateurs contrarotatifs de 15 m de diamètre entraînés par des turbines hydrauliques. La vitesse peut varier de quelques mètres par seconde à Mach 1 environ. La pression génératrice est la pression atmosphérique, soit 0,9 bar (l'altitude est de 1 100 m environ). La température génératrice est ajustable par le taux d'échange d'air avec l'atmosphère jusqu'à plus de 50°C, ce qui permet d'éviter les problèmes de condensation de l'eau contenue dans l'air atmosphérique.

La soufflerie est bien adaptée aux essais d'éléments d'avions réels ou de maquettes et de systèmes propulsifs de grandes dimensions jusqu'au transsonique élevé.

Trois veines d'expériences interchangeables sont utilisées :

- La veine n° 1 est équipée de 4 parois planes donnant une section rectangulaire à coins coupés de 6,74 m de largeur et de hauteur 6,27 m (section 40 m²) ou 6,85 m

²⁰ Il sera découvert que cet incident est lié à un sabotage des pales destinées à la soufflerie autrichienne, par des ouvriers français du travail obligatoire en Allemagne !

²¹ A l'origine, la soufflerie était prévue pour $M = 0,7$. A la fin des années 1950, l'ONERA a modifié le chariot n° 1 pour atteindre $M > 1$ avec des fentes et des remplissages adaptables (loi des aires). C'est peut-être ce qui explique la fatigue des ventilateurs et les casses (années 1980). Le remplacement des ventilateurs est prévu.

(section 42,6 m², avec plancher surbaissé pour essais à la paroi). Elle est dotée de quatre fentes assurant une perméabilité de 1,7 %.

Ses équipements comprennent :

- . Un support tripode²² pour montages en dard avec variation d'incidence de 45° et de dérapage de - 10° à + 10°. De très nombreux dards supports permettent diverses configurations de montage (dard droit, dard en Z, dard dérive).

- . Une interface permettant le montage d'un support au plancher (possibilité d'essais de largages et de simulation de trajectoires avec dispositif d'animation de charges captives).

- . Un plancher avec tourelle et balance à 6 composantes pour essais à la paroi.

- La veine n° 2 (figure 17), utilisée pour des essais à basse vitesse et qui sera transformée ultérieurement (2000) en veine transsonique. Elle peut être équipée d'un plancher, avec tourelle. Un dispositif à plusieurs degrés de liberté motorisés est utilisable pour les essais de mécanique du vol avec un plancher comportant un soufflage de couche limite. Une version particulière de ce dispositif est adaptée aux essais d'effet de sol de maquettes comportant éventuellement une simulation de la motorisation.

- La veine n° 3 est utilisée dès l'origine pour les essais de moteurs réels (elle dispose d'un banc d'alimentation en kérosène), les essais de rotor d'hélicoptère ou de convertibles (nouveau banc d'essai avec entraînement par moteur électrique jusqu'à une puissance de 500 kW), et les essais d'hélice (entraînement par deux moteurs Turmo, puissance 850 kW).

Le nouveau banc d'essai de rotor, qualifié fin 1987, remplace le banc en service depuis 1967. Il permet les essais de rotor d'hélicoptère, ou d'hélice de convertibles, jusqu'à 5 m de diamètre pendant les différentes phases du vol. Le basculement de l'axe du rotor est possible de - 95° à + 25° par rapport à la verticale. La rigidité du banc a été étudiée pour éviter les problèmes dynamiques. La tête basculante est équipée d'une balance à six composantes et d'un collecteur tournant de 150 pistes, y compris des pistes puissance d'alimentation de dégivreurs. Une alimentation du rotor en air comprimé est possible (volets fluides). La sécurité de ce banc est assurée par une surveillance permanente et un secours électrique complet en cas de défaillance de l'alimentation normale du moteur.

Le banc d'essai d'hélices existant, entraîné par deux moteurs Turmo, délivre jusqu'à 850 kW et permet des essais d'hélices réelles ou à grande échelle instrumentées, jusqu'en transsonique. Plusieurs nouveaux bancs d'hélices sont prévus. Le chariot 3 peut également recevoir des bancs d'essais d'hélices rapides à plus petite échelle, simples ou contrarotatives, avec motorisation par air comprimé. Un revêtement acoustique des parois est utilisable jusqu'à 150 m/s et l'étude d'un revêtement capable du transsonique est effectuée²³. Les méthodes et moyens de la Division acoustique de la Direction de la physique sont utilisés pour la qualification du champ acoustique autour des maquettes, avec ou sans parois spéciales.

Un mât support, avec tête d'incidence et dérapage, monté au plancher, est utilisé pour les essais de largage de charges sous avion. Pour les essais de trajectoire captive avec dispositif d'animation à 6 degrés de liberté, un mât tripode est utilisé.

²² Non prévu initialement pour la soufflerie autrichienne et conçu ultérieurement (dans les années 1960) par Guy Fasso de l'ONERA.

²³ Il sera réalisé à la fin des années 1990.

Les parois du chariot comportent plusieurs trappes transparentes permettant de loger projecteurs et caméras à grande vitesse nécessaires à la cinématographie des charges larguées.

Des dispositifs spéciaux permettent l'exécution d'essais divers, tels que : essais de prises d'air, largage de verrière, ouverture de parachute, essais aux intempéries, pluie, givrage quand les conditions atmosphériques le permettent (température inférieure à -20°C, soit environ un mois par an).

Plusieurs dispositifs d'essais banalisés sont utilisables dans S1MA : dispositif de sondage d'écoulement externe à 4 degrés de liberté, mât vertical à chariot motorisé, dispositif de trajectoires captives, dispositif de stabilité dynamique, dispositif de sondage de prise d'air.

De nombreuses techniques de visualisation sont mises en œuvre : visualisations de transition par acénaphène ou thermovision infrarouge, visualisations pariétales par fils, bouillies et fluides colorés, visualisation du champ par fumées, PSP (*Pressure Sensitive Paint*, peinture sensible à la pression), etc.

Plusieurs techniques de mesure des déformations sont utilisables : capteurs optiques de déplacement, torsiomètre à lumière polarisée et, plus tard (2000), restitution stéréographique à partir de caméras CCD.

Les chariots sont raccordables aux réseaux de distribution d'air comprimé à 9 bar, et 64 bar avec débit maximum de 16 kg/s (essais de motorisation avec simulateurs de réacteurs ou banc d'hélice à échelle réduite). Une extension du réseau d'air 200 bar (maxi 15 kg/s) vers S1MA est ensuite réalisée.

La chaîne d'acquisition de mesures²⁴ comprend une dotation de base d'une centaine de voies pouvant être renforcée en cas de besoin, et à laquelle peuvent être associés des moyens d'acquisition banalisés spécifiques : essais instationnaires conventionnels ou avec PCM (*Pulse Code Modulation*), analyseur Fourier, utilisation des fils et films chauds, etc. Les systèmes de sous-commutation des pressions (scanivalves mécaniques et PSI²⁵ électroniques) sont couramment utilisés. Le traitement des informations est réalisé en temps réel par un ordinateur VAX 782 réservé à la soufflerie.

Exploitation

L'exploitation industrielle de la soufflerie S1MA débute en 1954.

Les essais au profit des *avions militaires* concernent notamment le Mystère IV A équipé de réservoirs (1954), la maquette volante Deltaviex (1958), l'approche finale et l'appontage du Breguet Alizé (1960) (figure 18), le fuselage du cargo Transall (1960), le Mirage IV pour la visibilité à travers le pare-brise par temps de pluie (1963)

²⁴ Les moyens de mesure ont fait des progrès considérables. Encore en 1964, des multimanomètres à mercure photographiés sont utilisés. Puis viennent les enregistreurs graphiques à élévation. Puis la numérisation de ces enregistreurs et les premiers rubans perforés (Facit) permettent le traitement informatique à Châtillon ou chez IBM Paris. Enfin ce sont les amplificateurs et les multiplexeurs électroniques, en passant par l'étape figeage des mesures simultanément avec des relais électromécaniques. Les commutateurs de pression électromécaniques Solartron puis Scanivalve ont à présent fait place aux commutateurs électroniques PSI.

²⁵ PSI, marque américaine de multicapteurs électroniques. L'ONERA a collaboré avec PSI pour être le premier à introduire ces capteurs en Europe.

(figure 19), l'adaptation des moteurs de sustentation Rolls-Royce RB162 au Mirage III V à décollage vertical (1964) (figure 20), l'hypersustentation du Breguet Jaguar (1967) et du Mirage G (1968), le Super Mirage (1975), l'Alphajet (1975), le Mirage 2000 à forte incidence (45°) sur le nouveau montage en dard (1977) (figure 21), le Rafale²⁶.

Des essais concernent plus particulièrement les entrées d'air : Mirage III F2 (1966), Alphajet (1972), Mirage 2000 (1974).

D'autres sont relatifs à des largages de charges : Mirage F1 (1977) ; de parachutes (1960) ou de verrières : Mystère 452 (1955), Fouga CM170 (figure 22), Aquilon, Vautour, Trident, Alizé, Etendard IV, Mirage IV ; ou encore à la tenue des casques des pilotes après largage (1966). Comme signalé plus haut, depuis 1994 la soufflerie S1MA est équipée (comme S2MA depuis 1976) d'un Système de trajectographie captive (STC) à six degrés de liberté permettant les essais de séparation de charges tirées ou larguées depuis un avion porteur (par exemple : tir de missile Apache ou Mica sous Mirage 2000).

Pour les *avions civils*, des essais sont effectués pour la Caravelle (1957), le Mystère 20 (1964), le Concorde sur une demi-maquette au 1/6^{ème} (10 m de long, 2 m de demi-envergure) réalisée par la BAC (*British Aircraft Corporation*) pour des mesures à grande incidence (1969), l'Airbus A300, le Mercure au décollage (1972, figure 23 ; 1973 ; 1977), le Falcon 50 (1977), le Falcon 20X (1979) (figure 24), le Falcon 900, l'A320²⁷, l'A340 (figure 25), un projet d'avion de transport régional dans le cadre du programme de recherche européen GEMINI (figure 26). La soufflerie S1MA permet l'essai de grandes maquettes d'avions motorisées avec des turbines alimentées à l'air comprimé (dispositif TPS, *Turbo Powered Simulator*, sans ou avec²⁸ réverse) (Jean-Paul Bècle).

La soufflerie S1MA permet d'effectuer des *essais aéroélastiques* sur des maquettes aéroélastiquement semblables, comme par exemple pour rechercher les causes de l'accident de l'avion Arsenal VG 90 dû à un flottement d'empennage (1954), ou prévenir le flottement pour l'aile du Fouga CM 170 (1957) ou pour l'empennage du Jodel (1966).

Des *hélices* classiques de différents modèles sont également passées en soufflerie : Ratier, Astazou, Potez, Nord 262, Nord 262 MH, Breguet 941 (1967).

Un dispositif d'essais de *rotors* de 4 m de diamètre est disponible à partir de 1964 et permet notamment d'effectuer des essais de rotors de l'Aérospatiale pour hélicoptères (1968, figure 27 ; 1970 ; 1977) et convertibles (1976).

Plusieurs *engins* ou *missiles* sont également essayés dans S1MA : l'engin cible SFECMAS CT20 équipé d'un turboréacteur Marboré (1954), l'engin SA 4500 équipé de son réacteur (1958), le Malafon (1959), la cible Emir portée par l'engin Aérospatiale CT20 (1971), l'engin Matra Tesco Otomat équipé de son réacteur (1971), l'engin de reconnaissance Aérospatiale R20 avec son réacteur (1971), le

²⁶ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 22.

²⁷ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 33.

²⁸ en basse vitesse et avec effet de sol.

missile Aerospatiale Exocet (1974) (figure 28), l'AM39 de l'Aérospatiale, le missile Apache²⁹.

D'autres essais sont effectués pour des lance-roquettes (1961), des ogives SEREB avec parachute de récupération (1961), des bombes réelles (1961).

Certains essais concernent la *propulsion* : propulseur composite SFECMAS³⁰ turbo-stato (1954), combiné turbo-stato du Griffon (1956) (figure 29), groupe moteur SIPA 1100, turboréacteur ATAR de l'avion SNECMA Coléoptère à décollage vertical (1959), hélices contrarotatives du turboréacteur à hélices rapides (THR) de la SNECMA, avec coopération de General Electric (figure 30).

Les conditions climatiques à Modane favorisent la réalisation d'essais de *givrage*, effectués par temps froid à l'aide d'une grille de pulvérisation. Ces essais concernent notamment le Concorde³¹, l'aile de l'avion VC 10 (1962), le radôme réel du Transall de Nord-Aviation (1967), le Corvette (1973), des rotors de l'Aérospatiale (1974), l'ATR 72 (figure 31). Des études plus fondamentales portent sur le givrage à échelle réduite (1968), la comparaison des formes de givre obtenues par le calcul et les essais (1976), etc.

Parmi les essais effectués pour l'*étranger*, citons ceux concernant le Fiat G91 (1961), le Concorde (maquette au 1/30^{ème} du RAE) (1965), le Convertible de Boeing (rotor de 4 m de diamètre) (1968, 1969, 1972), la maquette MBB (*Messerschmitt-Bölkow-Blohm*) pour étude à grande incidence³², etc.

Des essais ont un caractère marqué de *recherche de base* ou appliquée, comme par exemple ceux concernant l'efficacité d'ailerons en transsonique (1959), l'étude des jets liée aux applications ADAV (Avion à décollage et atterrissage verticaux) (1965), ou l'aérodynamique des avions de combat en transsonique en régime de tremblement (*buffeting*).

Enfin, au titre de la *diversification* signalons quelques essais effectués hors du secteur aérospatial : pantographe SNCF (1955, 1982), voilier de compétition transatlantique Manureva d'Alain Colas (1975), réduction de la traînée des skieurs de compétition (1975).

Conclusion

Conçue pour créer un écoulement à des vitesses allant de quelques mètres par seconde jusqu'à près de Mach 1, dans une section de veine de 8 mètres de diamètre, la soufflerie S1MA présente des *caractéristiques uniques au monde*. Constamment améliorée, notamment par la constitution de trois veines interchangeables, optimisées pour des essais de types différents, et par l'installation de dispositifs de mesure de grande précision, la soufflerie S1MA a acquis une renommée mondiale qui lui a attiré des clients de tous pays, tant en ce qui concerne les avions, les hélicoptères, les moteurs que les missiles et les lanceurs spatiaux. La fidélité des essais, la précision des mesures et la confidentialité garantie grâce à la

²⁹ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 3, Fig. 98.

³⁰ Société française pour l'étude et la construction de matériels aéronautiques et spatiaux.

³¹ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 50.

³² Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 26.

conception des veines et de leurs moyens d'exploitation, sont autant de qualités très appréciées des utilisateurs.

1.3.3 - Soufflerie S2MA

Historique

La soufflerie S2MA, continue, sub-, trans-, et supersonique est évoquée pour la première fois lors de la séance du Conseil d'administration de l'ONERA du 11 octobre 1946, sous la dénomination M2 (Modane, Mach 2). Pour sa définition, deux équipements principaux dominent : le compresseur et la tuyère. En 1946, la puissance est limitée à 100 000 CV.

En 1947, un projet de veine de 3 m x 3 m permet d'atteindre au plus Mach 2,2, ce qui est jugé insuffisant par certains membres du Conseil scientifique comme Joseph Pérès, Maurice Roy et Lucien Malavard. La puissance de 115 000 CV dépassant la limite admise, la section est ramenée à 2,80 m, puis à 2,70 m pour augmenter le Mach jusqu'à 3. On hésite entre un seul compresseur de 100 000 CV et deux compresseurs de 50 000 CV chacun, montés en parallèle.

En 1950, la possibilité d'essais avec combustion est demandée par Jean Surugue, ce qui sera abandonné en 1952.

En 1951, on s'interroge sur l'utilisation de tuyères interchangeable ou d'une tuyère déformable. Roland Willaume effectue à cette occasion une mission aux Etats-Unis.

En 1952 débute l'installation du chantier et l'IG Paul Mazer, alors Directeur technique et industriel de l'aéronautique, joue un rôle déterminant pour garantir la continuité du financement du programme. Finalement, on s'oriente vers l'utilisation de deux veines, l'une transsonique avec des parties supérieure et inférieure fixes, l'autre supersonique avec une tuyère comportant une partie supérieure fixe et une partie inférieure mobile longitudinalement (bloc coulissant) pour obtenir une variation continue du Mach, comme dans une soufflerie analogue de la NASA. Les deux veines, montées sur un même bâti, s'insèrent alternativement dans le circuit aérodynamique. La veine transsonique comporte, à l'amont, deux parois déformables symétriquement fixant le nombre de Mach. La veine est équipée de parois perméables pour éviter le blocage de l'écoulement.

Pour la construction, les marchés sont passés, après appels d'offres, à Rateau pour le compresseur (1953), au groupement Ossude pour les travaux de génie civil (1955) et, en 1956, à Schneider pour la partie métallique centrale de la soufflerie et à Dingler pour le réfrigérant.

La première rotation a lieu le 10 avril 1961, suivie de l'inauguration le 21 avril.

Description

La soufflerie S2MA (figure 32) est entraînée par un compresseur de 57 MW à 16 étages, mû par quatre turbines Pelton. Le refroidissement est assuré par un échangeur à eau, placé dans le circuit aérodynamique juste à l'aval du compresseur.

Deux veines d'essai rectangulaires, interchangeables par déplacement latéral, sont installées dans une enveloppe étanche :

- la veine transsonique (1,75 m x 1,77 m), à parois pleines ou perforées (nombre de Mach de 0,1 à 1,3) ;

- la veine supersonique (1,75 m x 1,93 m). La variation du nombre de Mach de 1,5 à 3,1 s'obtient par la translation longitudinale du bloc inférieur de la tuyère asymétrique. La pression génératrice peut varier de 0,15 bar jusqu'à une valeur maximale, variable avec le nombre de Mach. Les temps de vidange du circuit sont réduits, grâce à l'utilisation d'extracteurs à effet de trompe ajoutés dans les années 1960 et alimentés par les machines de pressurisation.

Les équipements de la soufflerie comprennent :

- un secteur porte-dard télécommandé en incidence et rotation (incidence $\pm 12,5$ degrés, rotation ± 360 degrés) compatible avec une portance au centre de la veine de 24 000 N et un couple de roulis de 2 000 Nm.

De nombreux dards permettant une conception modulaire des montages sont utilisables. Plusieurs supports motorisés associés à ces dards augmentent le domaine d'incidence-dérivage réalisable :

- un dard à coude variable centré au centre de la veine (coude - 10 à + 25 degrés, capacité en portance 14 000 N), pouvant recevoir une tête de roulis motorisée sur 360° (couple 120 Nm) ; il a été créé pour augmenter le domaine d'incidence et de dérivage jusqu'à 40°, pour le Mirage 2000 ;

- un ensemble de dards déportés à coudes fixes et roulis motorisé (600 Nm) supportant 24 000 N, constituant un ensemble modulaire capable globalement avec le secteur, de 33° d'incidence et 15° de dérivage ;

- une tourelle de paroi (rotation ± 180 degrés) pouvant notamment recevoir l'une des balances de paroi avec traversée d'air comprimé (essai motorisé de 1/2 maquette à la paroi) ou un support d'essai d'arrière-corps.

Plusieurs dispositifs d'essais particuliers sont utilisables dans S2MA : dispositif d'animation de charges captives pour étude de trajectoires sous avion ou de sondage d'écoulement, dont les 6 degrés de liberté sont animés par ordinateur (1976), dispositif de mesure des coefficients de stabilité dynamique par oscillations forcées, etc.

Les dispositifs d'essais, secteur porte-dard et montage à la paroi, sont raccordables aux réseaux d'air comprimé 9 bar, 64 bar (simulation de jets, air moteur pour la simulation des motorisations) et 150 bar (maxi 15 kg/s).

La soufflerie S2MA est équipée d'un dispositif d'ombroscopie. De nombreuses autres techniques de visualisation sont utilisées telles les visualisations de transition par acénaphène ou thermovision infrarouge, les visualisations pariétales par bouillies et fluides colorés.

La chaîne d'acquisition de mesures comprend une dotation de base de 80 voies pouvant être renforcée en cas de besoin et à laquelle peuvent être associés des moyens d'acquisition banalisés spécifiques : essais instationnaires conventionnels ou avec PCM, analyseur Fourier, utilisation des fils et films chauds, etc. Les systèmes de sous-commutation des pressions (scanivalve et PSI) sont couramment utilisés. Comme à S1MA, le traitement des informations est réalisé en temps réel par un ordinateur VAX 782, réservé à la soufflerie.

Exploitation

Après une période de rodage en 1963, qui donne lieu cependant à quelques essais significatifs, l'exploitation industrielle de la soufflerie S2MA débute en 1964. Les essais sont le plus souvent aérodynamiques, mais également *aéroélastiques* en liaison avec la Direction des structures (OR) (figure 33). Les maquettes *aéroélastiquement* semblables, réalisées sous maîtrise d'œuvre du constructeur, sont fabriquées la plupart du temps par l'IMFL (Marc Deschamps, Francis Dupriez).

Les essais au bénéfice des *avions militaires* concernent ainsi successivement le Mirage III V à décollage vertical (1963, 1964), le Jaguar (1966-1974), le Mirage F1 (1968-1976), le Mirage G4 à flèche variable, les entrées d'air dites MNJ du Mirage G8 (1969-1974), l'Alphajet (1974), les aérofreins du Transall (1974), le Super-Mirage (1975), le Mirage 2000 (1976-1978), le Mirage 4000 (1978) et l'ACX-Rafale³³ (1984-1987). Nombreux sont les essais avec charges (missiles, réservoirs), très souvent alors *aéroélastiques* (figure 34). En 1975 est effectuée une importante comparaison vol-soufflerie des résultats pour le Mirage III (Jean-Michel Duc, Jacques Lerat).

Pour les *avions civils*, de nombreux essais intéressent le TSS/Concorde³⁴ (1963-1974), très souvent sur une maquette complète au 1/75^{ème} ou sur la demi-maquette J15 avec simulation des jets de réacteurs. En 1968, un essai important est effectué pour le compte de la BAC Filton sur une grande maquette au 1/10^{ème}. D'autres essais concernent le Mercure (1968-1975), les Falcon 10, 50, 900 et 2000 (figure 35) (1969-1990) et, évidemment, les Airbus A300, A310 (figure 36), A300-600 et A340 (1971-1986). En 1990, des essais sont effectués pour le compte de la Direction des structures (OR), dans le cadre de l'opération DYVAS (Dynamique vibratoire de l'avion souple) en collaboration avec l'Aérospatiale, MBB et le DLR, pour créer une banque de données sur les phénomènes de tremblement, de flottement et sur l'efficacité des gouvernes « rapides » dans l'optique du CCV/CAG (Contrôle actif généralisé).

C'est à S2MA que l'ONERA développe la technique des simulateurs de réacteurs (Jean-Paul Bècle), ultérieurement utilisée à S1MA et F1 (et, plus récemment, à CEPRA19). Les bancs d'étalonnage de ces simulateurs sont créés dans le caisson S4B (voir plus loin, au § 1.3.6), ce qui permet une précision unique et difficilement crédible pour les américains pourtant à l'origine de ces premiers simulateurs. Avant ces TPS (*Turbo Powered Simulators*) – devenus SDR (Simulateurs de réacteurs) lorsqu'ils sont fabriqués en France, avec l'aide de l'ONERA pour les calculs (Georges Meauzé) – des techniques de simulation des entrées d'air et de jets par air comprimé avaient déjà été développées à S2MA.

D'autres essais concernent les *missiles* : Matra R536, Sud-Aviation Bélier (1963), Nord-Aviation SABA, Matra AS 37, MD 620 (1964), NS10 et X422 de Sud-Aviation (1965), Sistel (1971), Matra 550, Crotale, sol-air Matra, corps de rentrée (1974), ASMP (1975), Matra V4 (1976), Roland (1983), ASTER (1987) (figure 37). Deux séries d'essais sont à noter plus particulièrement car ils concernent les fusées-sondes de l'ONERA : Titus (1966), dans le cadre de l'opération menée en liaison avec le CNES pour l'observation d'une éclipse de soleil en Argentine, et Tibère (1968) dans le cadre de l'opération Electre (plasmas de rentrée). La mise en service

³³ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 22.

³⁴ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 50.

en 1976 du dispositif à six degrés de liberté, déjà cité, destiné à l'étude des trajectoires des charges larguées sous avion et remplaçant l'ancien support motorisé à un degré de liberté, facilite notamment l'analyse de la séparation des missiles lors des tirs (figure 38).

Certains essais concernent les *lanceurs* Ariane (1975,1976), Ariane 3 (1981) (figure 39), Ariane 4 (1984), puis le composite Ariane 5-Hermès pour tester son comportement aéroélastique.

Quelques essais sont effectués au profit de l'*étranger*: HFB 320 (1965), Boeing SST (1973), Lockheed T33 (1976).

Enfin, il faut mentionner l'important effort de comparaison des résultats obtenus dans plusieurs souffleries françaises et étrangères sur des *maquettes étalons* (1971), dont les ailes étalons M5 (1972) et M6 (1973) (Bernard Monnerie, Volker Schmitt).

1.3.4 - Soufflerie S3MA

Description

La soufflerie transsonique et supersonique à rafales S3MA (figures 40 et 41), est alimentée à partir du stockage d'air comprimé du Centre (de 500 à 5 500 m³ d'air sous une pression de 9 bar) avec décharge, selon les conditions d'essais, soit à l'atmosphère, soit dans des sphères à vide. La durée utile des rafales varie d'une dizaine de secondes à une dizaine de minutes. Un réchauffeur électrique permet des variations de la température génératrice (330 à 530 K).

Elle comporte plusieurs veines d'essai interchangeables et principalement :

- une veine subsonique et transsonique, $h = 0,78$ m, $l = 0,56$ m, à parois pleines ou perforées, $M = 0,1$ à $1,3$;
- une veine subsonique et transsonique à parois perforées, de même section, pour essais de profils en courant plan ;
- une veine supersonique, $h = 0,80$ m, $l = 0,76$ m, avec des tuyères symétriques à blocs fixes $M = 2$, $M = 3,4$, $M = 4,5$, $M = 5,5$ et une tuyère à Mach variable de $M = 1,7$ à $M = 3,8$, créée dans les années 1980.

La pression génératrice maximale est de 4 bar pour les veines transsoniques, de 4 à 7,5 bar pour la veine supersonique ; avec échappement sous vide, la pression génératrice minimale varie de 0,2 à 1,4 bar selon le nombre de Mach.

Les équipements comprennent :

- un secteur porte-dard télécommandé (incidence ± 12 degrés) pouvant recevoir une motorisation complémentaire en roulis (120 mN) ;
- de nombreux dards, et en particulier un dispositif à coude variable motorisé permettant les essais à très grandes incidences (jusqu'à 90°), qui se montent sur le porte-dard ;
- un montage pour essai de maquettes à la paroi, avec tourelle motorisée, balance de paroi et traversée d'air comprimé, plaque de garde ;
- la possibilité de montages sur mâts au plancher ;
- une installation pour essais d'érosion à la pluie (jusqu'à Mach 0,83).

La soufflerie est desservie par les réseaux d'air 9 bar, 64 bar et 150 bar (simulation de jets).

Un banc optique, placé de part et d'autre de la veine d'essai, permet les visualisations par ombroscopie et strioscopie (champ 800 mm, 300 mm dans la veine courant plan). L'enregistrement est fait sous forme de vidéo rapide, photographies ou films. Un banc ONERA de vélocimétrie laser 2D est utilisable.

De nombreuses techniques de visualisation sont utilisées, telles les visualisations de transition par acénaphène, les visualisations pariétales par huile et pigments colorés. Plusieurs moyens vidéo ou cinématographie rapide sont employés (tirs, restitution de trajectoire).

La chaîne de mesure comprend une dotation de base de plus de 80 voies pouvant être renforcée en cas de besoin, et à laquelle sont associés suivant les essais des moyens d'acquisition particuliers. Comme dans toutes les grandes souffleries de l'ONERA, le traitement des informations est effectué en temps réel.

La soufflerie S3MA est caractérisée par une grande souplesse d'utilisation, en raison de l'accès commode et rapide aux maquettes par une porte motorisée occupant tout le côté de la veine d'essai. L'interchangeabilité des tuyères est également rapide. C'est à S3MA que sont testés et mis en service, avant d'autres installations, les systèmes automatiques de maîtrise des motorisations (installation et maquettes) et des traitements de mesures.

Exploitation

Après une période de mise au point comportant quelques essais en 1959 et 1960, l'exploitation débute véritablement en 1961.

Parmi les essais concernant les *avions militaires*, citons ceux effectués sur maquettes du Mirage IVA et du Mirage IV (1961), du Mirage IIIG à géométrie variable (1967) et sur la maquette BB Rapace (1982) dans le cadre des recherches pour le Rafale.

Quelques *essais aéroélastiques* ont également lieu pour prévenir le flottement : Mirage IV (1959), avion à géométrie variable G8.01 (1973), Alphajet (1974).

D'autres concernent le *largage* de charges ou de missiles autopropulsés : containers sous Mirage IV (1959), engins Matra 511 et 530 (1960) ou réservoirs (1968) sous Mirage IIIC, engin AS30 sous Jaguar (1969) (figure 42), missile Matra Super 530 sous Mirage 2000 (1977).

Des essais d'*érosion à la pluie* sont effectués pour les radômes de l'Etendard (1965), du Mirage IV (1970) et divers radômes de Thomson-CSF (1978).

Les essais concernant les *avions civils* commencent dès 1961 par la comparaison de trois maquettes du TSS (avion de transport supersonique), l'une de Dassault, avec canard, les autres de Nord-Aviation et Sud-Aviation. Ils se poursuivent en 1962 par l'étude de l'échauffement cinétique sur la demi-aile D6, puis par divers essais en 1963, par l'étude de la stabilité dynamique à Mach 2 (1965) et par celle du transfert de chaleur par visualisation pariétale en 1966. De très nombreuses campagnes d'essais ont lieu sur la maquette du Concorde au 1/75^{ème}.

D'autres essais concernent le Mercure (1967), notamment sur le *flottement* en utilisant la méthode d'excitation aléatoire (1971). Le flottement est également étudié sur une demi-maquette dynamiquement semblable de l'Airbus A300-B (1972).

Dans le domaine de la *propulsion*, des essais concernent les inverseurs de poussée des réacteurs à double flux de la SNECMA.

Mais les essais les plus nombreux sont relatifs aux *engins et missiles tactiques*, par exemple le CT41 de Nord-Aviation pour des essais de spoilers (1959) et de largage de chariot (1959) ; les engins Matra 511 et 530, Nord-Aviation 5103 et 5401, Sidewinder, seuls puis placés sous Mirage III, IIIC et IIIE, Etendard IV et IVN, Mirage IV et IVB (1961) ; les engins Matra 536 (1963) et AS37 (1964) ; une partie de l'engin SABA (1964) ; le demi-empennage réel de l'engin MD620, pour des essais de flottement (1964) ; l'engin Latécoère Véronique avec freins déployés (1965) ; l'engin Latécoère 400 (1967) ; le largage des coiffes de l'engin Matra R638 (1967) ; l'engin NS20 (1968) ; la forme des aérofreins de la pointe avant de l'engin Atlas (1970) ; l'engin Matra Super 530 pour l'étude de l'échauffement cinétique à l'aide de peintures thermosensibles (1973) ; le statoréacteur à combustible solide et accélérateur intégré (1974) ; les deux maquettes (respectivement à 4 et 2 prises d'air) de missile probatoire à statofusée (1977) ; le carénage du missile Roland (1980) ; un missile piloté par jets (1981) ; des obus, dans le cadre de l'étude sur la propulsion additionnelle (1981, 1992) ; différentes configuration de missile de croisière (1981) ; le missile HOT (1982) ; le missile ACMP (Anti-char moyenne portée) (1984) ; une demi-maquette échelle grandeur de l'engin MLRS (*Multiple Launch Rocket System*, à sous-munitions) (1984), d'autres essais ont lieu en 1990 et 1991 ; la maquette FIACRE (Faisabilité et intérêt aérodynamique du concept récent d'engin) (1986) ; coiffes de missiles avec pare-vent pour réduire la traînée (1987) ; missile SACP³⁵ 2000 (1989) ; un missile grande vitesse propulsé par statoréacteur (1989) ; le missile ASTER (1990) ; le missile MPSR2, ONERA-Matra (Missile probatoire à stato-fusée rustique 2^{ème} génération) (1991) (figure 43).

Les essais dans le domaine des *missiles balistiques* portent sur la séparation d'étages de SSBS (1966), la combustion au culot du missile Aérospatiale M4 (1986), les corps de rentrée (1962, 1971).

L'*espace* donne également lieu à divers essais. Pour les *lanceurs*, citons : le largage de demi-coiffes protectrices du satellite Topaze, pour la SEREB (1963) ; la mesure des caractéristiques aérodynamiques globales d'Ariane muni de toutes ses protubérances (1976) ; le largage des propulseurs à liquide (PAL) d'Ariane 4 (1984) ; les essais sur le lanceur brésilien VLS (1988) ; la séparation des propulseurs de l'étage d'accélérateurs à poudre (EAP) d'Ariane 5 (1992).

Pour les *véhicules de rentrée*, les essais pour l'ESRO sur maquette de corps de rentrée cylindriques en utilisant la technique du tir à contre courant (1971) ; le montage simulant une tuile du revêtement d'Hermès (1988).

Certains essais relèvent davantage de *recherches et études*. En 1970, trois maquettes homothétiques M1, M2, M3 sont essayées à Mach 0,84 pour évaluer l'effet d'obstruction de la veine. En 1974, l'échauffement cinétique est étudié sur des sphères à l'aide de peintures thermosensibles et cette même année voit la première utilisation de la vélocimétrie laser dans une soufflerie industrielle. En 1976, une recherche expérimentale est conduite avec Lockheed sur le contrôle du décollement

³⁵ Sol-air, courte portée.

en transsonique à grande incidence et l'effet favorable d'un soufflage est mis en évidence.

En vue d'applications CCV/CAG, des essais sont effectués sur un profil d'aile avec gouverne battante (1976), un profil avec volet et spoiler (1980), et le profil RA16SC1 avec spoiler fixe d'extrados et volet de bord de fuite oscillant (1984). En 1981, des résultats d'essais concernant le profil CAST 7 sont comparés avec ceux obtenus dans la soufflerie cryogénique T2 du CERT/DERAT dans le cadre du GARTEur.

En 1984, une nouvelle tuyère à Mach variable de 1,65 à 3,80 est mise en service. En 1992, la soufflerie permet l'étude de la dégradation des images reçues par un équipement optronique à travers un écoulement aérodynamique. Des essais sur les profils supercritiques et les profils pour pales d'hélicoptères sont également à signaler.

Enfin, au titre de la *diversification*, il faut citer les essais effectués hors du secteur aérospatial concernant la stabilité aéroélastique du pont de Saint-Nazaire à Saint-Brévin (1973), des ponts mexicains de Tampico et de Coat-Zacoalcos (1981), et du Pont de Normandie (1987).

1.3.5 - Soufflerie S4MA

Historique

L'exploration du domaine hypersonique est envisagée dès le projet initial du CMA. Dans une première proposition de 1947, il est question de couvrir l'hypersonique et le supersonique avec la même installation, nommée M8. Cinq compresseurs seraient entraînés par des turbines hydrauliques Pelton. Trois circuits seraient branchés en parallèle.

En 1948, S4 se substitue à M8. Il est alors question de détendre l'air atmosphérique dans un réservoir dans lequel on a fait le vide.

Vers 1956, S4 est différé au profit des souffleries de recherche de Chalais-Meudon (Pierre Carrière), mais les réflexions se poursuivent. Pour ne pas avoir une température trop basse après détente, il faut chauffer préalablement l'air. Le chauffage électrique direct conduirait à de trop petites installations. Le chauffage par accumulation utilisant des métaux limiterait la température génératrice à environ 450°C. L'utilisation d'une masse réfractaire, comme le préconise Hugues de l'Estoile après enquête aux Etats-Unis (NASA Langley et Ames) permet d'aller jusqu'à environ 1 900°C. Mais l'utilisation de billes de zirconium présentant des risques, comme le montre un accident survenu aux Etats-Unis en 1962, il leur est donc préféré des billes d'alumine qui permettent d'atteindre 1 600°C. Il reste prudent d'installer la soufflerie en galerie. Les problèmes les plus délicats concernent le réchauffeur et la vanne à ouverture rapide. Les rafales doivent pouvoir se succéder à une heure d'intervalle, dans une journée de huit heures. Dans l'année, quelque 800 rafales doivent pouvoir être exécutées.

La construction démarre en 1963. La pièce maîtresse est le réchauffeur, réservoir cylindrique de 1,90 m de diamètre et 9 m de haut, qui contient sur 3 m de hauteur 11 t de billes d'alumine de 19 mm de diamètre.

Après une période de mise en route et de premiers essais en 1969, l'exploitation commence véritablement en 1970, avec la tuyère $M = 6,4$.

Description

La soufflerie hypersonique à rafales S4MA (figures 44 et 45) est alimentée à partir du stockage d'air comprimé haute pression du Centre (29 m³ sous une pression de 270 ou 400 bar), avec éjection soit à l'atmosphère, soit dans des sphères à vide (3 000 ou 4 000 m³). Le réchauffeur peut être porté à une température maximale de 1 850 K par combustion de propane. L'air sortant du réchauffeur est filtré à 10 micromètres en amont de la tuyère. Au début, la soufflerie ne possède qu'une tuyère Mach 6,4, de diamètre de sortie 0,68 m, refroidie par eau. L'équipement est complété, en 1989, par deux tuyères supplémentaires, Mach 10 et 12 (diamètre de sortie 1 m environ). La pression génératrice maximale pour M = 6,4 est de 40 bar ; elle est de 150 bar pour les tuyères à Mach supérieur.

Le caisson d'essai, de forme cubique, de 3 m de côté, est équipé d'une table de mise en incidence (± 15 degrés, vitesse de 2 à 5,5 degrés/seconde) et dérapage (± 50 degrés, vitesse de 2,8 à 11 degrés/seconde).

Un dispositif d'introduction rapide permet de soustraire la maquette aux effets d'amorçage et de désamorçage.

Une chaîne d'acquisition de mesures de 40 voies, avec possibilité d'extension par les moyens banalisés du centre, est associée à la soufflerie S4. Cette chaîne est reliée au VAX 750 des installations à rafales.

Les installations de S4MA sont aussi utilisées comme générateur de gaz chauds pour l'alimentation des prises d'air de statoréacteurs.

Exploitation

L'exploitation de la soufflerie S4 débute en 1970. Après un premier essai sur l'engin VERAS (Véhicule expérimental de recherches aérodynamiques et structurales) de Nord-Aviation, soutenu par la DRME, la soufflerie est essentiellement utilisée pendant plus de dix ans comme *générateur de gaz chauds* pour des essais de statoréacteurs.

Les essais sur le statoréacteur hypersonique ESOPE (Roger Marguet, Charles Huet) se font en deux séries (1970, 1972).

Le projet de missile SCORPION (à statoréacteur à 4 prises d'air latérales (Jean Trichard, Gérard Laruelle), soutenu par le CPE, donne lieu à des essais en 1973.

En 1979, l'ONERA propose à la DTEn le concept de missile statofusée à combustible solide et à accélérateur intégré, à quatre prises d'air latérales, pouvant voler à Mach 2 et à basse altitude (Roger Marguet, Philippe Cazin). Un essai de synthèse a lieu en 1975 dans S4MA, qui a dû être adaptée à ce type d'expérimentation. En 1976, les entrées d'air sont essayées à Mach 2, un second essai de synthèse est effectué et un tir réussi a lieu au CEL. En 1978, un nouvel essai a lieu dans S4MA sur une maquette pilotée.

Deux autres statofusées sont également essayés. Une maquette de l'Aérospatiale à quatre prises d'air biconiques, à statoréacteur à kérosène, est essayée avec un accélérateur alimenté avec de l'azote (1977), puis avec un accélérateur à poudre (1978). Une maquette de Matra à une prise d'air de révolution, à l'échelle 1/2, donne lieu à trois rafales en 1978.

En 1978, le STET demande l'extension des performances de S4MA pour mettre à disposition de l'Aérospatiale une installation capable de réaliser des essais de

transition et de combustion sur des éléments à échelle grandeur du missile ASMP (Air-sol moyenne portée) dont les essais s'étalent de 1979 à 1985 (figure 46).

En 1982 a lieu un essai de synthèse du SIMS (Statoréacteur intégré modulable solide) avec la SNPE, avec simulation de trajectoires « bas-haut-bas ».

Outre ces essais sur les statoréacteurs, quelques essais font appel à S4MA comme véritable *soufflerie hypersonique*³⁶. En 1973, a lieu l'essai d'une tête de rentrée Thesa. En 1973 et 1976, la soufflerie sert à l'étude de la tenue du matériau des radômes d'engins en silice vitreuse refrittée, dans un écoulement à haute enthalpie (25 bar, 1 650 K), en liaison avec les essais faits au four solaire d'Odeillo.

Vers le milieu des années 1980, à la demande du CNES en vue d'essais sur l'avion spatial Hermès, S4MA est remise dans son état d'origine de soufflerie hypersonique. En 1989 la tuyère Mach 10 est mise en service. Entre 1986 et 1992, plus de mille rafales concernent Hermès (figure 47).

En 1991, à la demande de Cryospace dans le cadre du programme Ariane 5, ont lieu des essais d'érosion thermomécanique destinés à caractériser les matériaux d'isolation des réservoirs cryotechniques.

Suit maintenant une description d'autres moyens du Centre de Modane tels qu'ils se présentent au début des années 1990.

1.3.6 - Caisson S4B

Le caisson réglementation-essais S4B (figure 48) de 2,5 m de diamètre et 10 m de long peut être vidé jusqu'à une pression de 15 mbar. Construit pour des essais de séparation d'étages de fusée (ELDO), il est ensuite essentiellement utilisé pour des étalonnages de nacelles de simulation de jet ou de nacelles motorisées par simulateur de réacteur (un banc pour les TPS jusqu'à 150 mm et un banc pour les TPS de 230 mm).

1.3.7 - Soufflerie de grilles R4.3

La soufflerie de grille R4.3 (figure 49), à rafales longues (plus de 10 minutes), est utilisée pour des essais de grilles d'aubes de turbomachines (1977). Elle est alimentée à partir du stockage d'air comprimé 9 bar du centre, avec éjection à l'atmosphère. Elle dispose de deux veines d'essais, de largeur 120 mm :

- une veine transsonique, de hauteur variable (de 210 mm à 370 mm) selon l'inclinaison de la grille. La pression génératrice maximale est de 2,5 bar ;
- une veine supersonique, de hauteur 600 mm, avec tuyère $M = 1,45$.

L'équipement comprend un dispositif de mise en incidence de la grille, un dispositif d'aspiration des couches limites réglable, un peigne pour exploration automatique des sillages, de nombreux éléments motorisés (diffuseur, volet, etc.) pour le réglage de l'écoulement, un dispositif d'ombroscopie. Une installation à rafales adaptée à des essais spéciaux, et notamment aux essais d'arrière-corps de nacelles avec écoulement externe, est implantée parallèlement à la soufflerie R4.3.

³⁶ Soufflerie hypersonique « froide » dans laquelle la température génératrice est juste nécessaire pour éviter la liquéfaction de l'air à la détente. A distinguer d'une soufflerie « à haute enthalpie » comme F4 (voir plus loin, au § 1.4.3).

1.3.8 - Bancs de dynalpie³⁷ à gaz froid (BD1) et à gaz chaud (BD2)

Alimentés à partir du réseau haute pression du Centre, avec éjection à l'atmosphère, ces deux bancs d'essais sont utilisés pour l'étude des tuyères et des arrière-corps de réacteurs à un ou plusieurs flux d'alimentation.

- BD1 : le débit primaire maximal est de 20 kg/s, la pression maximale de 12 bar, le débit secondaire maximal est de 8 kg/s. La capacité du dynamomètre de poussée est de 13 000 N. Le banc BD1 a été créé pour les études d'arrière-corps du Concorde ;

- BD2 (figures 50 et 51) : les débits maximaux sont de 17 kg/s pour le primaire et de 12 kg/s pour le secondaire. La pression maximale est de 25 bar et la température maximale 1 000 K. La capacité du dynamomètre de poussée est de 13 000 N.

La chaîne de mesures comprend 32 voies. Le traitement est assuré sur VAX 750.

1.3.9 - Bancs d'étalonnages dynamométriques

Les balances dynamométriques utilisées au CMA et au CFM (Centre du Fauga-Mauzac) sont des équipements essentiels des souffleries. Elles sont étudiées par le bureau d'études de Châtillon avec l'aide de programmes d'éléments finis. Elles sont équipées (jauge classique ou jauge à semi-conducteurs) et étalonnées au Centre de Modane-Avrieux. L'ONERA acquiert ainsi une grande expérience et une réputation mondiale dans ce domaine particulièrement important pour assurer la qualité des essais.

Cette expérience porte sur les balances dard monobloc à 6 composantes, sur les balances dard assemblées, sur les balances de parois à dynamomètres assemblés, les balances particulières (balance d'hélice, d'abord fixe, puis tournante, au début des années 2000), sur les équipements dynamométriques locaux des maquettes.

Des améliorations permanentes sont obtenues concernant l'accroissement des capacités à précision et encombrement donnés, l'accroissement de la raideur des structures dynamométriques, la compensation des effets thermiques, le découpage des alimentations en air comprimé.

Deux bancs appropriés aux balances à six composantes et un banc destiné aux dynamomètres à une composante sont utilisés pour les étalonnages au CMA :

- un banc d'étalonnage à 6 composantes, de capacité 10 kN ;
- un banc d'étalonnage à 6 composantes, de capacité 150 kN ;
- un banc de 250 kN, permettant d'étalonner les dynamomètres en traction ou compression. Ce banc est agréé par le BNM (Bureau national de métrologie). Sa précision est de $2 \cdot 10^{-5}$ de la charge appliquée.

1.3.10 - Moyens informatiques

Vers 1990, le CMA dispose de moyens informatiques puissants permettant l'acquisition de débits très élevés de mesures et leur traitement en temps réel³⁸. La capacité de calcul donne des possibilités d'exploitation des résultats en léger différé,

³⁷ Grandeur permettant notamment d'exprimer aisément la poussée d'une nacelle propulsive.

³⁸ Ces moyens, mis en place depuis le milieu des années 1970 (en commençant par S3MA), ont remplacé les moyens d'acquisition CII 10010 et de dépouillement CII 10020 qui, eux-mêmes, avaient remplacé les rubans perforés dépouillés à Châtillon, et la règle millimétrée utilisée dans le dépouillement des bandes papier enregistrées !

allant au-delà des dépouillements classiques, et préparant l'exploitation complète faite dans les bureaux d'études des clients. Les systèmes d'acquisition sont constitués autour d'ordinateurs HP 1000. Pour le traitement des mesures, les souffleries S1MA et S2MA disposent localement chacune d'un ordinateur VAX 782.

Deux ordinateurs VAX 750 sont implantés dans le bâtiment informatique ; ils assurent trois fonctions distinctes : traitement des mesures des souffleries à rafales S3MA, S4MA, et des installations spécialisées ; préparation des essais, mise au point des programmes de traitement ; secours éventuel en cas de panne sur les ordinateurs de S1MA et S2MA.

Étant donné la fiabilité des matériels, cette dernière fonction n'est en fait pas utilisée. Des liaisons existent entre le bâtiment informatique et le bâtiment d'exploitation où sont situés les bureaux des ingénieurs d'essai. Un réseau DECNET relie les quatre ordinateurs du Centre, autorisant, en cas de besoin, et par procédure assurant la confidentialité, des transferts de charge d'un ordinateur à l'autre. Le remplacement des ordinateurs VAX anciens par des ordinateurs plus puissants est effectué vers 1990.

Les divers logiciels mis au point donnent une grande souplesse dans l'exécution des essais. Ils représentent, pour les systèmes d'acquisition, un volume d'environ 10 000 instructions Fortran et 40 000 instructions en langage assembleur, et, pour les systèmes de traitement, environ 110 000 instructions Fortran (commentaires exclus).

Des moyens particuliers sont utilisés pour les mesures à très grandes cadences, en instationnaire par exemple, pour l'analyse des distorsions dans les prises d'air : les mesures de pression dans le plan d'entrée du compresseur sont enregistrées sur bande PCM, pour exploitation complète en différé. Un système d'acquisition rapide, à déclenchement conditionnel, peut enregistrer 256 cartes de pression, à une cadence maximale de 16 kHz, qui sont traitées en temps quasi-réel par le VAX 782. Une « boîte » spéciale calcule en temps réel les coefficients de distorsion. L'ingénieur d'essais dispose ainsi en temps réel d'informations suffisantes pour conduire l'essai et infléchir éventuellement le programme.

1.3.11 - Réseaux d'air comprimé

Ces réseaux sont essentiels pour le fonctionnement des souffleries, aussi sont-ils toujours maintenus à niveau.

La production d'air comprimé à 9 bar est assurée par trois compresseurs centrifuges identiques, entraînés chacun par une petite turbine Pelton. Le débit de chaque compresseur est de 7 kg/s. Le volume de stockage peut varier de 500 à 5 500 m³. Les compresseurs peuvent être utilisés en pompes à vide et pour vider les sphères jusqu'à une pression de 100 mbar. Une pompe centrifuge, entraînée par moteur électrique, permet de descendre la pression jusqu'à 15 mbar environ.

Un compresseur à pistons, de débit nominal 3 kg/s à pression de refoulement 270 bar, est alimenté par la réserve d'air à 9 bar. Le volume de stockage est de 29 m³. Pour certains usages, ce stockage peut être porté à 400 bar, par un compresseur 9 bar-400 bar, de débit 0,36 kg/s.

Le stockage haute pression alimente par l'intermédiaire d'un détendeur la soufflerie S4MA (pression maximale 150 bar). Un réseau de distribution à 64 bar dessert les diverses installations (S1, S2, S3, S4.B, BD, R4), un réchauffeur permettant de porter l'air à une température comprise entre l'ambiante et 85°C (en fonctionnement continu de 0 à 3 kg/s, par rafales de 3 à 16 kg/s). Les souffleries S2MA et S3MA disposent, de plus, d'une alimentation en air comprimé haute pression jusqu'à 150 bar, 3 kg/s en continu, 15 kg/s par rafales.

Les moyens en air comprimé sont améliorés à partir de 1988 :

- augmentation de la capacité de stockage d'air à haute pression (270 bar) qui passe de 29 m³ à 69 m³ puis 109 m³ ;
- développement des réseaux de distribution ;
- augmentation de 3 kg/s à 6 kg/s du débit de production d'air comprimé haute pression (270 bar) ;
- mise en place d'une sphère supplémentaire de 4 000 m³ pour une pression de 9 bar ou le vide.

Avant de clore cette section relative au CMA, rappelons que ce Centre a été dirigé successivement par Georges Bardin, puis Jean Laverré, et que Maurice Daniel a été pendant plusieurs années responsable des essais.

1.4 - Centre du Fauga-Mauzac

1.4.1 - Introduction

De création plus récente (1973), dans le cadre de la politique de décentralisation de l'époque, le Centre du Fauga-Mauzac (CFM) (figure 52) dispose, à 30 km au sud de Toulouse, en bordure de la Garonne, d'un vaste terrain de 1,5 km² de superficie³⁹. Outre les souffleries F1, F2 et F4, ce Centre comprend des installations appartenant à d'autres directions de l'ONERA. Certaines sont évoquées dans le document *Etudes et Recherches* du COMAERO, où est également présentée la soufflerie F2 à vocation recherche.

1.4.2 - Soufflerie F1

Introduction

Les premiers travaux de construction de la soufflerie F1 (figure 53) débutent en 1974. Cette soufflerie subsonique (123 m/s) a pour vocation les études d'hypersustentation liées au développement des programmes d'avions de transport civil dont l'augmentation des dimensions nécessite de veiller plus particulièrement aux effets de nombres de Reynolds⁴⁰ de vol de plus en plus élevés.

Les concepteurs de F1 imaginent alors des solutions en avance sur leur temps qui font de F1, aujourd'hui encore, un modèle d'efficacité dont s'inspirent les grands projets à l'étranger : soufflerie continue, pressurisée à 4 bar, construite en béton précontraint, elle est équipée de palettes dotées de leur propre système d'acquisition permettant la succession rapide des essais sans occupation inutile de la soufflerie, et un accès direct aux maquettes sans dépressurisation complète du circuit.

³⁹ Ce terrain était initialement destiné à l'implantation d'une usine de fabrication d'explosifs pour l'OTAN.

⁴⁰ Voir § 1.1 et Figs. 1 et 2.

L'adaptation permanente des moyens permettra ensuite d'ouvrir le créneau des avions de transport régionaux, avec la possibilité de simuler les motorisations des turbopropulseurs.

Description

Mise en service en 1977, la soufflerie subsonique, pressurisée, à fonctionnement continu F1 (figure 54) est animée par un ventilateur à pas variable et régime constant, entraîné par un moteur électrique de puissance maximale 9,5 MW. Le refroidissement est assuré par un réfrigérant à eau. La pression maximale est de 4 bar, la vitesse maximale de 123 m/s, correspondant à un Mach de 0,36. La veine, de section rectangulaire, hauteur 3,50 m, largeur 4,50 m, a une longueur de 10 m. La pressurisation permet d'atteindre un Reynolds de 8×10^6 .

La veine d'essai est placée à l'intérieur d'un chariot mobile (figure 55) qui peut se déplacer sur rails le long des alvéoles de préparation. Les parois latérales et le plafond de la veine restent fixés au chariot, mais le plancher, qui supporte les dispositifs d'essais, est amovible. Cet ensemble amovible est appelé « palette ». Après un essai, la palette utilisée est sortie du chariot et placée dans un alvéole, puis le chariot reçoit la palette de l'essai suivant et reprend sa place dans le circuit. La sortie du chariot peut s'effectuer sans dépressurisation de l'ensemble du circuit, grâce à la présence de deux portes escamotables d'isolement placées de part et d'autre de la veine d'expérience. Le volume à dépressuriser est ainsi limité à 450 m^3 , à comparer au volume total de $13\,000 \text{ m}^3$.

La soufflerie dispose de 4 palettes complètement équipées. Chaque palette porte sa propre chaîne de mesure, à 64 voies, reliée à l'ordinateur VAX 782 de la soufflerie. Au cours de la préparation d'essai, faite en alvéole, tous les circuits de mesures et le programme de dépouillement sont vérifiés. Le passage de la palette dans le chariot, pour l'essai, se fait sans débranchement des circuits à bas niveau, seule la liaison entre l'ordinateur HP 1 000 d'acquisition de la chaîne et le VAX 782 étant interrompue pendant le déplacement.

Les moyens informatiques de la soufflerie F1 sont analogues à ceux de S1MA et de S2MA, présentés plus haut. Ils sont remplacés par des moyens plus puissants en 1990. La chaîne de mesures instationnaires est également utilisée à F1.

Palette n° 1

Elle est équipée d'un secteur porte-dard piloté par ordinateur (variation en incidence : 42 degrés à une vitesse variable jusqu'à 1 degré/seconde, variation $\pm 180^\circ$ en roulis). Un mouvement supplémentaire de rotation en incidence de la ligne de dard par rapport au secteur permet, soit d'augmenter le domaine de variation d'incidence de $\pm 10^\circ$, soit de maintenir le centre de rotation de la maquette à altitude constante. Un dard (alpha, bêta), avec motorisation en roulis, est utilisé pour les essais en incidence et dérapage.

Palettes n°2, 3 et 4

Les équipements comprennent :

- Une tourelle pouvant supporter, soit une balance à 6 composantes, pour essais de demi-maquettes à la paroi ou de maquettes complètes sur un support 3 mâts, soit une table d'incidence pour essais de maquettes complètes montées sur monomât. La palette n°4 est dotée d'une seconde position de tourelle permettant l'implantation

des maquettes très en amont dans la veine. Un dispositif spécial placé sur le dynamomètre de traînée de la balance de paroi permet le choix entre deux capacités ($\pm 10\,000\text{ N}$ et $\pm 25\,000\text{ N}$) dans le but de mieux adapter la balance aux efforts à mesurer sur une maquette, selon qu'elle est en configuration lisse ou en configuration hypersustentée, ou selon les conditions génératrices de l'essai.

Les efforts sont mesurés dans des axes liés à la maquette. Ce montage peut être complété par une tourelle supérieure pesée et un disque tournant, de façon à mesurer les efforts dans les axes Eiffel, liés au vent.

- Un dispositif, dit « $2k\pi$ », pour essais de maquettes à de très grands angles d'incidence et de dérapage. Il est constitué d'un support en arc de cercle monté sur la tourelle et la table d'incidence et lié, par l'intermédiaire d'une tête motorisée en roulis, au dard porte-maquette.

- Un dispositif d'essais de prises d'air d'avion de transport. Le débit capté par la prise d'air est réglé et mesuré par un système de vannes et de débitmètres placés sur la canalisation de mise en communication à l'atmosphère. Le débit maximal possible est de 75 kg/s pour une pression génératrice de 4 bar . La maquette peut être placée face au vent, sur un montage à rotule permettant de régler l'incidence et le dérapage ($\alpha_{\text{max}} = 35\text{ degrés}$, $\beta_{\text{max}} = 15\text{ degrés}$). L'influence du vent transversal à très faible vitesse, ou au point fixe, est étudiée en disposant verticalement dans la veine, sur le conduit d'extraction, l'ensemble constitué par la prise d'air et son support articulé.

- Un montage d'essais de profils en courant plan. Trois valeurs de l'écartement des panneaux sont possibles : 1 m ; $1,50\text{ m}$ et 2 m . L'incidence de la maquette est commandée par une tourelle motorisée. Les panneaux sont munis, au droit de la maquette, de dispositifs d'aspiration de couche limite, en vue d'assurer la bidimensionnalité de l'écoulement. Un dispositif de sondage, piloté par ordinateur, permet l'exploration du sillage et de l'écoulement autour du profil.

La soufflerie F1 est desservie par les réseaux d'air 11 bar pour la pressurisation et 120 bar pour les simulations de motorisation.

Des dispositifs d'essais particuliers sont utilisés dans F1 : dispositif de sondage d'écoulement à 4 degrés de liberté avec ou sans mât de translation verticale, dispositif à 6 degrés de liberté, dispositif de sondage de prise d'air.

Les techniques d'acquisition particulières, fils et films chauds, commutateurs de pressions (scanivalve et PSI) sont couramment utilisées.

Plusieurs techniques de visualisation sont utilisées : visualisation de transition par acénaphène ou thermographie infrarouge, visualisation pariétale par bouillies et pigments colorés, par fils en lumière noire, etc. Un montage de tomoscopie laser installé sur le plafond fixe de la veine et commun à toutes les palettes permet les visualisations par fumées.

Un vélocimètre laser 2D peut être installé sur l'une des parois latérales de F1.

Les dispositifs de mesure des déformations déjà évoqués pour S1MA (détecteurs optiques, torsiomètre polarisé, caméras CCD) peuvent fonctionner dans F1.

Exploitation

Les figures 56 à 59 rappellent quelques essais effectués dans la soufflerie F1⁴¹.

⁴¹ Voir également le fascicule *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Figs. 22, 33, 41.

Conclusion

En Europe occidentale, il n'existe que trois souffleries subsoniques, avec veine de grandes dimensions :

- la soufflerie DNW germano-hollandaise installée aux Pays-Bas, dont les caractéristiques (veine de 8 m x 6 m, et pression atmosphérique) conviennent aux essais d'aérodynamique et d'aéroacoustique à faible vitesse, tant pour l'industrie automobile, jusque dans les années 1990, que pour l'industrie aéronautique, mais moins bien pour l'étude de l'effet du nombre de Reynolds ;
- la soufflerie RAE 5 mètres⁴², installée à Farnborough (veine de 5 m x 5 m, et pression de 1 à 5 bar), bien adaptée à l'étude de l'effet Reynolds sur l'hypersustentation des avions ;
- la soufflerie F1 de l'ONERA au Centre du Fauga-Mauzac (veine de 4,5 m x 3,5 m et pression de 1 à 4 bar) parfaitement conçue pour effectuer, avec précision, fidélité et confidentialité, les essais des grands avions de transport, avec simulation du fonctionnement des moteurs au décollage et à l'atterrissage.

Les performances de la soufflerie F1, en nombre de Reynolds, sont intéressantes : 8 millions, à Mach 0,36, à comparer à 3,5 millions, à Mach 0,25, pour DNW. Pour obtenir des nombres de Reynolds plus élevés, il faut utiliser des souffleries fonctionnant à très basse température, telles que la soufflerie européenne ETW⁴³ (*European Transonic Wind-tunnel*) (figure 60), installée à Cologne, dans laquelle l'ONERA est actionnaire (31 %). Fonctionnant avec de l'azote pressurisé à 4,5 bar, à -150°C, dans une veine de 2 m x 2,4 m, ETW permet d'obtenir, à Mach 0,8, un Reynolds de 50 millions, qui est très voisin de celui d'un gros avion de transport, en vol de croisière.

Les souffleries de l'ONERA, F1 et S1MA (cette dernière capable d'un Reynolds de 8 millions, à Mach 0,8) sont complémentaires entre elles, ainsi qu'avec la soufflerie européenne ETW.

La compétence acquise par les équipes de l'ONERA, avec les souffleries de Modane et du Fauga, ainsi qu'avec celles de l'IMFL à Lille, a été très précieuse pour concevoir, réaliser et exploiter ETW depuis la fin des années 1990, en coopération avec les autres partenaires (Allemagne, Royaume-Uni, Pays-Bas).

1.4.3 - Soufflerie F4⁴⁴

Introduction

Lors de leur rentrée dans l'atmosphère, les missiles balistiques stratégiques et les véhicules spatiaux subissent des phénomènes physico-chimiques intenses et complexes. L'ONERA commence leur étude, dès 1965, en effectuant des calculs et des simulations dans des souffleries hypersoniques à rafales (Jean-Pierre Chevallier). La soufflerie Arc 2 utilise alors les installations de l'EDF à Fontenay et les résultats d'essais permettent de valider les calculs et de procéder au tir de la fusée Tibère de l'ONERA, au Centre d'essais des Landes (CEL) en 1971 et 1972. Cette opération « ELECTRE » constitue une grande « première », car elle fournit des

⁴² Cette soufflerie a connu des fermetures et elle est aujourd'hui essentiellement utilisée par Boeing.

⁴³ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie I, Chapitre 2, § 3. Rappelons que Xavier Bouis, de l'ONERA, a été le représentant français dans le groupe de projet international de ETW, avant de devenir directeur-adjoint (1988-92) puis directeur général (1992-93).

⁴⁴ Par Jean Carpentier.

données essentielles pour la compréhension des phénomènes d'ionisation dans la couche de choc lors de la rentrée hypersonique des missiles balistiques français.

En 1985, la décision du CNES de lancer l'étude du véhicule aérospatial Hermès conduit l'ONERA à reprendre ses travaux en hypersonique, dans les conditions de la rentrée des véhicules spatiaux. La question se pose alors de choisir entre une « soufflerie numérique » (c'est-à-dire de tout miser sur les calculs) et un moyen expérimental suffisamment représentatif. C'est l'occasion d'un échange de vues très approfondi entre le CNES et l'ONERA. Le professeur Jacques-Louis Lions, spécialiste de l'analyse numérique dans lequel il a acquis une renommée mondiale, préside alors le CNES. Claude Capelier, Directeur de l'aérodynamique (OA) à l'ONERA, le convainc que, pour valider les calculs des effets aérothermiques à la rentrée, il faut disposer d'un moyen expérimental, encore plus puissant et davantage instrumenté que la soufflerie Arc 2, qui, d'ailleurs, ne peut plus être mise en service à Fontenay-aux-Roses, en raison de son trop grand appel de puissance au réseau électrique de la région parisienne.

Ce nouveau moyen expérimental est la soufflerie à haute enthalpie F4, que l'ONERA a conçue, sous l'impulsion du grand aérodynamicien Pierre Carrière, spécialement pour l'étude de l'écoulement autour des véhicules spatiaux au cours de leur rentrée dans l'atmosphère. Ceux-ci subissent alors des phénomènes aérothermo-chimiques très complexes. Les rentrées de missions orbitales s'effectuent vers 7,5 km/seconde. Pour les rentrées de missions lunaires ou en provenance de l'espace lointain, la vitesse dépasse 10 km/seconde. A ces vitesses, à partir de 80 km d'altitude, les molécules d'oxygène et d'azote de l'air sont excitées en vibration, puis se dissocient derrière l'onde de choc créée par le véhicule. Les atomes résultant de ces dissociations s'ionisent, d'où le « black-out » pour les télécommunications. L'écoulement, d'abord moléculaire devient continu. Il est caractérisé par une couche limite épaisse qui interagit avec l'écoulement extérieur.

C'est le « régime d'interaction visqueuse », dominé par la valeur élevée du paramètre de similitude M/\sqrt{Re} (M : Mach, Re : Reynolds) appelé paramètre de raréfaction. Le véhicule décélère rapidement, du fait de l'accroissement de la densité atmosphérique, les flux thermiques sont les plus élevés, l'écoulement est celui du régime d'« hypervélocité à haute densité », caractérisé par des effets de gaz réels, avec dissociation des molécules et recombinaison.

Ensuite, l'écoulement devient plus classique, avec les effets de Mach et de Reynolds ; il est dominé par l'état de la couche limite (laminaire, transitionnel, turbulent). Les lois physiques dans cette phase sont relativement bien connues ; elles tiennent compte de la température élevée des parois.

La phase la plus difficile à simuler au sol est celle du régime d'hypervélocité. Les mécanismes prépondérants sont la dissociation et la recombinaison de l'oxygène et de l'azote, qui se produisent dans la gamme de vitesses de 7,5 à 3 km/s. La dissociation des molécules dépend du nombre de collisions entre elles. Aussi fait-on intervenir des paramètres de cinétique chimique, tels que le produit de la densité par une longueur caractéristique (pour les collisions binaires) et le produit du carré de la densité par la longueur caractéristique (pour les collisions triples).

Description

La soufflerie F4 (figures 61 et 62) utilise l'énergie transmise au gaz (azote pur ou air de synthèse) par un arc électrique alimenté par un générateur pouvant délivrer

150 MW pendant plusieurs dizaines de millisecondes. Cette énergie est stockée dans un volant d'inertie de 15 tonnes tournant à 6 000 tours/minute. La pression d'arrêt peut atteindre 2 000 bar et l'enthalpie d'arrêt 15 MJ/kg avec l'azote. Dans la veine d'essai, la vitesse du gaz peut alors atteindre 5 000 m/s. La veine d'essai à jet libre représente un cylindre de 0,6 m de long et de 0,4 m de diamètre. Ceci permet d'utiliser des maquettes de dimensions raisonnables, par exemple une maquette de la navette américaine à l'échelle 1/90.

F4 peut fonctionner avec plusieurs tuyères différentes, ce qui permet d'obtenir différentes valeurs du paramètre de cinétique chimique et du paramètre d'interaction visqueuse. La durée des essais est de 50 à 100 millisecondes, très supérieure à celle (de l'ordre de la milliseconde) des autres souffleries existantes.

F4 est dotée de dispositifs de mesure ayant des performances élevées : balances dynamométriques (avec correction des forces d'inertie) (figure 63), capteurs de pression et jauges de température à très faible temps de réponse, visualisation de l'écoulement par strioscopie, détermination de la température de l'écoulement et de sa composition chimique, par des techniques non intrusives, telles que la Diffusion Raman anti-Stokes cohérente (DRASC) (Jean-Pierre Taran) ou l'absorption infrarouge par diode laser. La vitesse de l'écoulement peut être mesurée directement, par le décalage, en translation, de la décharge électronique très rapide d'un canon à électrons.

Exploitation

La soufflerie à haute enthalpie F4, mise en service en 1992, a bénéficié de la compétence acquise au cours de plusieurs décennies par les aérodynamiciens et les physiciens⁴⁵ de l'ONERA. Elle a largement été utilisée à l'occasion du projet Hermès. Elle est le moyen sol de simulation le plus représentatif⁴⁶ des phénomènes de rentrée spatiale et le mieux instrumenté, parmi ceux qui sont actuellement disponibles dans le monde entier.

1.4.4 - Réseaux d'air comprimé

Le réseau basse pression (11 bar) du Fauga est alimenté soit par le compresseur centrifuge BP1 (débit 5,5 kg/s), soit par les compresseurs BP1 et BP2 (3 kg/s), travaillant en parallèle. Le réservoir, à partir duquel s'opère la pressurisation de la soufflerie F1, a un volume de 300 m³.

L'air haute pression (270 bar) est fourni par un compresseur à pistons (débit 3 kg/s), fonctionnant en série avec le compresseur BP2. Le réservoir de stockage a un volume de 40 m³. Pour son utilisation, l'air est d'abord détendu à une pression réglable entre 60 et 120 bar et un réchauffeur primaire ramène sa température à 20°C. Il est ensuite détendu à la pression d'essai ; un réchauffeur secondaire permet d'obtenir la température désirée.

Un banc d'essai de simulateur de réacteur (TPS), utilisant le réseau d'air comprimé et les moyens ONERA de pilotage des simulateurs, est utilisé par les industriels pour la mise au point et la maintenance de ces machines.

⁴⁵ La principale difficulté de la mise au point a été la maîtrise de l'arc électrique et la détérioration des électrodes pendant la durée de l'arc, ce qui polluait l'écoulement. Il a alors fallu également faire appel aux compétences de l'ONERA dans le domaine des matériaux.

⁴⁶ Il n'est pas possible de simuler expérimentalement, à échelle réduite, la globalité des phénomènes. Seul le calcul numérique permet une synthèse basée sur des extrapolations, et un moyen comme F4 permet de concevoir et de valider les composants numériques entrant dans cette synthèse.

Avant de clore cette section relative au CFM, rappelons que ce Centre a été dirigé successivement par Henri Chareyre puis Jean-Marie Carrara.

1.4.5 - La direction des Grands moyens d'essais (GME)

Comme il a été vu plus haut, 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 du Fauga-Mauzac, la Direction des Grands moyens d'essais (GME), dirigée par Gérard Dorey, puis par Xavier Bouis (1994)⁴⁷.

Au début des années 1990, les grandes souffleries des centres de Modane et du Fauga, dont les caractéristiques sont rappelées sur la figure 64, relèvent donc de la Direction GME qu'il semble utile de présenter avec quelque détail compte tenu du rôle très important qu'elle a joué dans le développement des programmes aérospatiaux.

La première mission de GME est alors d'assurer une assistance technique à l'industrie et aux équipes de recherche du secteur aérospatial sous forme d'exécution d'essais dans ses installations de Modane et du Fauga. Cette assistance peut consister également en une collaboration à la préparation et à l'exécution d'essais effectués dans d'autres laboratoires, français ou étrangers. Ce rôle implique un développement des méthodes et des moyens d'essais, conduit en accord avec les services d'État et les constructeurs, et en liaison avec les autres directions de l'ONERA.

La seconde mission concerne l'étude et la réalisation, pour le compte d'autres directions de l'ONERA, d'installations ou d'équipements importants ou complexes dont elles ont la maîtrise de l'ouvrage, la Direction GME étant maître d'oeuvre. Cette activité est exercée par la Division ingénierie, implantée à Châtillon.

En plus de ces deux missions essentielles, la Direction GME peut être amenée à fournir des prestations techniques diverses à différents organismes en dehors du secteur aérospatial.

L'effectif total vers 1990 est d'environ 340 personnes, réparties entre l'établissement de Châtillon, les deux centres d'essai et le Groupe de projet de la soufflerie transsonique européenne ETW⁴⁸, au sein duquel, à Amsterdam et Cologne, sont alors détachés 6 ingénieurs de GME.

Dans toutes les installations les dispositions sont prises pour assurer une rigoureuse confidentialité des essais.

Outre la direction, la section centrale de Châtillon comprend :

- le bureau des programmes, chargé de la gestion des budgets de fonctionnement et d'équipement, du suivi des contrats et des plannings d'essais. Il dispose de moyens informatisés, reliés d'une part à l'ordinateur central de gestion de l'Office et d'autre part aux bureaux locaux de gestion des deux centres d'essais ;

⁴⁷ et qui deviendra, plus tard, la direction des Grands moyens techniques (GMT), dirigée successivement par Xavier Bouis (1997), Maurice Bazin (2003) et Patrick Wagner (2008).

⁴⁸ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie II, Chapitre 3. Rappelons encore que Xavier Bouis, de l'ONERA, a été le représentant français dans le groupe de projet international.

- le groupe des ingénieurs d'essais qui, premiers interlocuteurs des clients, vont jouer par la suite un rôle de maîtrise d'oeuvre dans la négociation puis dans la préparation de l'essai. Après les premiers contacts, pris à Châtillon, le programme d'essais est défini, une pose de problème est transmise au bureau d'études dont le rôle est précisé ci-dessous et un ingénieur est désigné, par le centre concerné, pour y prendre la responsabilité de la réalisation de l'essai.

Chacun en ce qui le concerne, le bureau d'études et le Centre transmettent l'évaluation des travaux à réaliser et un devis est adressé au client pour établissement d'une commande ;

- le bureau d'études « essais », formé d'une douzaine d'ingénieurs et de techniciens, est chargé de la préparation technique amont de l'essai : définition des montages, supports, lignes de dard, balances, établissement des plans de montage, des plans d'équipement des maquettes, éventuellement étude de la maquette elle-même, lancement des fabrications nécessaires, établissement des notes de calcul de la tenue mécanique en essai des divers éléments, etc. ;

- le groupe des ingénieurs de définition et le bureau d'études des équipements qui assurent les activités d'ingénierie au bénéfice de GME, d'autres directions de l'ONERA et parfois d'organismes extérieurs, et représentent un effectif de 9 ingénieurs et cadres et 6 techniciens.

Les bureaux d'études disposent de moyens performants d'assistance par ordinateur. Un poste de travail graphique est relié aux ordinateurs centraux de l'office (Cyber-Cray) et éventuellement à des ordinateurs extérieurs (CCSA pour les calculs par éléments finis utilisant REXBAT). Des postes de travail CFAO, reliés à un calculateur 4361 IBM supportant le logiciel CATIA, sont progressivement installés. Outre l'aide à la conception, cet outil CFAO permet d'améliorer la qualité et la rapidité de transmission des informations tant avec les clients constructeurs qu'avec l'atelier central de l'ONERA ou les entreprises effectuant les réalisations en sous-traitance.

Un programme de simulation des montages en soufflerie, interactif avec une bibliothèque CATIA contenant les nombreux éléments supports existants, permet la définition et le calcul rapide des montages. La micro-informatique est utilisée pour les calculs courants de résistance des matériaux.

D'une façon générale, le bureau d'ingénierie⁴⁹ garde la responsabilité de la conception d'ensemble des équipements, mais, selon leur importance, prend en charge ou sous-traite, en tout ou partie, les études de détail. Il travaille, bien entendu, en étroite coopération avec le bureau d'études « essais », avec les deux centres, avec le Service des approvisionnements techniques responsable de l'Atelier central et avec le Service des travaux neufs de l'ONERA.

Parmi les réalisations des années antérieures à 1990, peuvent être cités à titre d'exemple : les souffleries F1 et F2, les installations d'air comprimé haute pression de Modane et du Fauga, la nouvelle mécanique du tripode et le banc d'essais de rotor de S1MA, le laboratoire d'étude de propulsion du Fauga pour la Direction de l'énergétique, les nouveaux tunnels hydrodynamiques de la Direction de l'aérodynamique, l'isolation thermique de la soufflerie T2 du CERT pour les essais en

⁴⁹ Précurseur du groupe d'ingénierie de GME, un groupe de 5 à 6 ingénieurs, dont une majorité d'origine allemande et autrichienne, assurait à GSMA l'ingénierie des installations. Ce groupe a été notablement renforcé au moment de la réalisation de la soufflerie F1, sous l'autorité de Jean Christophe.

cryogénie, la participation à la réalisation de la soufflerie anéchoïque CEPRA 19⁵⁰ du Centre d'essais des propulseurs (CEPr), la réalisation de dynamomètres étalons pour le Bureau national de métrologie.

Vers 1993-95, la rationalisation du parc des souffleries françaises, conduite par le C3S (Comité consultatif de coordination des souffleries) sous l'égide de la DGA, a entraîné la fermeture de certaines souffleries (Vernon, Sigma 4, S5 CEAT, T2, etc.) et la confirmation du rôle national, européen et international que devait jouer le dispositif ONERA/GME.

Avant de clore cette section relative à GSMA/GME, rappelons le rôle éminent joué pour les essais par Stanislas Schneider, Bertrand Costes, Jacky Leynaert et Xavier Bouis, et pour l'ingénierie par Guy Fasso, André Schweich, Jean Christophe et Maurice Bazin.

1.5 - Centre de Palaiseau⁵¹

On se limite ici aux moyens d'essais de propulsion les plus importants (cellules ATD). Signalons aussi cependant le Caisson A75 qui a servi aux essais de séparation d'étages de missiles balistiques et de lanceurs.

Dans le milieu des années 1950, les recherches sur la combustion du kérosène dans l'air en déplacement rapide conduisent l'ONERA à étudier et réaliser à Palaiseau une centrale d'air comprimé et un ensemble de neuf cellules dans lesquelles peuvent s'effectuer des expériences très variées en raison de la diversité des fluides qui y sont délivrés. Ces cellules, alimentées en air comprimé par la centrale, constituent les Laboratoires d'aérothermodynamique de Palaiseau qui sont finalement mis en service en 1958, en même temps que s'installe au Fort le personnel travaillant jusqu'alors au quai d'Ivry, ainsi qu'une bonne partie du personnel de la Direction énergie et propulsion qui travaille alors à Chalais-Meudon.

Les neuf cellules d'essais sont disponibles pour les travaux envisagés. L'insonorisation très poussée et les fournitures d'énergie et de fluides divers permettent toutes sortes d'applications dans un domaine d'emploi très vaste. L'exploitation de ces laboratoires s'oriente rapidement, conformément à leur vocation, vers les recherches sur les phénomènes de combustion et d'aérothermodynamique, en particulier vers l'étude des foyers de statoréacteurs et d'engins divers.

Ces installations sont bien évidemment adaptées et leurs capacités augmentées au fur et à mesure des besoins nécessités par les différents thèmes d'études traités.

A la fin de la période considérée dans ce document, ces Laboratoires sont essentiellement consacrés aux études expérimentales sur des systèmes propulsifs aérobies : soit sur des composants de moteurs, soit sur des moteurs à échelle 1 ou à échelle réduite (systèmes d'injection, foyers de turboréacteurs et de turbomoteurs de petites dimensions, foyers de statoréacteurs ou de superstatoréacteurs, etc.). Ils sont constitués par les différents sous-ensembles suivants :

- un ensemble de production et de distribution d'air basse pression (centrale d'air comprimé BP fournissant 10 kg/s sous 12 bar au niveau des cellules d'essais) ;

⁵⁰ Voir le chapitre 3 (CEPr) de ce document et le § 3.4 de ce chapitre.

⁵¹ Par Alain Cochet.

- un ensemble de production et de stockage d'air haute pression (stockage d'air HP de 21 tonnes sous 250 bar) ;
- des stockages et des circuits de distribution de différents fluides nécessaires aux expérimentations : hydrogène, oxygène, azote, kérosène, eau, etc. ;
- de neuf cellules d'essais (cellules ATD, figures 65-68), dont six d'entre elles peuvent être utilisées pour des essais mettant en œuvre de la combustion ;
- d'un vaste hall d'essais (banc M1) comportant 3 lignes pouvant accueillir des montages d'essais de chambre de combustion.

Au cours de leur utilisation depuis la création jusqu'à maintenant, de nombreux types d'essais sont menés par la Direction de l'énergétique (OE), mais également par d'autres directions comme l'illustre la photo de la figure 65 qui montre un montage d'essais pour les études de bruit de jet, exploité par la Direction de la physique (OP) en cellule 9 dans le milieu des années 1970.

A la même époque, en parallèle des études de combustion sur des montages spécifiques, une grande activité se développe autour de la propulsion par statoréacteur. Des investissements spécifiques sont alors réalisés (aménagement des cellules 8 et 9, réalisation d'un extracteur puissant, création d'un système de stockage d'air sous haute pression à 250 bar) permettant d'étudier ce type de propulsion. Ces études constituent alors un pôle important d'activité des cellules d'aérothermodynamique.

Parallèlement, les études portant sur les chambres de combustion aéronautiques civiles et militaires ou les études de réchauffe pour le compte de la SNECMA se déroulent au banc M1 situé en contrebas des cellules ATD.

1.6 - Centre de Lille (IMFL)

1.6.1 - Introduction

L'IMFL⁵², Institut de mécanique des fluides de Lille (figure 69), créé en 1930, est rattaché au GRA (Groupement français pour le développement des recherches aéronautiques) en 1938, à l'ONERA en 1946, à l'Université en 1950, à nouveau à l'ONERA en 1983, et prend le nom de Centre de Lille de l'ONERA en 1997. Il est dirigé successivement par Joseph Kampé de Fériet (1929), André Martinot-Lagarde (1945), Gérard Gontier (1968), Jean Gobeltz (1977), Marc Pianko (1983), Daniel Bahurel (1988), Francis Dupriez (1996)⁵³.

Sont rappelés ci-dessous les moyens d'essais les plus importants tels qu'ils se présentent vers 1990.

1.6.2 - Moyens du Groupe de mécanique du vol

Soufflerie verticale SV4

La soufflerie verticale est utilisée principalement pour l'étude du comportement des aéronefs à grande incidence à l'aide de maquettes adaptées à diverses configurations possibles : vrille libre, vrille instrumentée, balance rotative « tourne-broche ».

⁵² Voir également le document *Etudes et recherches*, Partie I, Chapitre 2, § 2.

⁵³ Puis Anne-Marie Mainguy (2001) et Pascal Geoffroy (2005).

La soufflerie est à veine ouverte, de 4 m de diamètre⁵⁴, et à retour à axe vertical (36 m de haut). La hauteur de la veine libre est de 3,5 m et la hauteur totale utilisable pour les observations est de 6 m. Le ventilateur à 13 pales est entraîné par un moteur à courant continu de 460 kW. La vitesse maximale du vent est de 40 m/s, pilotable continûment entre 0 et 40 m/s en 4 s environ.

Le gradient de vitesse est légèrement négatif selon la hauteur de la veine d'expériences. Ce gradient est réglable à l'aide de volets. La veine est entourée d'un filet de protection pour les essais de vrille libre, qui est escamotable à la demande.

- Vrille libre

À l'aide d'une maquette dynamiquement semblable à l'avion, il est possible d'étudier la vrille stabilisée ou non, et la sortie de vrille.

La maquette, d'une taille moyenne de 0,8 m, est entièrement libre dans la veine d'expériences et lancée en vrille à la main⁵⁵ avec toutes les conditions initiales souhaitées. La maquette peut être équipée d'une radio-télécommande (qui permet de modifier les gouvernes pendant l'essai ou de larguer des charges), d'un parachute, etc. La télécommande est soit proportionnelle soit séquentielle par micro-processeur. Les essais sont enregistrés en vidéo au format U-Matic Pal.

Les essais en SV4 ont pour objectif la définition des consignes de vrille et de sortie de vrille à fournir au pilote d'essais, et éventuellement l'étude des modifications géométrique applicables à l'avion de série en vue d'assainir des phénomènes jugés critiques, et des moyens de secours divers pour couvrir les essais en vol. En plus des essais de vrille libre, il est possible d'étudier la stabilité de corps divers dans un courant d'air, tels que sondes météo, parachutes, cabine éjectable Hermès, parachutistes, etc.

- Lanceur pour maquettes instrumentées

Ce dispositif permet de larguer une maquette de vrille libre, instrumentée en vrille, sous différentes attitudes et pour des « cloches », abattées, etc. La maquette est fixée au montage soit par un électro-aimant soit par deux doigts rétractables suivant les conditions initiales à imposer. L'instrumentation de la maquette se compose d'accéléromètres et/ou de gyromètres. La trajectographie optique complète l'information.

Le dispositif autorise le largage de maquettes d'une taille maximum de 1 m, à un taux de rotation de 1 000°/s pour une vitesse $10 < V < 40$ m/s.

- Balance rotative⁵⁶

Ce montage de simulation dynamique, appelé « tournebroche », permet l'étude quantitative en soufflerie verticale des mouvements avec rotation à faible incidence, du vol normal, des grands mouvements à forte incidence (perte de contrôle) et de la vrille proprement dite. Le passage de la configuration « balance rotative » à la configuration « vrille libre » se fait en une demi-journée. Les maquettes, jusqu'à 50 kg et 1,7 m de plus grande dimension, sont montées sur balance 6 composantes. Le taux de rotation maximum est de 11 rd/s (~ 2 tr/s) ; Reynolds : $Re = 2 \cdot 10^6/m$; incidence : $\alpha = 0$ à $\pm 135^\circ$; dérapage : $\beta = \pm 90^\circ$; rayon de vrille maximum : 0,2 m.

⁵⁴ Elle a remplacé en 1966 la soufflerie verticale SV2 de 2 m de diamètre de 1938.

⁵⁵ Voir le fascicule *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Figs. 22 et 56.

⁵⁶ Voir le fascicule *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Figs. 22 et 57.

Stations de catapultage de maquettes de vol libre

Les travaux effectués dans ces installations uniques en Europe sont étroitement liés au développement de méthodes d'identification aérodynamique de l'avion. Les conditions d'essais sont déterminées par la similitude physique qui permet de représenter sur maquette les caractéristiques mécaniques et dynamiques du comportement de l'avion. Le plus souvent les essais sont réalisés en vue de valider un modèle mathématique de représentation du phénomène étudié qui peut être lui-même transposé au niveau de l'avion.

Les maquettes sont entièrement réalisées à l'IMFL en similitude géométrique, massique et inertielle. Elles sont largement instrumentées selon la spécificité des travaux menés ; cet équipement comporte les éléments suivant : accéléromètres (X, Y, Z), gyromètres (p , q , r), jauges de contrainte, capteurs de pression (anémo-baroclinométrie V , α , β), actionneurs de gouvernes, ainsi que les éléments d'alimentation (batteries) et de transmission radio (PCM).

- Banc B5 (créé en 1964, démonté en 2004) – Installation d'étude de la perte de contrôle et de la vrille débutante. Les principaux axes d'études sont : « *Deepstall* », perte de contrôle, début de vrille.

L'installation (figures 70 et 71) se trouve dans un bâtiment de forme trapézoïdale : sa longueur est de 42 m, les deux petits côtés ont respectivement 4 et 12 m pour une hauteur qui atteint 13,5 m dans la zone de vol libre.

Les maquettes sont mises en vitesse par une catapulte hydraulique orientable d'une longueur de 12 m. Ce dispositif de largage hydraulique permet la mise en vol libre de maquettes de 3 à 6 kg et de 1,2 m maximum d'envergure ou de longueur, à des vitesses pouvant aller jusqu'à 25 m/s. La distance parcourue en vol plané peut atteindre 30 à 35 m selon la forme de la trajectoire.

- Banc B10 (créé en 1975, supprimé en 2003) (figure 72) – Installation polyvalente de mécanique du vol⁵⁷.

Les principaux axes d'étude sont : vol aux grandes incidences, stabilité et manoeuvrabilité, lois de commande, vol en turbulence atmosphérique, effet de rafales verticales ou latérales et optimisation de la réponse de l'avion à ces rafales.

L'installation est située dans un bâtiment de 75 m de longueur, dont la hauteur varie de 4,5 à 14 mètres.

La mise en vitesse des maquettes est effectuée au moyen d'une catapulte pneumatique ; la rampe de lancement a 36 m de longueur. Ce dispositif permet le largage de maquettes de 10 à 25 kg à des vitesses de 15 à 40 m/s : le vol plané est d'environ 40 m. Les rafales verticales peuvent être de formes diverses et ont au maximum 5,6 m de longueur. Les rafales latérales peuvent être modulées de 1,4 à 14 m de longueur.

Le banc B10 a été remplacé en 2002 par le banc B20 plus performant.

Laboratoire de qualification maquette

Le Laboratoire de qualification maquette de l'IMFL (figure 73) contribue à la reconnaissance des caractéristiques géométriques, massiques, inertiels et instrumentales des maquettes de vol libre. Celles-ci sont de tailles diverses allant de 30 cm à 2,5 m d'envergure pour des masses atteignant 25 kg.

⁵⁷ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Figs. 22, 33 et 48.

1.6.3 - Moyens du Groupe de mécanique des fluides appliquée

Les études menées dans les souffleries de ce Groupe sur les corps terrestres, marins ou aériens, sont de deux natures :

- La détermination des efforts dus au vent relatif. Il s'agit de déterminer les composantes d'efforts et de moments en fonction de la direction et du module du vent relatif. On utilise pour cela, selon le cas, une balance dynamométrique interne à la maquette ou une balance externe associée à la soufflerie.

- Les études d'écoulements. Il s'agit de décrire avec précision les écoulements, qu'il s'agisse d'écoulements externes (exemples : sillage, couches limites, décollements de zones fortement turbulentes, etc.) ou d'écoulements internes aux maquettes (exemples : écoulements de ventilation, alimentation d'entrées d'air ou d'hélices). Les techniques sont à base de mesures (exemples : manométrie, anémoclinométrie, anémométrie à fils chauds, analyse de gaz, etc.) ou de visualisation (par fils pariétaux, par enduits, par fumées, etc.).

Soufflerie horizontale subsonique L1⁵⁸

Cette soufflerie munie d'une veine circulaire de diamètre 2,40 m et 3 m de long, est à fonctionnement continu, à vitesse variable de 0 à 75 m/s.

Pour simuler un sol ou une surface lisse (figure 74), il y a possibilité d'adapter un plancher de 2 m de large.

Soufflerie de site grande veine L2

La veine rectangulaire, de section allant jusqu'à 8 m de large et 3 m de haut, est ajustable à la taille de la maquette. Les vitesses sont : 10 m/s en 8 m x 3 m ; 14 m/s en 6 m x 3 m ; 16 m/s en 8 m x 2 m ; 20 m/s en 4 m x 3 m.

Un plateau tournant, de diamètre 6 m, permet d'orienter les maquettes par rapport à la direction du vent. Cette soufflerie est particulièrement adaptée pour les études de sites complets, industriels ou urbains.

Soufflerie d'étalonnage S45

Il s'agit d'une soufflerie à retour, à fonctionnement continu, à vitesse variable de 10 m/s à 50 m/s, munie d'une veine carrée de 0,45 m x 0,45 m, longue de 0,7 m. Les parois de veine sont interchangeables. Elle est équipée d'un système automatisé de positionnement de sonde et maquette dans le domaine : α de -45° à $+45^\circ$ et β de 0° à 360° .

Cette soufflerie est plus particulièrement destinée à l'étalonnage de sondes et capteurs, et aux expérimentations sur maquettes de petite taille.

Installations hydrodynamiques

Canal hydrodynamique

Installé à l'Institut de mécanique des fluides en 1934, le canal hydrodynamique de Lille a subi une profonde rénovation en 1981 et 1982, tout en conservant ses caractéristiques dimensionnelles initiales : longueur : 22 m, largeur : 1,5 m, profondeur : 1,5 m.

Exemples de travaux effectués dans cette installation d'essai : impact de dièdres (hydroptères), étude de faisabilité d'un banc d'essais de dispositif récupérateur de pétrole en mer, études de carènes, étalonnage de sonde, etc.

⁵⁸ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 23.

Station d'impacts hydrodynamiques

Cette installation d'essais, mise en place en 1982, est attenante à la soufflerie verticale SV4.

La catapulte propulse un engin, ou maquette de corps sous-marin, calé en incidence sur le chariot d'entraînement, sur un plan d'eau de 2 m x 2,5 m, profond de 4,5 m. La séparation de la maquette de son support s'effectue lors du freinage du chariot avant l'impact. La visualisation des premiers instants du phénomène est possible par l'intermédiaire des hublots montés sur la partie haute du bassin. Le freinage du corps s'effectue environ après 1 m de course à l'aide d'un filet récupérateur.

Les expérimentations menées, concernent principalement l'étude du champ de pression instationnaire, les efforts et moments s'exerçant sur l'engin lors de la pénétration dans l'eau, et l'examen des différents phénomènes de cavitation associés.

Bureaux d'études et ateliers

Cette équipe a pour vocation première la conception et la fabrication des maquettes (figures 75 et 76) nécessaires aux groupes opérationnels pour mener à bien leur travaux expérimentaux.

1.7 - Autres souffleries ou moyens

D'autres moyens d'essais sont à signaler pour le rôle qu'ils ont joué dans les premières années de la vie de l'ONERA.

1.7.1 - Soufflerie de Cannes⁵⁹

La soufflerie S1Ca de Cannes, construite par la SNCASO en 1942-44 pour le compte du ministère de l'Air, subsonique jusqu'à 50 m/s, veine de 3 m de diamètre, est exploitée à partir de fin 1944. Elle est affectée à l'ONERA (Direction de l'aérodynamique, OA) le 1^{er} novembre 1946, dirigée par Amédée Bévert, puis fermée en 1978.

Laissons Philippe Poisson-Quinton raconter⁶⁰ :

« [La soufflerie de Cannes] apporta une inestimable contribution : elle possédait à la fois un atelier de construction de maquettes et un personnel magnifiquement doué pour les essais et leur exploitation. Nous y faisons tous nos « coups de sonde » sur une idée nouvelle, aussi bien que l'étude d'une maquette complète motorisée : c'était le rêve pour un chercheur ! ».

Des recherches sont ainsi effectuées sur les tourbillons d'apex des ailes élancées (1951) ; l'hypersustentation par contrôle de la couche limite ou de la circulation par soufflage des ailes, avec validation des concepts sur deux avions prototypes destinés aux porte-avions, le Vultur et l'Etendard ; l'aide au pilotage en roulis de l'avion expérimental Deltaviex de l'ONERA, par soufflage au bord de fuite ; et même l'atterrissage en plané, sur une maquette ONERA de planeur de rentrée spatiale (1961–1963).

⁵⁹ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie I, Chapitre 2, § 2.

⁶⁰ Cf. *La Lettre de l'AAAF*, n°9, octobre 2004.

1.7.2 - Station d'essais de givrage du Mont-Lachat (Savoie)

Le 11 juillet 1946, le Conseil du Groupement français pour le développement des recherches aéronautiques (GRA) approuve le principe de la mutation à l'ONERA, qui sera effective au 1^{er} septembre 1946, du personnel et des installations qu'il gérait à la station de givrage du Mont-Lachat en Savoie.

L'utilisation de cette station est plus tard remplacée par celle de la soufflerie S1MA qui convient lorsque la température extérieure est suffisamment basse (voir § 1.3.2).

2 - LES MOYENS D'ANALYSE MODALE ONERA-SOPEMEA

2.1 - Introduction

La prévision du comportement dynamique des structures aéronautiques comprend, entre autres, l'étude de la stabilité aéroélastique qui permet de prévoir le phénomène de flottement.

Dès que la vitesse des avions est devenue importante, est apparu le risque de flottement (ou *flutter*), phénomène dangereux, responsable de nombreux accidents avant d'être compris et maîtrisé. A l'ONERA, cela a été une préoccupation majeure de la Direction scientifique des structures (OR) de Robert Mazet, puis Gabriel Coupry, Roland Dat et Roger Labourdette.

Le flottement d'une aile est dû à un couplage aéroélastique entre les mouvements vibratoires de torsion et de flexion de l'aile. Très schématiquement (figure 77), la torsion conduit à un supplément d'incidence locale $\Delta\alpha$ de l'aile, donc à un supplément de portance ΔR qui excite l'aile en flexion.

Ce phénomène peut s'avérer divergent et catastrophique lorsqu'une certaine vitesse « critique » de vol est atteinte, l'énergie responsable de la rupture de l'aile étant puisée dans l'écoulement.

Il est évidemment essentiel de connaître cette vitesse critique pour s'assurer qu'elle ne sera pas rencontrée dans le domaine de vol normal de l'avion, voire l'exclure de ce domaine par modification des caractéristiques aéroélastiques de l'avion.

Il faut déjà bien connaître les caractéristiques vibratoires de l'avion, sans écoulement d'air, par la détermination des modes de vibration par le calcul⁶¹ ou l'expérimentation au sol, sur maquette⁶² ou sur l'avion complet⁶³, avec les dispositifs appropriés d'excitation de ces modes (Christian Béatrix, Gérard Piazzoli, Pierre-Marie Hutin). Par exemple, cette analyse modale a nécessité 700 accéléromètres pour l'A340 en 1991.

Il faut également bien connaître les caractéristiques aéroélastiques de l'avion en présence de l'écoulement d'air, par le calcul, des essais en souffleries sur maquettes aéroélastiquement semblables⁶⁴, et des essais en vol avec des excitateurs de vibrations appropriés⁶⁵ (Roger Destuynder, Gérard Piazzoli). Cela permet de

⁶¹ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 9.

⁶² Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 10.

⁶³ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 8.

⁶⁴ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 7.

⁶⁵ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Figs. 33 et 50.

s'approcher « prudemment » de la vitesse critique afin de la caractériser de façon encore plus précise.

Un calcul de flottement nécessite donc la connaissance d'un modèle dynamique de la structure. Celui-ci peut être fourni, soit par calcul (actuellement par une méthode d'éléments finis), soit par identification modale par un essai de vibration au sol. C'est ce dernier point qui va être développé ici. L'essai au sol, destiné à l'analyse modale, fournit les résultats suivants : modes propres, fréquences propres, paramètres généralisés (masse, coefficient d'amortissement).

Au cours des cinquante dernières années, ces essais ont été réalisés essentiellement par deux installations mobiles d'analyse modale de structure, l'une sous la responsabilité de la SOPEMEA (Société pour le perfectionnement des matériels et équipements aérospatiaux), surtout utilisée pour les essais d'avions d'armes, l'autre sous la responsabilité de l'ONERA, beaucoup plus adaptée aux essais des avions gros porteurs, les méthodes d'essais proprement dites ayant été confiées plus particulièrement à l'ONERA.

Depuis 2000, un nouveau moyen d'essai, dont l'étude remonte à 1992, est capable de répondre aux besoins des grands programmes aéronautiques et spatiaux futurs qui demanderont un grand nombre de voies de mesure, avec des fréquences des premiers modes de structure très basses.

Etudié et réalisé conjointement par l'ONERA et la SOPEMEA, il a servi, en particulier, à effectuer les essais sur les Airbus A340 et A380.

2.2 - Les moyens de l'ONERA

Les recherches de l'ONERA en aéroélasticité pendant la période considérée (1946-1995) sont présentées dans le fascicule *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, § 1.2. Comme il a été dit, on se limite ici à l'aspect analyse modale au sol, dont les moyens et méthodes ont beaucoup évolué pendant cette période.

Les recherches en aéroélasticité de l'ONERA sont alors effectuées à la Direction de la résistance des structures (OR), dirigée successivement par Robert Mazet (1947), Gabriel Coupry (1968), Roland Dat (1987) et Roger Labourdette (1989-1997). Les essais de vibration au sol sont placés sous la responsabilité de Christian Béatrix (1955), Gérard Piazzoli (1971) et Pierre-Marie Hutin (1989-2000).

Années 1950

Dès sa création en 1946, l'ONERA étudie les phénomènes aéroélastiques pour prévoir les risques de flottement des nouveaux avions. Comme il a été vu, le flottement résulte du couplage entre l'écoulement d'air instationnaire et les déformations d'un avion. Il peut conduire à l'endommagement de l'appareil voire à sa destruction.

Ces études, indispensables à la réception des avions militaires et à la certification des avions civils, mêlent essais et simulation numérique.

Des essais de vibrations au sol, sur prototype ou sur maquette, fournissent les caractéristiques vibratoires de l'avion. Ces essais peuvent être complétés par des essais en soufflerie ou de maquettes en vol.

Dans les années d'après-guerre, l'instrumentation est simple : transcriptions, enregistrements et dépouillements se font manuellement. En particulier, au sol, le relevé des formes propres de vibrations se fait grâce à des capteurs de vitesse de déplacement fixes, complétés par des palpeurs tenus à main !

Années 1960-1970

Dix ans plus tard, les avions sont de plus grande dimension et de masse plus importante. La technologie des mesures évolue, le traitement des signaux graphiques est remplacé par un enregistrement de signal électrique. L'ensemble du matériel, capteurs et excitateurs, est conçu et fabriqué à l'ONERA.

Au cours de ces années, l'ONERA exporte déjà son savoir-faire notamment en Allemagne. Par exemple, sur l'avion militaire Lockheed F104, qui a la réputation d'être un avion peu sûr, l'ONERA est sollicité pour faire des essais de vibrations⁶⁶.

Années 1970-1990

Au cours des années 1970, dans les essais de vibration au sol, les palpeurs sont remplacés par des accéléromètres. En effet, le DLR avait conçu un planeur pour mettre en évidence le déclenchement du flottement et ce planeur était déjà équipé de capteurs accélérométriques.

En France, des essais de vibrations au sol et de flottement en vol sont réalisés sur tous les avions développés : planeurs, avions légers et de transport (figure 78), y compris les gros porteurs.

Au sol, le tracé automatique des formes propres permet d'augmenter la productivité des essais de vibration.

Années 1990-2000

Avec les essais de vibrations au sol de l'A320 et de l'A330 (figure 79)⁶⁷, l'évolution du matériel est significative. Le nombre d'accéléromètres est plus important. Il va croître encore avec, respectivement, 700 points de mesure sur l'A340 en 1991 et 800 sur l'A380 en 2005 (voir § 2.4).

L'évolution de la puissance de calcul permet de modéliser de mieux en mieux la réalité grâce à la simulation numérique.

Des calculs de prévision de flottement sont réalisés d'après les résultats de mesures d'essais de vibrations au sol⁶⁸ et d'essais en soufflerie⁶⁹. Ils doivent garantir, avec une certaine marge de sécurité, que le phénomène de flottement n'apparaîtra pas en vol, puis ils sont validés en conditions réelles par les essais de vibrations en vol⁷⁰.

La coopération bilatérale ONERA-DLR, qui a pris forme vers 1992, est devenue une relation forte qui allie études théoriques et expérimentales.

L'ONERA dispose à Meudon d'un avion test sur lequel les chercheurs français et allemands développent ensemble les méthodes et les moyens d'essais de vibrations au sol. Pour conduire ces essais nécessaires à la certification des gros porteurs,

⁶⁶ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 8.

⁶⁷ Voir également le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 33.

⁶⁸ y compris sur maquette à échelle réduite : voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 10.

⁶⁹ Voir Figs. 33 et 34 et le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 7.

⁷⁰ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 33.

l'ONERA et le DLR mettent en « *pool* » à la fois leurs équipes et leurs moyens expérimentaux.

Fruit de cette coopération, une stratégie d'essais qui combine méthodes traditionnelles et novatrices est utilisée avec succès pour les essais de vibrations au sol de l'A380.

2.3 - Les moyens de la SOPEMEA⁷¹

La SOPEMEA s'est vue confier très tôt, à la fin des années 50, par les Services officiels français de l'aéronautique (à signaler, en particulier, l'action déterminante de l'ingénieur militaire de l'Air Hughes de l'Estoile, du Service technique aéronautique), l'étude, la réalisation et l'exploitation d'un moyen mobile d'essais aux vibrations de structures complexes, afin d'appliquer, de façon industrielle, les méthodes élaborées par l'ONERA pour la détermination expérimentale des modes propres des avions.

Les installations

La première installation mobile d'essais est mise en service en 1956, placée dans un camion P 45, spécialement aménagé (figure 80), mais elle ne comporte que 4 voies d'excitation commandées en parallèle, l'acquisition des mesures se faisant point par point, manuellement à l'aide d'un capteur mobile de déplacement.

Cette installation, de performances relativement limitées, est remplacée, en 1966, par un nouveau moyen comportant un grand nombre d'améliorations, mieux adapté aux besoins de l'Aéronautique moderne :

- un plus grand nombre de voies d'excitation, à commande séparée en force et en phase ;
- une chaîne d'acquisition automatique pas à pas, de 300 voies ;
- une capacité de 300 capteurs de déplacement, mis en place pour toute la durée de l'essai, sur la structure à tester ;
- une amélioration de la qualité et de l'automatisme des mesures, avec, comme conséquence, une réduction du temps d'immobilisation pour les essais.

L'ensemble de cette installation mobile d'essais est mis en place dans un camion semi-remorque regroupant tous les moyens d'excitation et de mesure et dans un camion spécialement aménagé pour le transport des matériels de servitude. Cette installation procède, en particulier, aux essais d'analyse modale des avions Mirage F1 et Mystère 20.

En 1967, la SOPEMEA ayant été choisie pour effectuer les essais de vibration de l'avion Concorde, il est nécessaire, compte tenu de la géométrie et de la masse de l'avion, de disposer d'un plus grand nombre de points de mesure et de chaînes d'excitation de force plus élevée. Une installation complémentaire, pouvant d'ailleurs être utilisée de façon autonome, est donc réalisée. Elle comprend :

- 8 voies d'excitation, de 1 000 N ;
- une deuxième chaîne d'acquisition automatique, de 300 voies, ce qui porte ainsi la capacité totale des deux installations à 600 voies.

En 1974, pour répondre à l'évolution des méthodes de détermination expérimentale des modes propres, ainsi qu'à la nécessité de réduire les durées des

⁷¹ Par Marcel Cado.

essais, tout en augmentant le nombre des données acquises, la SOPEMEA associe à l'installation précédente un centre d'acquisition et de traitement informatique des données ayant, comme unité centrale, un ordinateur Philips P 880, avec une capacité de mesure portée à 700 voies, doté d'un multiplexeur analogique de 1 024 voies, les capteurs de déplacement étant remplacés par des accéléromètres.

Nouvelle modification en 1979 : de nouvelles méthodes d'analyse modale, mises au point en collaboration avec l'ONERA, apparaissent⁷² :

- une méthode dite « en excitation par appropriation » ;
- une méthode dite « en excitation globale ».

Pour les appliquer, un nouveau système informatique est intégré dans l'installation ; il comprend un mini-ordinateur CII – Mini 6, venant remplacer le Philips P 880, avec un processeur vectoriel FPS 100, et une chaîne d'acquisition rapide de 128 voies, venant compléter la chaîne d'acquisition de 1 024 voies déjà existante.

Parallèlement à ces améliorations apportées à l'installation mobile d'essais en ce qui concerne les mesures, la SOPEMEA effectue l'étude et la réalisation de systèmes de suspension élastique à coussins d'air.

Une dernière modification est apportée en 1991 à cette installation : le ordinateur Mini 6 est remplacé par un ordinateur MASCOMP.

Ces installations conçues dans les années 70 sont ainsi régulièrement mises à niveau pour tenir compte des progrès réalisés dans les systèmes et logiciels informatiques et pour s'adapter aux nouvelles méthodes d'essais.

Ceci étant, compte tenu de la complexité croissante de ces moyens, la SOPEMEA met également en place, en 1989, une installation légère munie de calculateurs analogiques disposant d'une chaîne d'acquisition de 128 voies, installée dans une simple camionnette, pour effectuer à moindres frais et rapidement, des essais d'analyse modale, en cas d'excitations naturelles (circulation de véhicules et de fluides, fonctionnement de machines, etc.).

Bilan des essais SOPEMEA

Au cours des quarante dernières années, environ 400 essais sont réalisés par les différentes installations de la SOPEMEA, dont une bonne partie sous la responsabilité de l'ingénieur Robert Gougeau.

Ces essais concernent, bien sûr, en premier lieu, les matériels aéronautiques :

- principalement, les avions de combat dans leurs différentes configurations : Mirage III, Mirage F1, Jaguar, Etendard, Super Etendard, Mirage 2000, Rafale (figure 81) ;

- mais aussi des avions de transport civils ou militaires, tels que les avions de la famille Mystère 20 – Falcon (près de 80 essais réalisés pour les différentes versions) (figure 82), le Transall, les Breguet Atlantic (générations 1 et 2), et quelques Airbus,

⁷² Dans la méthode d'excitation par appropriation, l'essai commence par la recherche des fréquences propres de la structure, suivie par une appropriation permettant d'isoler chaque mode et d'en calculer les paramètres généralisés (fréquence, amortissement, masse généralisée).

Dans la méthode d'excitation globale, la structure peut être excitée en sinus ou en aléatoire. Le lissage des fonctions de transfert mesurées permet de déterminer les pôles et les paramètres généralisés correspondants.

en coopération avec l'ONERA, sans oublier le Concorde 001, à Toulouse, en 1967 et le Concorde 01 à Bristol en 1971 (figure 83).

A signaler qu'Intespace, alors filiale de la SOPEMEA, réalise les essais d'analyse modale du satellite SPOT.

De nombreux essais (plus de 160) sont également effectués dans différents domaines industriels, sur des matériels tels que :

- bâtis métalliques de support pour engins ;
- cuves de réacteur nucléaire ;
- véhicules ferroviaires ;
- matériels de génération électrique ;
- berceau du moteur du sous-marin SNLE, etc.

2.4 - Le moyen commun ONERA-SOPEMEA : l'installation MIMOSA⁷³

Sur l'initiative des responsables techniques de l'ONERA (Roger Labourdette) et de la SOPEMEA (Alphonse Deck), l'idée de concevoir un nouveau et unique moyen d'essais adapté aux besoins des grands programmes aéronautiques futurs voit le jour en 1992, après signature d'une convention entre l'ONERA et la SOPEMEA recentrant les activités des deux organismes :

- ONERA, sur la recherche et le développement ;
- SOPEMEA, sur les essais.

Cette convention prévoit la mise en place de ce nouveau moyen, développé en commun, en accord avec le métier des deux partenaires. Ce nouveau moyen doit avoir un haut standard technologique pour satisfaire les besoins des avionneurs :

- grand nombre de voies de mesure ;
- fréquences de modes de structure très basses ;
- gain de temps sur les essais, tout en améliorant la qualité et la quantité des résultats fournis.

Ce moyen doit pouvoir également évoluer au fil du temps et permettre la poursuite des recherches et développements sur les méthodes, les matériels et les logiciels susceptibles d'y être intégrés. C'est pourquoi le moyen d'essai comporte deux configurations matérielles :

- une installation « industrielle », de grande capacité (784 voies de mesure), pour la réalisation des essais de vibration au sol ;
- une installation « pilote », de moindre capacité (112 voies de mesure), conçue avec des éléments matériels de base identiques à la précédente et mise à la disposition de l'ONERA pour servir de plate-forme de recherche et de développement.

L'installation industrielle comporte donc 784 voies de mesure et utilise, comme moyens informatiques, des ordinateurs PC HP KAYAK XU 800, chargés de piloter les forces d'excitation et de réaliser les acquisitions avec, soit le logiciel d'acquisition IDEAS (MTS) pour la méthode globale, soit le logiciel d'acquisition ONERA-SOPEMEA pour la méthode du « sinus approprié ».

⁷³ Par Marcel Cado.

Cette installation utilise des capteurs accélérométriques spécialement conçus par PCB (fabricant américain) et des excitateurs électrodynamiques PRODERA, d'une force maximale de 1 000 N.

Ces différents moyens sont installés dans deux véhicules :

- un véhicule laboratoire, en remorque porte-shelter, qui comprend essentiellement les moyens informatiques de mesure, d'acquisition et de traitement (chaînes d'acquisition et chaînes de traitement) (figure 84) ;
- un véhicule de servitude tracteur, permettant le transport des équipements d'essais (excitateurs, capteurs, câblages et outillages divers).

A signaler que cette installation est compatible avec celle développée par le DLR (Institut de recherches allemand de Göttingen), ce qui a permis de faire les essais sur les Airbus A340 et A380, en regroupant les moyens des organismes français et allemands.

2.5 - Conclusion

Cette présentation des moyens d'analyse modale en aéronautique montre combien a été efficace, durant ces cinquante dernières années, l'action de deux organismes français, l'ONERA principalement dans les études, la SOPEMEA dans les essais. Cette action, menée en étroite coopération, avec le soutien sans faille des services de la DGA, a permis d'acquiescer une totale indépendance dans ce domaine et de couvrir la totalité des besoins des constructeurs français.

Aujourd'hui, pour faire face aussi bien à la complexité croissante des futurs besoins des constructeurs qu'à la diminution du nombre des programmes, ces deux acteurs veulent, par une coopération encore renforcée, confirmer leur complémentarité et unir leurs efforts de recherche dans la conception de nouvelles installations d'essais.

Loin de rester franco-française, cette action est menée en liaison avec l'homologue allemand, le DLR, pour répondre, avec le maximum d'efficacité et de rapidité, à l'ensemble des besoins européens actuels et futurs.

3 - L'ONERA ET LES CENTRES D'ESSAIS DE LA DCAE

3.1 - Introduction

Les relations pendant la période considérée entre l'ONERA et certains centres d'essais de la DCAE (CEV, CEAT, CEPr) sont rappelées ici, sans chercher à être exhaustif, et c'est à cette occasion que sont évoqués le CRV (Centre de recherches en vol de l'ONERA, à Brétigny), et les souffleries S5 (CEAT) et CEPRA 19 (CEPr).

3.2 - L'ONERA et le CEV⁷⁴

L'ONERA, contrairement à certains de ses homologues européens et à la NASA, ne dispose plus de moyens de recherches en vol qui lui soient propres. Mais cela n'a pas toujours été le cas. En effet, dans les premières années de son existence,

⁷⁴ Voir le chapitre 1 de ce document.

l'ONERA dispose à Brétigny d'un Centre de recherches en vol (CRV) où diverses expérimentations sont effectuées (figures 85 à 87).

Une étude de base des années 50 sur les ailes supersoniques se développe autour de l'opération « Deltaviex », petit avion de recherche conçu par l'Office, pour lequel des essais complets en soufflerie, sur maquettes puis sur l'avion lui-même⁷⁵, et des essais sur maquettes en vol (figure 88), sont effectués, avant d'aborder de difficiles conditions de vol (figure 89), ce qui conduit cependant à étudier un système original de contrôle actif du roulis utilisant des jets pulsés au bord de fuite de l'aile, en combinaison avec les classiques gouvernes aérodynamiques⁷⁶.

Au début du projet Concorde, deux programmes d'expérimentation en vol sont menés à bien par l'Office pour fournir des données fondamentales, respectivement sur l'échauffement cinétique et le frottement en vol de croisière à Mach 2, et valider à la fois les méthodes de calcul et les mesures en soufflerie. C'est, tout d'abord le projet « D6 », maquette d'aile delta injectée à Mach 2 à l'aide d'une fusée sonde tirée au CEM (Centre d'essais de Méditerranée)⁷⁷ ; ces données recourent bien les mesures sur la même aile delta durant des rafales chaudes dans la soufflerie S3MA de Modane et permettent d'ajuster la modélisation théorique. Le frottement turbulent à Mach 2 est ensuite mesuré en vol au CEV sur l'aile d'un bombardier Mirage IV, avec le concours de la Société Dassault, puis comparé aux résultats d'expériences en soufflerie et aux prévisions théoriques qui doivent être utilisées sur Concorde.

Plus tard, d'autres opérations de recherches en vol, rappelées ci-dessous, sont conduites en collaboration avec le CEV. En 1992, une proposition de programme de recherches en vol, sous forme d'une quarantaine de fiches, est faite auprès de la DCAé.

La Direction des études de synthèse (DES) mène avec la Direction de l'aérodynamique (OA) des recherches en vol concernant les avions, comme la mesure de pressions sur voilure de Mirage III, l'étude de profils supercritiques sur T33 (figure 90), des mesures sur la transition du bord d'attaque de l'aile de Nord 2500.

Pour les équipements, des recherches coordonnées par DES sont effectuées dans les domaines de l'anémo-baro-clinométrie et de l'étalonnage de la pression statique, et elles sont ensuite orientées vers le traitement hybride, l'anémométrie par diode laser et les lidars aéroportés. Dans le domaine des radars, les stations BRAHMS servent aux mesures de signatures. En navigation, l'opération IRMA 89/Apache sur Transall se poursuit par l'opération ADA/MTDS avec la CASA. En ce qui concerne les radars à vision latérale (SAR), les opérations MARISA/MLRS et CAMREX/OTAN, sont menés avec le dispositif RAMSES sur Transall⁷⁸. Enfin, le radar à antennes réparties RIAS est expérimenté en fonctionnements sol, bistatique sol-air-sol, bistatique sol-air-air, et l'étude se poursuit dans le domaine des contre-

⁷⁵ Voir § 1.2 et le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 25.

⁷⁶ Rappelons que ce type de contrôle est à rapprocher de celui utilisé beaucoup plus tard pour la Navette spatiale américaine, dans la partie de la rentrée où l'autorité des gouvernes aérodynamique est encore trop faible.

⁷⁷ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, § 3.4 et Fig. 50.

⁷⁸ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 3, Fig. 101.

contre-mesures avec le radar transhorizon NOSTRADAMUS et un concept de radar de bord.

Le CERT/DERAT effectue des recherches en vol, en coopération avec Dassault, sur la laminarité en subsonique (opération « Nageoire » Falcon⁷⁹), qui est poursuivie dans le cadre du DTP FLAM (Falcon laminaire)⁸⁰. Une recherche en vol sur la laminarité en supersonique est menée en coopération avec l'EPNER, en utilisant un Mirage III.

Le CERT/DERA participe à des études d'identification sur le Dauphin Recherche lorsqu'il devient disponible au CEV.

Le CERT/DERMO mène de son côté une étude sur un radiogoniomètre pour hélicoptère.

A l'IMFL, dans le domaine du vol à grande incidence et de la vrille, une importante opération dite « Synthèse Alphajet »⁸¹ est menée, entre 1984 et 1987, en coopération avec AMD-BA. Elle permet d'améliorer la connaissance des modèles de mécanique du vol à grande incidence. Ces modèles sont ensuite utilisés pour le Rafale.

Dans le domaine de l'aviation générale et de l'aide à la certification FAR 23, la résistance à la perte de contrôle de l'ATL Robin est étudiée dans le cadre de l'Opération CARAPACE⁸², en vue de déboucher sur la définition de dispositifs antiville et de moyen de secours, et de faciliter l'élaboration de la réglementation. Une sonde anémo-baro-clinométrique SAGA multitrous pour mesure aux grands angles est mise au point.

La Direction des structures (OR) participe à l'importante opération ASTRE⁸³ sur le vol en turbulence des avions d'armes. Le Mirage IIIB 225 du CEV d'Istres permet la mise au point des grands principes du CAG qui sont ensuite appliqués au Mirage 2000 et au Rafale.

Enfin, la Direction de la physique (OP) procède, en 1984, 1986 et 1988, à des campagnes de caractérisation en vol à bord d'un Transall du phénomène de foudroiement⁸⁴.

Dans le domaine de la discrétion infrarouge, les mesures de SIR en vol sont effectuées à bord d'une Caravelle, équipée de l'instrumentation SICAP-CIRAP (1989-1994) (figure 91).

L'interface ONERA-CEV s'améliore beaucoup avec la mise en place de l'équipe de Salon-de-Provence. La proximité géographique facilite les contacts. Le programme de recherches en vol proposé par l'ONERA sert de base à un accroissement de la coopération, en particulier dans le domaine de la mécanique du vol, en liaison avec l'Ecole de l'Air.

⁷⁹ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 38.

⁸⁰ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 39.

⁸¹ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, § 2.3.

⁸² Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, § 3.5.

⁸³ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 22.

⁸⁴ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 19.

3.3 - L'ONERA et le CEAT⁸⁵

L'ONERA coopère avec le CEAT depuis de nombreuses années. Les deux organismes sont complémentaires, l'ONERA se situant en général plus en amont, dans le domaine des essais de recherche et le CEAT plus en aval, dans celui des essais de qualification. En ce qui concerne les essais industriels sur les structures, le CEAT est chargé des essais statiques et de fatigue, et l'ONERA et la SOPEMEA des essais de vibration au sol (voir § 2). Il faut noter cependant, pendant quelques années, une certaine concurrence entre l'ONERA et le CEAT dans le domaine des souffleries.

Pour la coopération, plusieurs directions de l'ONERA sont concernées.

La Direction des structures (OR) coopère un temps dans les domaines de l'établissement et de la validation de modèles de progression de fissure sous chargements spectraux et de l'identification de lois de comportement viscoplastiques cycliques de matériaux pour aubes et disques de turbines (en liaison avec SNECMA et Turboméca). Une action sur le vieillissement des structures d'avions est menée ensuite, dans le cadre du GARTEur.

La Direction des matériaux (OM) effectue, sous l'égide de Turboméca, un important programme de caractérisation de l'alliage pour aubes monocristallines AM3 en vue d'une utilisation sur moteurs. En 1991, dans le cadre d'une coopération ONERA-IMPHY-Turboméca-CEAT, démarre une coopération pour caractériser l'alliage Astroloy filé-forgé conventionnel pour disques (propagation de fissures en fatigue-fluage sur éprouvette ICBR).

La Direction de l'aérodynamique (OA) effectue des essais de profils, en stationnaire et instationnaire, pour pales d'hélicoptères ou ailes d'avions légers, et des mesures sur les sillages en instationnaire, dans la soufflerie S10⁸⁶ du CEAT.

L'IMFL procède à la caractérisation aérodynamique à grande incidence de l'Alphajet sur le montage $2k\pi$ de la soufflerie S4⁸⁷ du CEAT. Plus tard, l'IMFL effectue, sous l'égide du STPA et de l'Aérospatiale, la caractérisation aérodynamique et l'étalonnage de sondes anémo-clinométriques intégrées dans la maquette d'Airbus A300 au 1/22^{ème} pour mesure en vol de l'effet de sol, dans la soufflerie S4 et le tunnel de l'Hers. Des compléments d'essais sont effectués pour caractériser finement l'effet de sol statique et dynamique sur Mirage 2000 et comparer les résultats avec ceux des essais en vol de la maquette.

La Direction de la physique (OP) coopère avec le CEAT dans les domaines des essais de foudroiement (figure 92)⁸⁸ et du développement d'un imageur spectral. Des essais de choc de tension et de développement de courant sont effectués en 1989 et 1990 sur hélicoptère Écureuil modifié et sur voilure d'Airbus, dans le cadre de l'AFARP 27. Plus tard, des études sont menées sur les procédures d'essais des matériels aéronautiques en choc de tension, et les procédures pour les tests de

⁸⁵ Voir le chapitre 2 de ce document.

⁸⁶ aujourd'hui fermée.

⁸⁷ qui dépend maintenant de l'ENSICA.

⁸⁸ Voir également le fascicule *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 33.

qualification des réservoirs de carburant en matériaux composites. D'autre part, une maquette d'imageur spectral SERISIS, puis l'imageur lui-même sont réalisés.

Au CERT/DERMO, la coopération se limite à des opérations ponctuelles portant sur la mise au point d'un banc de caractérisation électromagnétique de matériaux.

Le problème de la « rationalisation » de l'utilisation des souffleries du CEAT et de l'ONERA est alors traité dans le cadre du C3S (Comité consultatif de coordination des souffleries).

La soufflerie S5 ($\varnothing = 5$ m), maintenant fermée, était utilisée surtout par les industriels, Dassault et Aérospatiale.

3.4 - L'ONERA et le CEPr⁸⁹

L'ONERA coopère également avec le CEPr depuis de nombreuses années. Les deux organismes sont complémentaires, l'ONERA se situant en général plus en amont, dans le domaine des essais de recherche, et le CEPr plus en aval, dans celui des essais de qualification à grande échelle. La coopération dans le domaine des essais acoustiques, dans le cadre de la convention DCAé-ONERA sur la soufflerie anéchoïque CEPRA 19, est à classer à part (voir plus loin).

La Direction de l'énergétique (OE) participe à la conception des bancs MINOS et RACE⁹⁰. Le banc RACE est ensuite exclusivement utilisé par les industriels. L'ONERA apporte son assistance pour des mesures particulières, notamment des mesures laser dans les compresseurs centrifuges pour Turboméca. Rappelons que la SNECMA dispose de sa propre équipe de mesures qui opère sur place en fonction de ses besoins. L'ONERA échange également avec les industriels des informations sur les bancs turbines en cours de conception.

La Direction de l'aérodynamique (OA) effectue d'une part la définition d'une tuyère Mach 3 et du tube de reprise pour les essais de combustion du missile ASMP à haute altitude, dans le cadre d'une convention du STEn ; d'autre part, l'avant-projet d'un banc de statoréacteur pour le missile TRISTAN, sous convention STEn ; enfin, la définition de prises d'air permettant de restituer au point fixe une distorsion donnée à l'entrée d'un moteur (sous contrat SNECMA). La coopération se poursuit ensuite dans le domaine des nouvelles prises d'air pour la qualification du moteur M88 dans les conditions de vol en incidence.

La Direction des matériaux (OM) procède pendant plusieurs années à des demandes d'essais mécaniques, notamment de fluage. En 1991 démarre une coopération SNECMA-ONERA-CEPr pour caractériser l'alliage pour disques Astroloy filé-forgé isotherme (propagation de fissures en fatigue-fluage, éprouvettes RT).

Enfin, la Direction de la Physique (OP) effectue en 1975, des essais acoustiques dans la soufflerie anéchoïque CEPRA 19. Un nouveau protocole est signé en juin 1990. Des détails sont donnés ci-dessous sur cette soufflerie.

⁸⁹ Voir le chapitre 3 de ce document.

⁹⁰ Voir le document *Etudes et recherches*, Partie II, Chapitre 2.

CEPRA 19 (figure 93)⁹¹

Depuis 1966, le CEPr met en œuvre une chambre anéchoïque de grandes dimensions particulièrement équipée pour les mesures de bruit de jet au point fixe. La charge de cette installation n'a cessé de croître et dès 1971 les demandes d'essais justifient le lancement d'un deuxième moyen analogue. Laissons Jean Carpentier raconter :

« *L'expérience des mesures en vol ayant montré que les essais au point fixe n'étaient pas représentatifs des phénomènes acoustiques en vol et qu'il fallait faire intervenir la vitesse de déplacement, on est conduit à réaliser une soufflerie anéchoïque. Deux projets⁹² sont alors proposés, l'un par le CEPr, à la DTI, et l'autre, par l'ONERA⁹³, à la DRME. Les spécifications sont identiques : il s'agit d'étudier les effets acoustiques de l'écoulement de l'air, sur des maquettes actives (avec bruit de jet, tuyères, rotors) ou passives (ailes avec volets hypersustentateurs), dans une veine ouverte, de diamètre 3 mètres pour les vitesses jusqu'à 60 m/s et de 2 mètres pour les vitesses jusqu'à 130 m/s. Cependant, les projets sont différents, dans leur conception et dans leur utilisation, le projet CEPr étant orienté vers les essais à caractère industriel, alors que celui de l'ONERA est mieux adapté aux études et recherches. Ceci conduit la DTI et la DRME à inciter le CEPr et l'ONERA à se rapprocher en vue de proposer un projet commun. L'ingénieur général Jean Gay, directeur du CEPr, et l'ingénieur général Pierre Contensou, directeur de l'ONERA, se mettent d'accord sur un nouveau projet, appelé CEPRA 19 (CEPr + ONERA) qui associe les deux équipes et bénéficie de leurs compétences, qui sont complémentaires. La soufflerie anéchoïque est installée au sein du CEPr⁹⁴, mise au point et utilisée par les deux équipes. CEPRA 19 est un bel exemple de coopération entre ces deux organismes qui ont ainsi doté la France d'un moyen d'essai de renommée internationale. »*

L'installation entre en service en 1977. Elle est utilisée notamment pour les programmes de recherche européens. Actuellement encore, cette installation de très grande qualité fait toujours l'objet d'études afin d'améliorer ses performances aérodynamiques⁹⁵ et acoustiques. Les méthodes les plus récentes d'analyse des écoulements y sont utilisées (sondages 3D d'un jet par PIV, etc.). Son exploitation est entièrement assurée par la Direction des grands moyens techniques (GMT) de l'ONERA depuis 1999.

BIBLIOGRAPHIE

Livre : *De l'aérostation à l'aérospatial : le Centre de recherche de l'ONERA à Meudon*, ONERA, 2007.

Plaquette : *De l'aérostation à l'aérospatial : le Centre de recherche de Chalais-Meudon*, ONERA, 2000.

⁹¹ Voir également le document *Etudes et recherches*, Partie III, Chapitre 1, Fig. 20.

⁹² Il semble qu'un troisième projet ait été présenté initialement par le CEAT.

⁹³ Rappelons que Pierre Rebuffet a été l'un des concepteurs de l'installation, en s'appuyant sur le bureau d'études de GSMA.

⁹⁴ en utilisant certains matériels disponibles au CEPr.

⁹⁵ CEPRA 19 a été dotée à l'origine d'un dispositif de simulation de jets unique en son genre, car capable du supersonique, ce qui a permis des avancées notables dans l'étude de ces phénomènes. Plus récemment, l'utilisation de simulateurs de réacteurs a été possible en faisant appel à l'azote liquide, selon des techniques développées pour ETW.

Marcel Pierre, *Création du Centre d'essais de l'ONERA à Modane-Avrieux*, 2^{ème} édition, ONERA, 1996.

Marcel Pierre, *Développement du Centre d'essais de l'ONERA à Modane-Avrieux*, ONERA, 1995.

Rapports techniques d'activité, ONERA, 1950-1995.

Jean Carpentier, « Recherches et progrès aérospatiaux : le quarantième anniversaire de l'ONERA », *La Vie des Sciences*, Comptes rendus, série générale, tome 4, n° 5, p. 405-436.

Jean Carpentier, « La recherche aéronautique et les progrès de l'aviation », *Revue Scientifique et Technique de la Défense (RSTD)*, N°40, 1998-2.

Plaquette : *Les Grands Moyens d'Essais*, ONERA, 1988.

Plaquette : *Institut de Mécanique des Fluides de Lille*, ONERA, 1988.

Plaquette : *L'ONERA en région Nord Pas-de-Calais : La science fait décoller votre projet*, ONERA, 2001.

Philippe Poisson-Quinton, « Chalais-Meudon : la naissance de l'ONERA – le rôle de Pierre Rebuffet », 1789-1989 : De l'aérostation à l'aérospatial, *Les Nouvelles de l'ONERA*, 14 juillet 1989, pp. 74-93.

Philippe Poisson-Quinton, « L'Aéronautique des "Années 60" : souvenirs d'un chercheur », *La Lettre de la AAAF*, n° 9, octobre 2004.

Film *50 ans d'aéroélasticité à l'ONERA*, ONERA, 2006.

Film *Les cathédrales du vent*, Jean Tensi, ENSMA, 2008.

REMERCIEMENTS

L'auteur de ce chapitre remercie chaleureusement Maurice Bazin, Xavier Bouis, Marcel Cado, Jean Carpentier, Alain Cochet, Marie-Claire Coët, Jean Détery, Paul Kuentzmann, Roger Labourdette, Jean-Luc Monlibert, Jean-Jacques Thibert et Jean-Marc Weber pour leurs contributions et/ou les documents communiqués et les remarques judicieuses lors de la relecture de tout ou partie du texte, ainsi que Jean-Pierre Bébert, François Fouquet, Philippe Pla et Ghyslaine Thomas-Fouquet pour l'aide apportée pour les illustrations.

Marcel Cado remercie vivement Bernard Colomies pour les informations concernant la SOPEMEA.

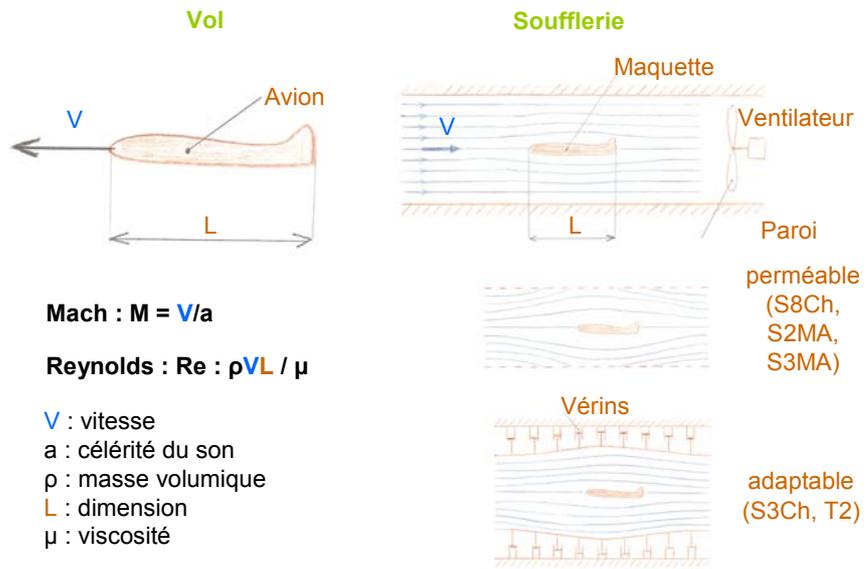
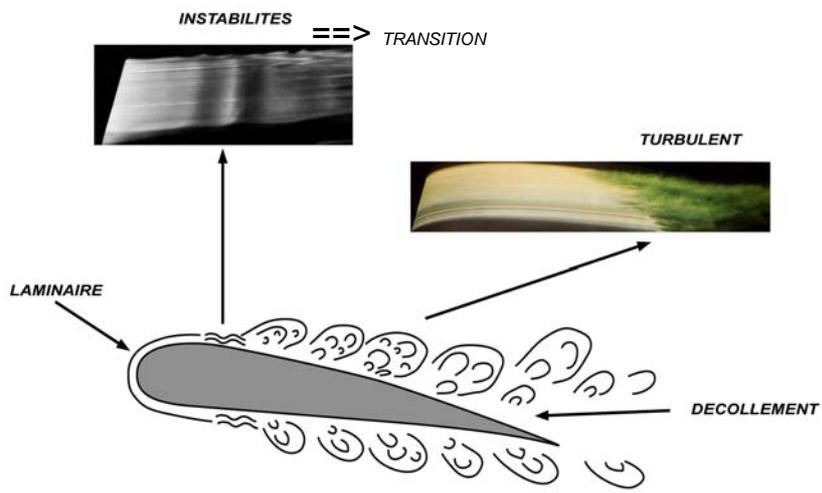


Fig. 1
Similitude



Reynolds : $Re = \rho V L / \mu$

ρ : masse volumique
 V : vitesse
 L : dimension
 μ : viscosité

Fig. 2
Couche limite

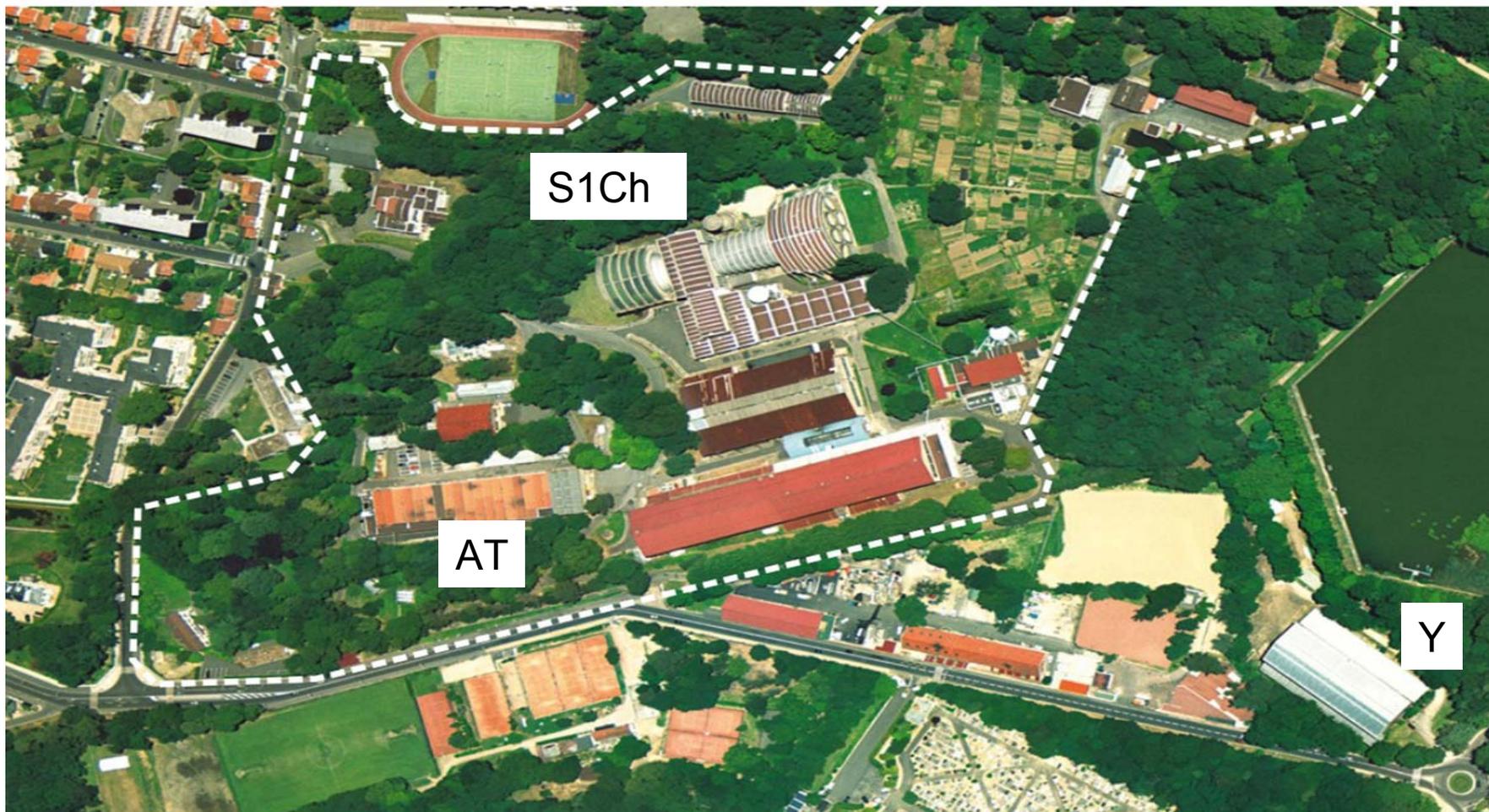
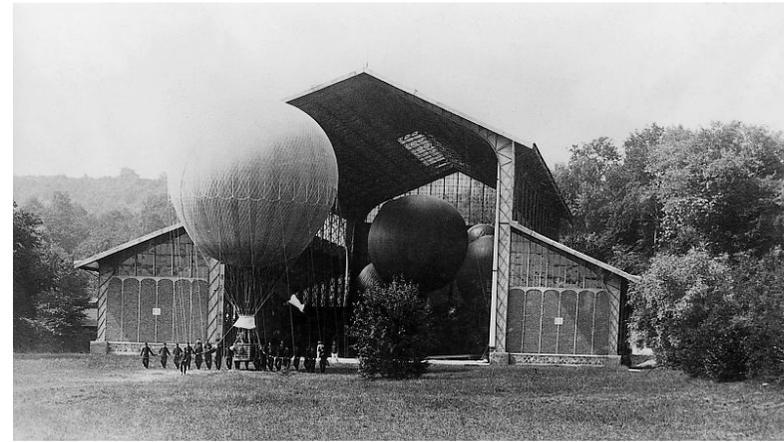


Fig. 3
Centre de Meudon

COMAERO



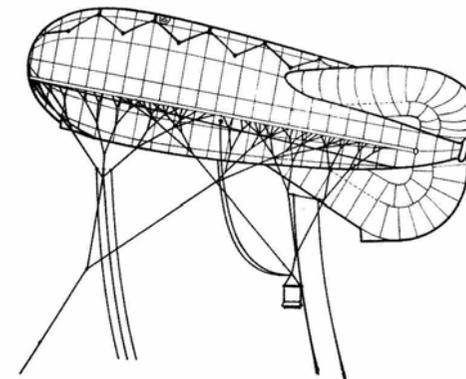
L'Entreprenant au siège de Mayence (1795)



Hangar Y (1880)



La France (Renard et Krebs, 1884)

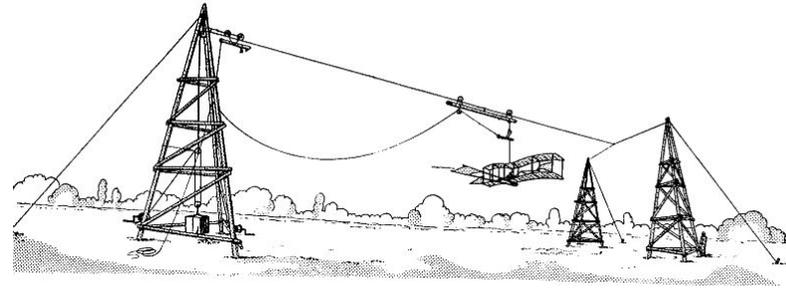


Ballon Caquot (1915)

Fig. 4
Meudon et l'aérostation



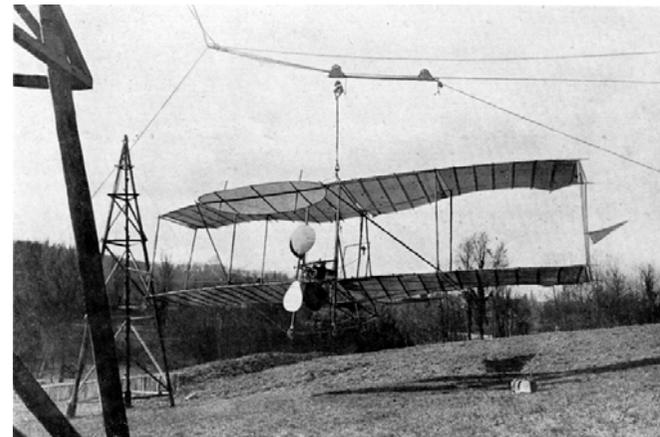
Le capitaine Ferber



L'Aérodrome 2

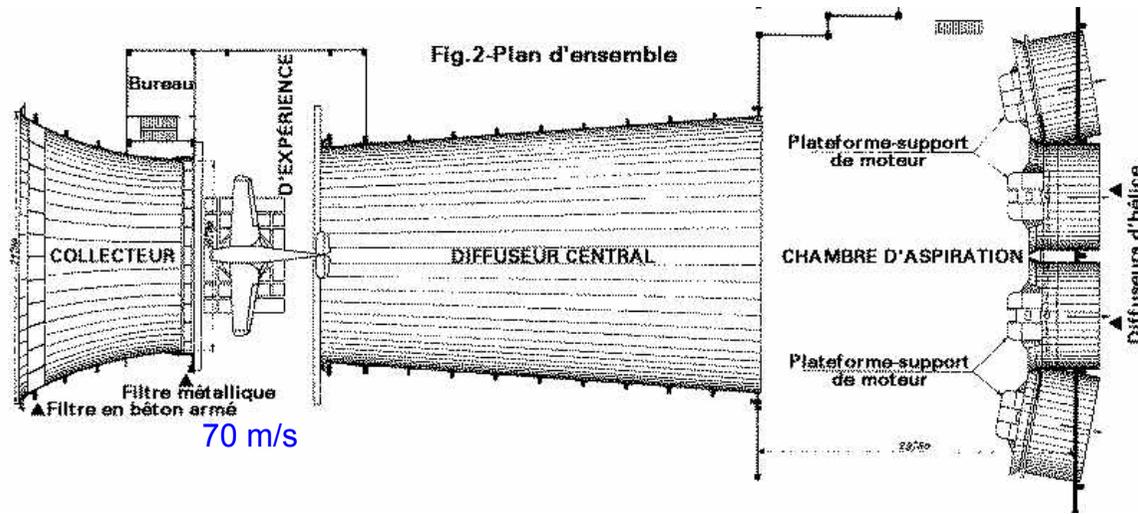


Vol plané



Aéroplane 6 bis (1905)

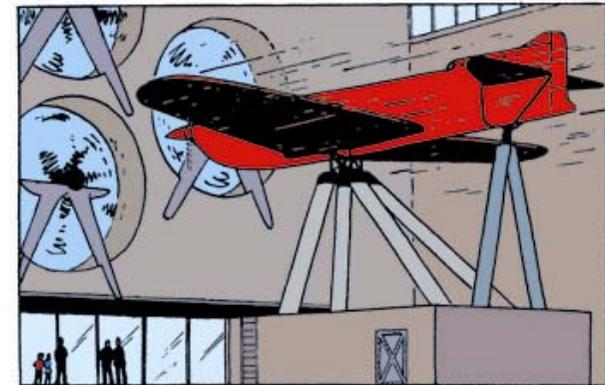
Fig. 5
Ferber à Meudon



Entrée du diffuseur 16 m x 8 m



Ventilateurs
6 000 CV

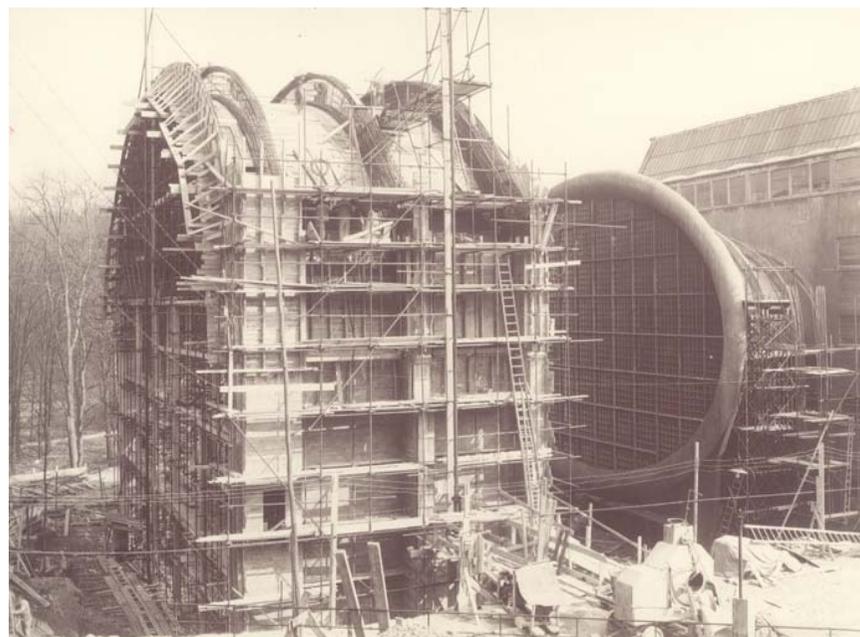


Hergé à S1 Ch !
Que remarque-t-on ?

Fig. 6
Soufflerie S1Ch de Meudon (1935)



Chantier en 1933



Modification de la partie amont (1950)

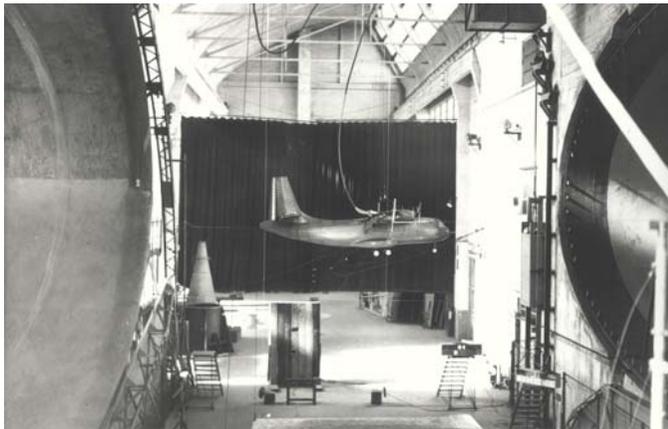
Fig. 7
Construction de la soufflerie S1Ch de Meudon



« Pou du ciel » (1936)



Morane –Saulnier 315 (1937)



Breguet 941 (1960)



Aile Rogallo (1976)

Fig. 8
Exemples d'essais dans la soufflerie S1Ch de Meudon



Fig. 9
Essai d'une maquette d'un projet d'ATSF (Avion de transport supersonique futur)
dans la soufflerie S2Ch de Meudon

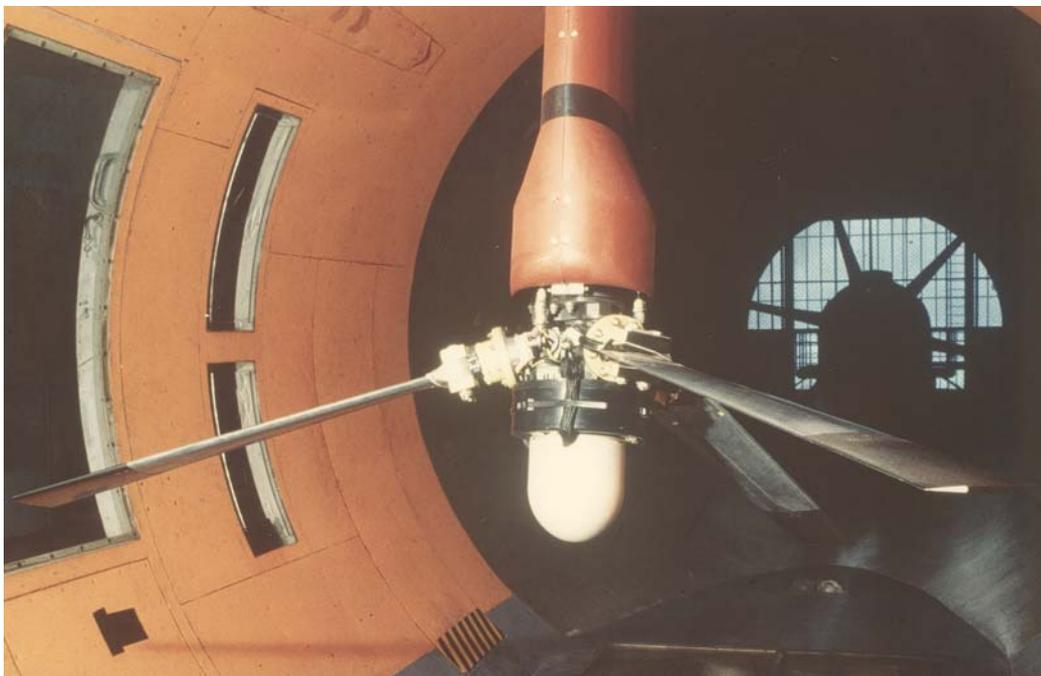


Fig. 10
Essai aérodynamique de rotor d'hélicoptère tripale (extrémité de pale
rectangulaire) dans la soufflerie S2Ch de Meudon



Fig. 11
Banc d'essais dynamiques de rotors dans la soufflerie S2Ch de Meudon



Fig. 12
Etude par vélocimétrie laser de l'écoulement aérodynamique autour d'une maquette d'hélicoptère Dauphin dans la soufflerie S2Ch de Meudon



Fig. 13
Les souffleries de Modane. Au premier plan, la conduite d'alimentation des turbines Pelton

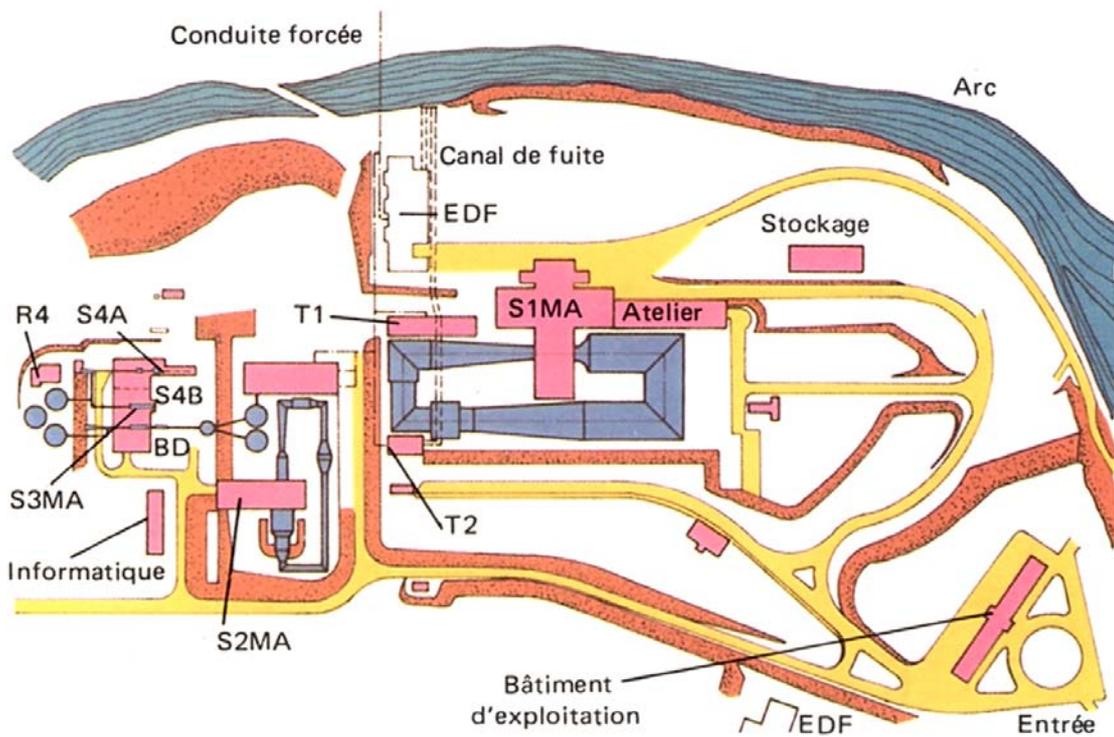
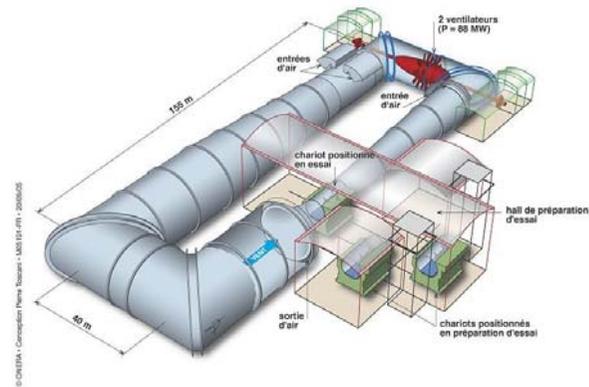


Fig. 14
Plan du Centre de Modane. La photo (Fig. 13) est prise depuis un point de vue situé en haut du plan



Section veine d'essais :
 $\text{Ø} = 8 \text{ m}$

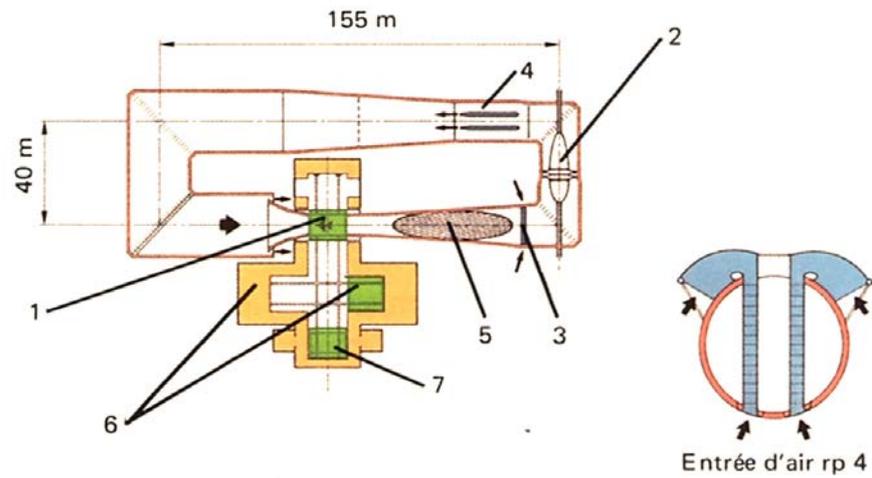


Vannes de guidage de l'écoulement ($\text{Ø} = 24 \text{ m}$)



Ventilateurs
($\text{Ø} = 15 \text{ m}$, 88 MW)

Fig. 15
Soufflerie transsonique S1MA de Modane (1952)



- | | |
|-------------------------------|--|
| 1. Veine d'essai, chariot | 5. Filet |
| 2. Ventilateurs V1, V2 | 6. Alvéoles de montage |
| 3. Entrée d'air 1 annulaire | 7. Position essai de moteurs au point fixe |
| 4. Entrées d'air 2 verticales | |

Fig. 16
Plan de la soufflerie S1MA de Modane

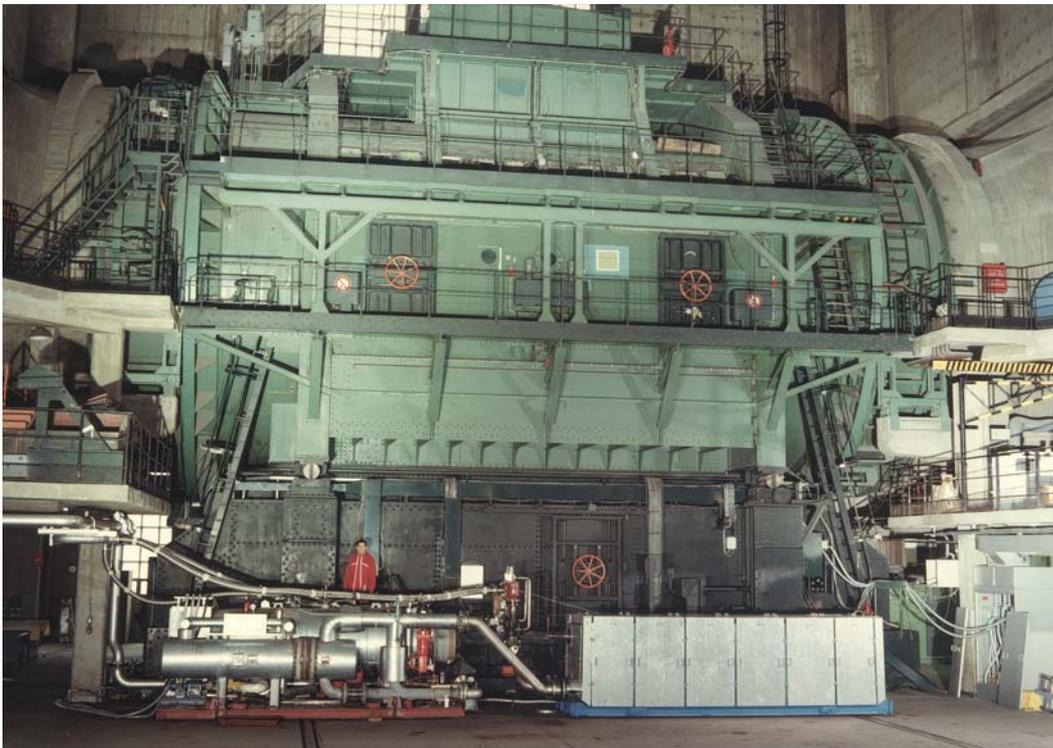


Fig. 17
Chariot n° 2 et unités de conditionnement d'air à haute pression de la soufflerie S1MA de Modane

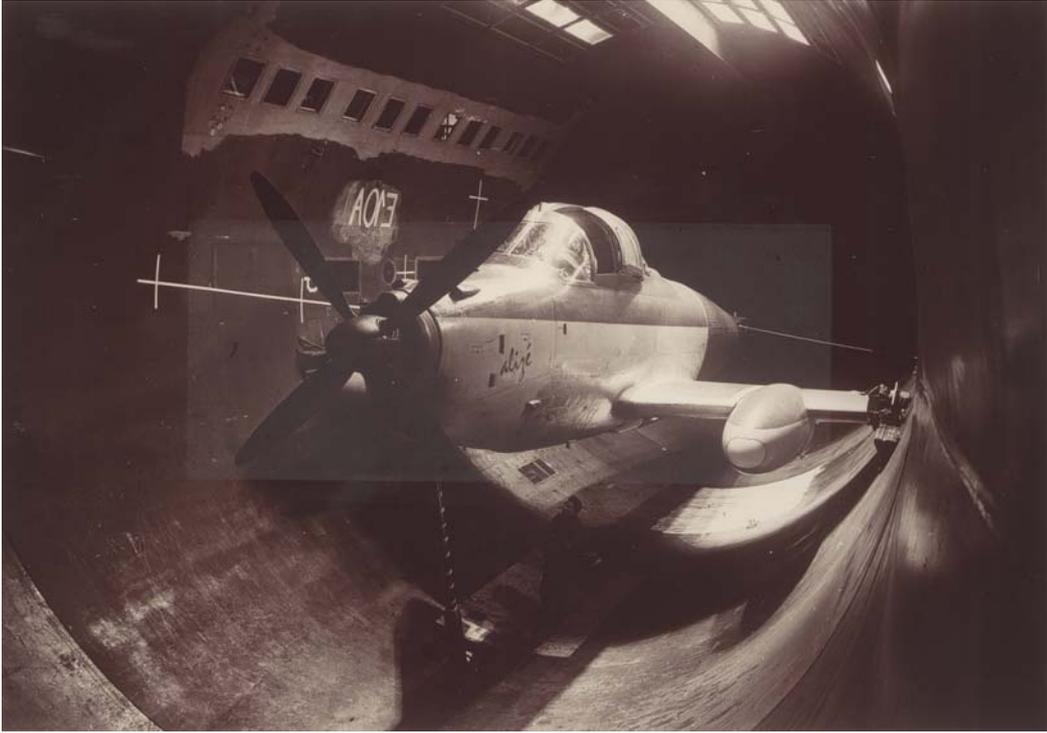


Fig. 18
Essai d'une maquette de Breguet Alizé dans la soufflerie S1MA de Modane (1960)

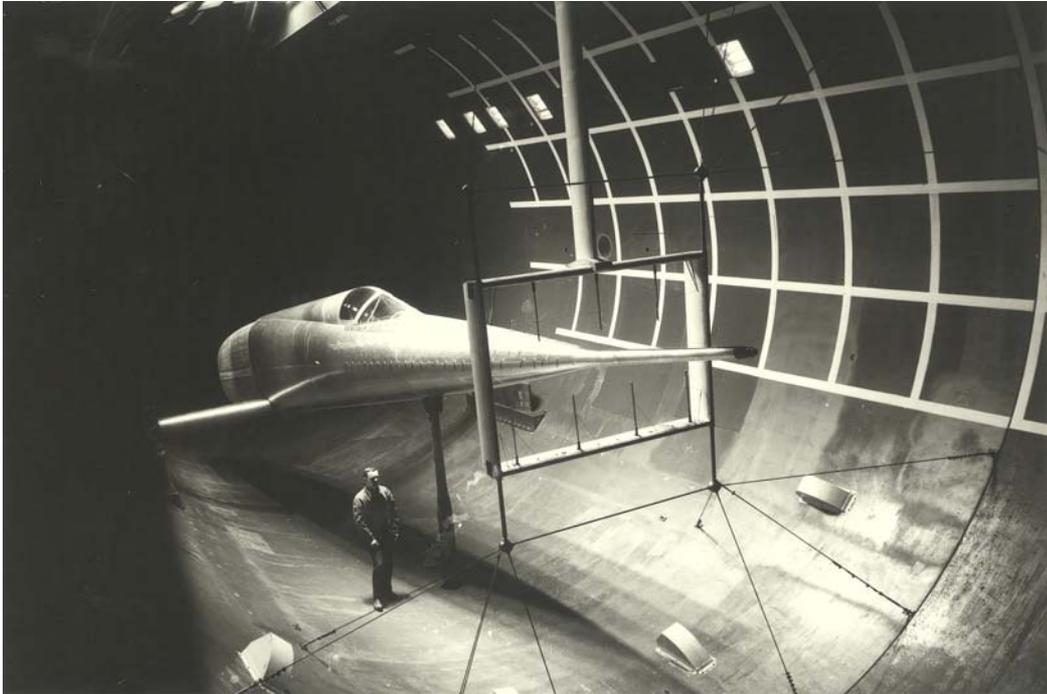


Fig. 19
Essai de visibilité à travers le pare-brise du Mirage IV par temps de pluie, dans la soufflerie S1MA de Modane (1963)

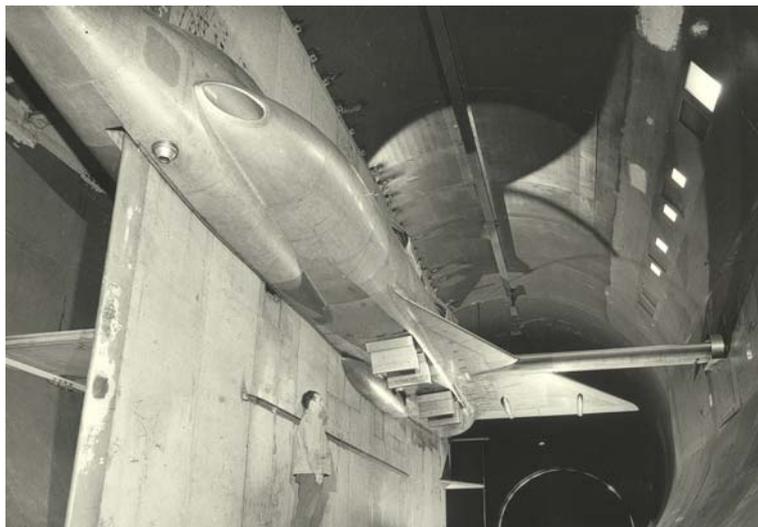


Fig. 20

Etude d'adaptation des moteurs de sustentation Rolls-Royce RB162 sur l'avion à décollage vertical Mirage III V, dans la soufflerie S1MA de Modane (demi-maquette échelle 1) (1964)



Fig. 21

Essai d'une maquette du Mirage 2000 dans la soufflerie S1MA de Modane (1977)



Fig. 22

Essai de largage de verrière sur avion Fouga dans la soufflerie S1MA de Modane



Fig. 23

Essai d'une demi-maquette de l'avion Mercure (éch. 1/5) dans la soufflerie S1MA de Modane (1972)

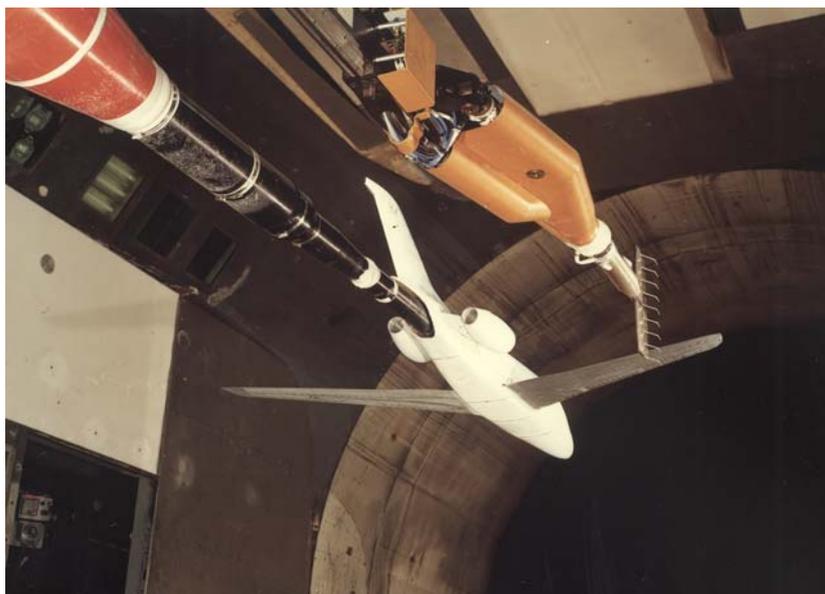


Fig. 24

Essai d'une maquette du Falcon 20X dans la soufflerie S1MA de Modane, avec peignage de l'écoulement aval (1979)



Fig. 25

Essai d'une demi-maquette d'Airbus A340 motorisée dans la soufflerie S1MA de Modane



Fig. 26

Essai d'une maquette motorisée d'avion de transport régional dans la soufflerie S1MA de Modane (Programme de recherche européen GEMINI)



Fig. 27

Essai d'un rotor de 4 m de diamètre dans la soufflerie S1MA de Modane (1968)

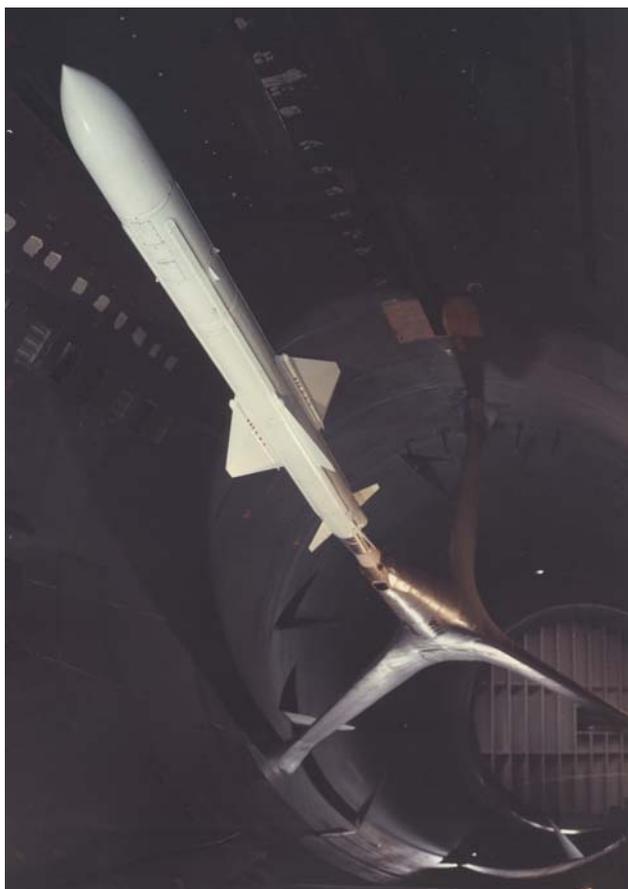


Fig. 28
Essai d'une maquette en vraie grandeur du missile Exocet MM40 dans la soufflerie S1MA de Modane (1974)



Fig. 29
Le Griffon vu depuis la chambre de tranquillisation de la soufflerie S1MA de Modane (1956)

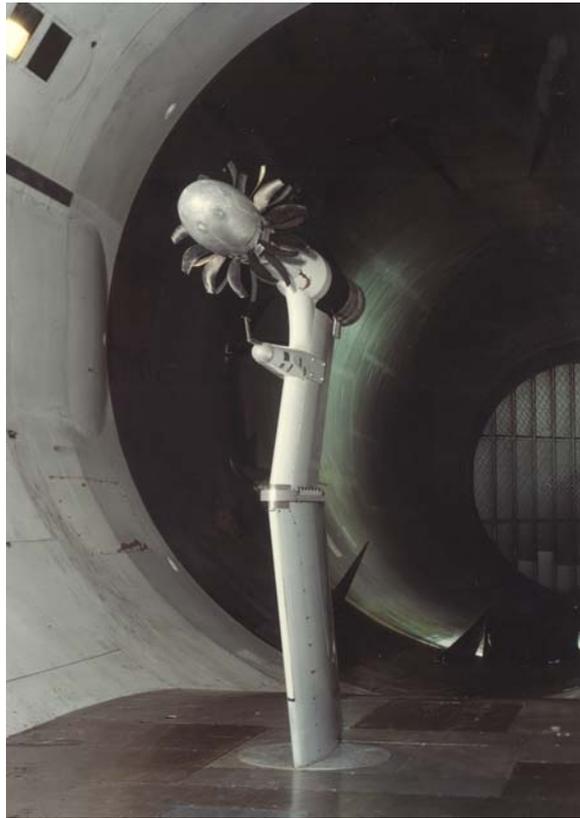


Fig. 30
Essai d'hélices contrarotatives du turboréacteur à hélices rapides (THR) de SNECMA-General Electric



Fig. 31
Essai de givrage sur une aile d'ATR 72 dans la soufflerie S1MA de Modane

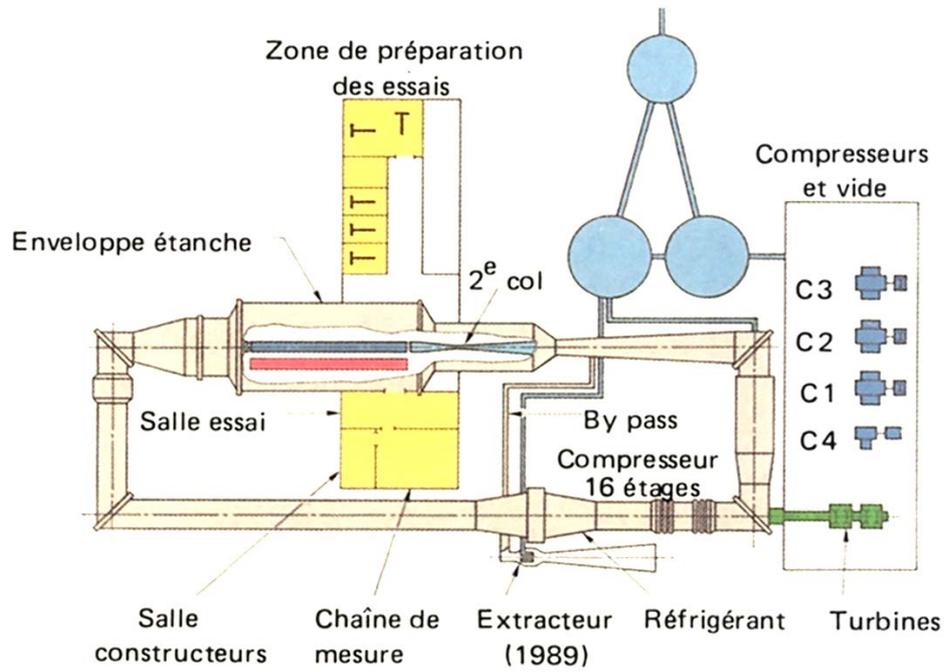


Fig. 32
Plan de la soufflerie S2MA de Modane

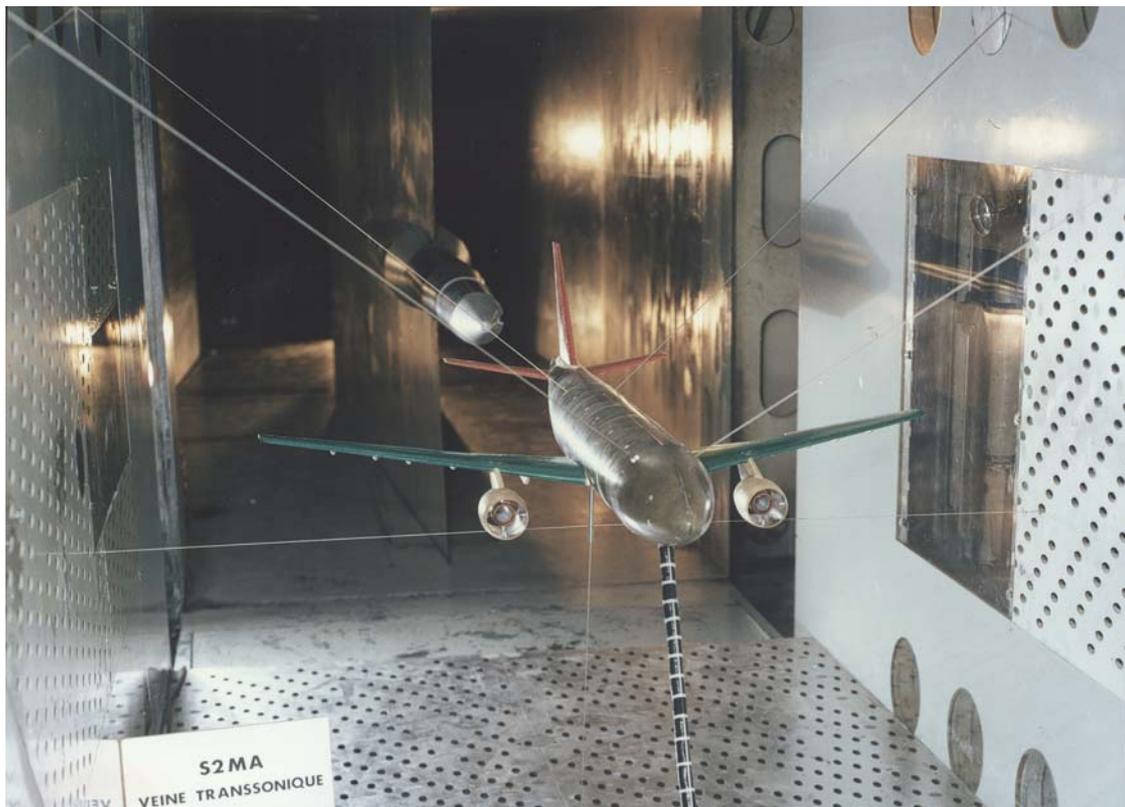


Fig. 33
Essai de flottement d'une maquette d'Airbus A300B dans la soufflerie S2MA de Modane

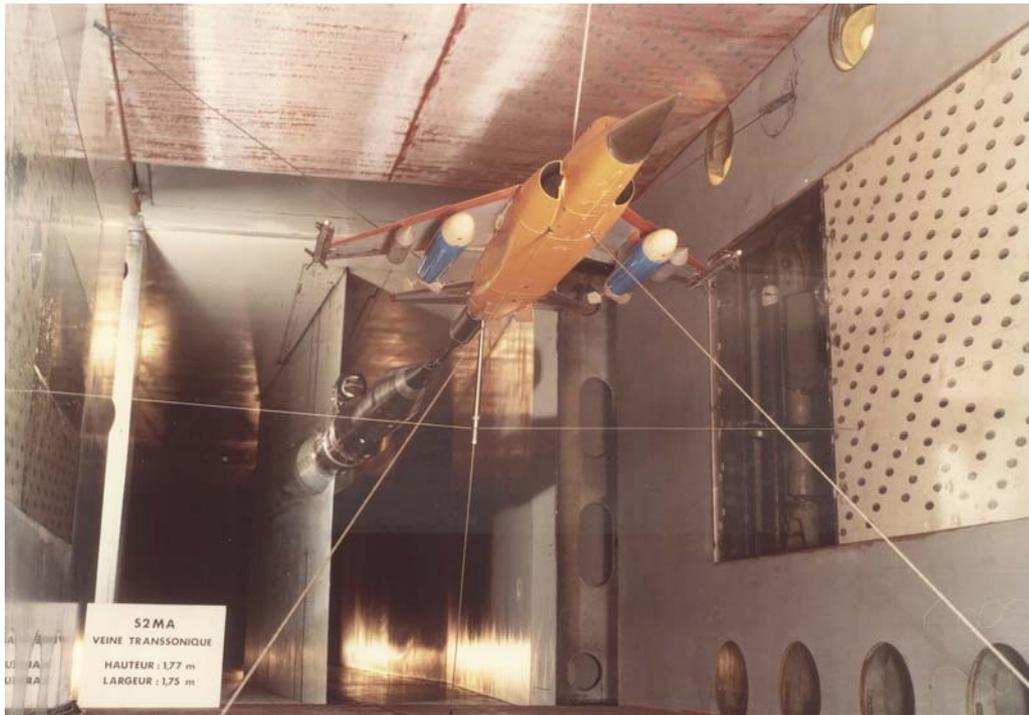


Fig. 34
Essai de flottement sur une maquette de Mirage F1 avec charges, dans la soufflerie S2MA de Modane

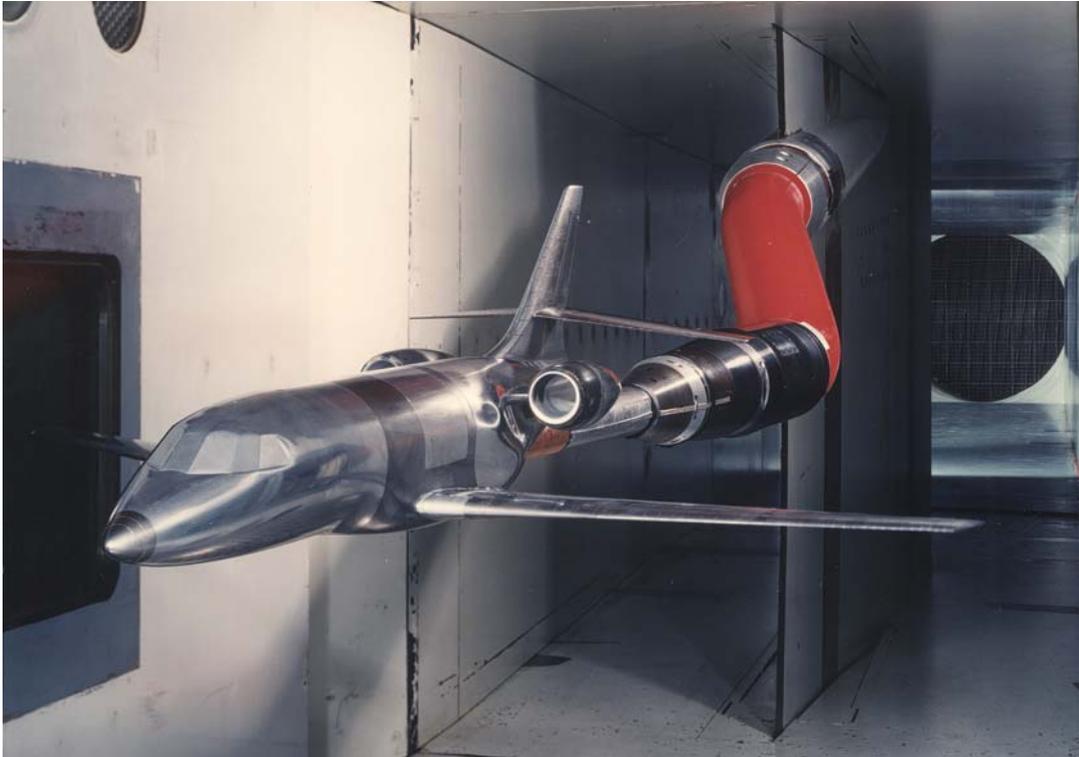


Fig. 35
Essai d'une maquette de Falcon 2000 dans la soufflerie S2MA de Modane

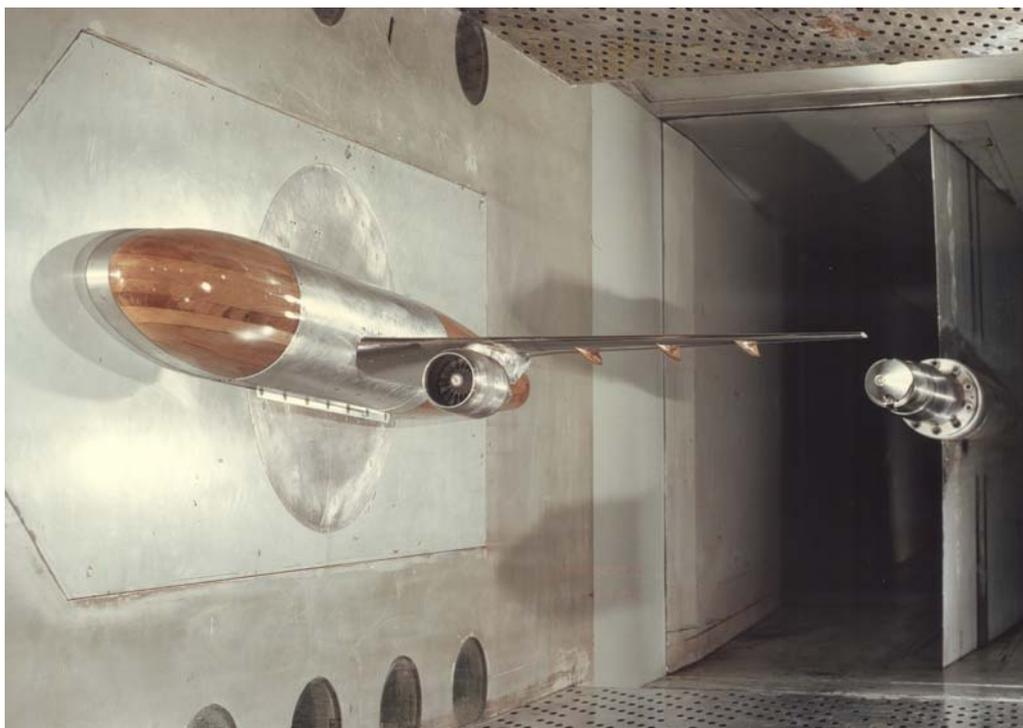


Fig. 36
Essai à la paroi d'une demi-maquette d'Airbus A310 dans la soufflerie S2MA de Modane

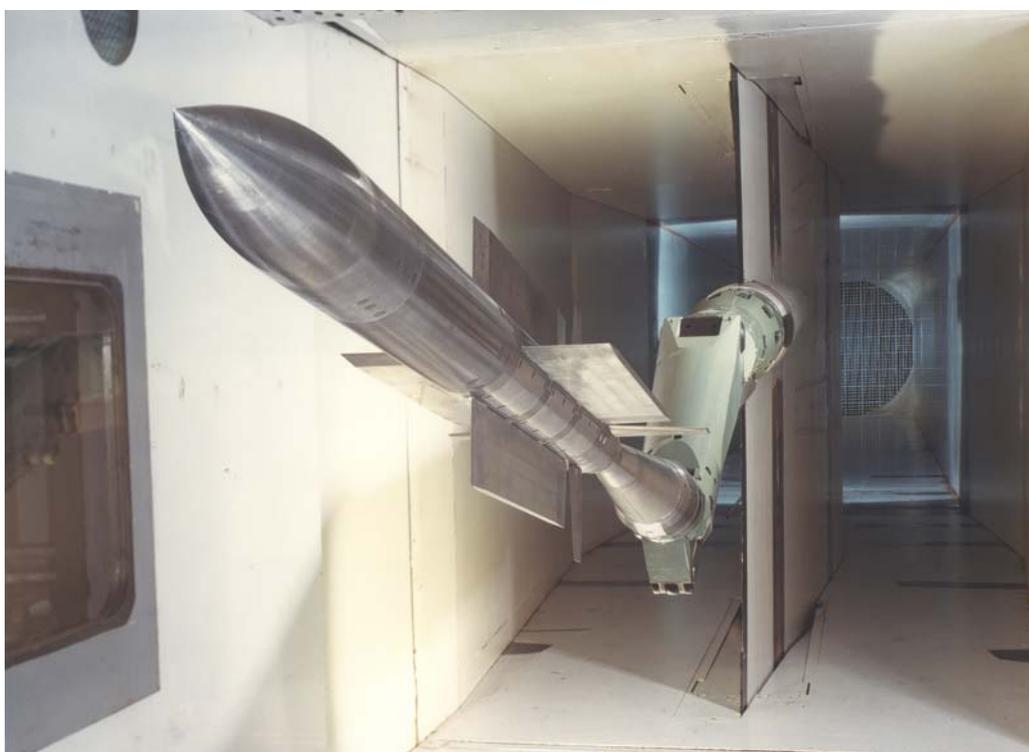


Fig. 37
Essai du missile ASTER de l'Aérospatiale dans la soufflerie S2MA de Modane (1987)

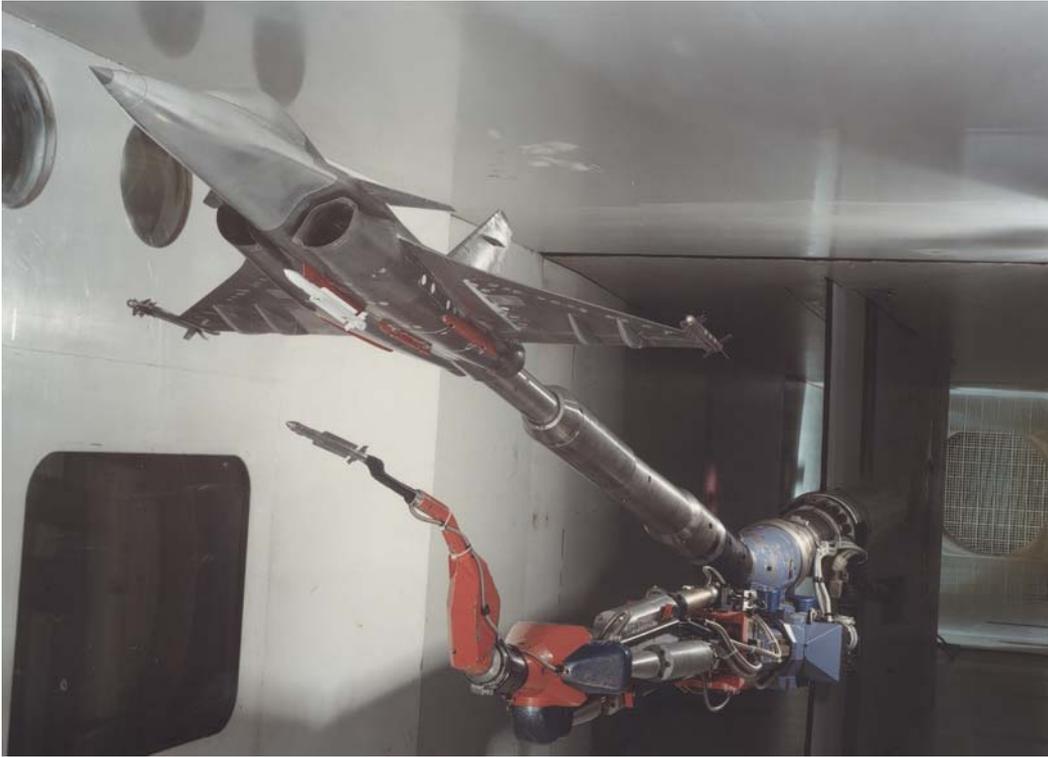


Fig. 38

Etude, au moyen du dispositif à six degrés de liberté de la soufflerie S2MA de Meudon, de la trajectoire initiale d'un missile MICA porté par un Rafale



Fig. 39

Essai de séparation d'un propulseur d'appoint du lanceur Ariane 3 dans la soufflerie S2MA de Modane (échelle 1/55) (1981)

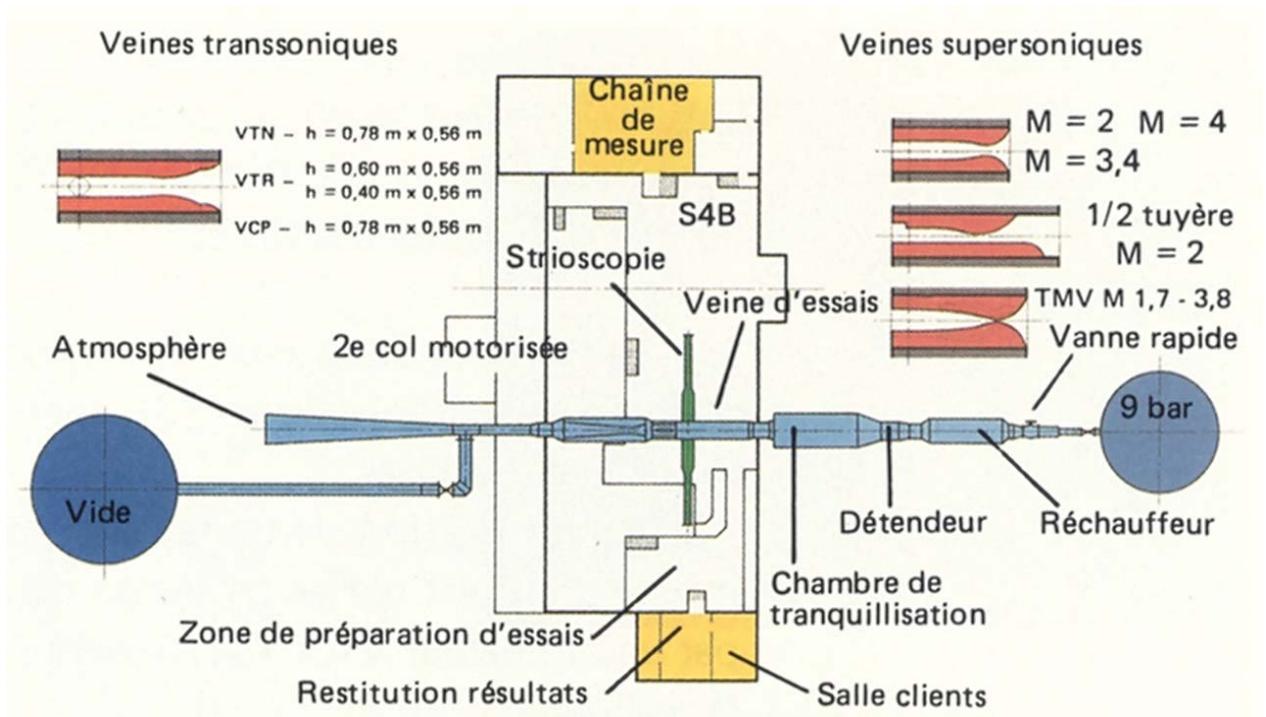


Fig. 40
Plan de la soufflerie S3MA de Modane

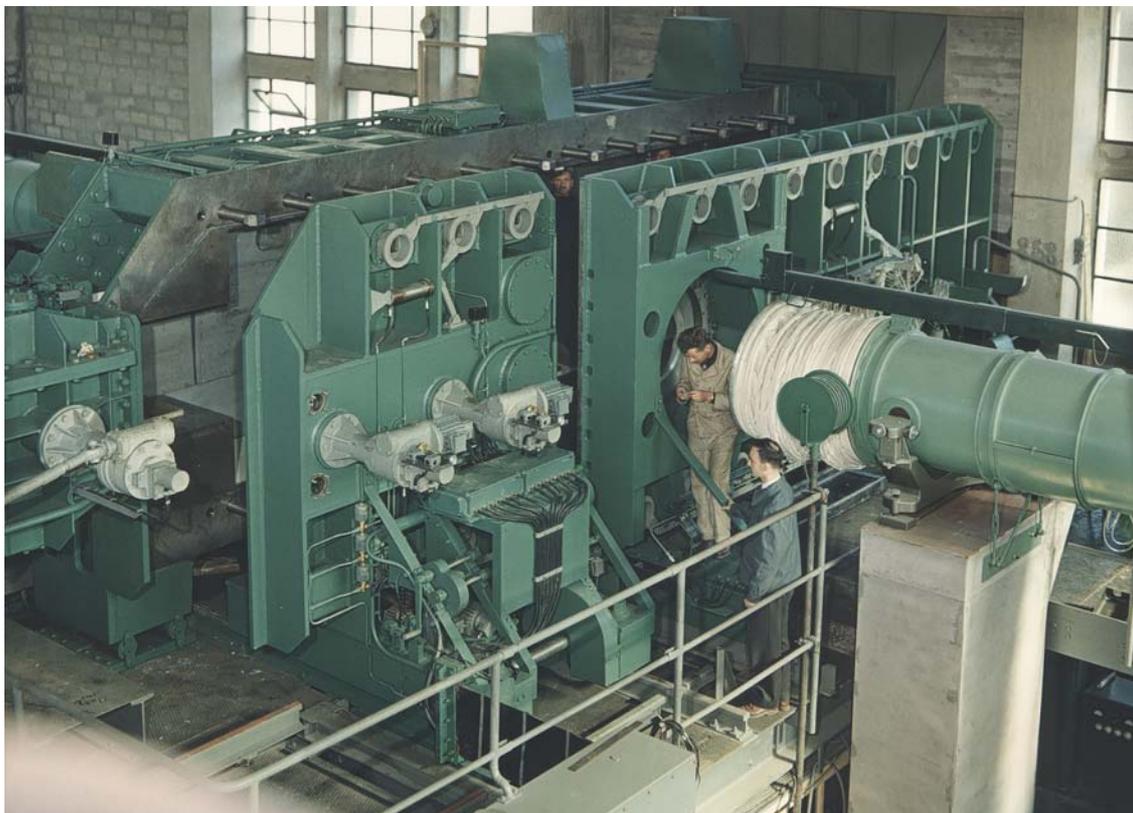


Fig. 41
Vue générale de la soufflerie S3MA de Modane

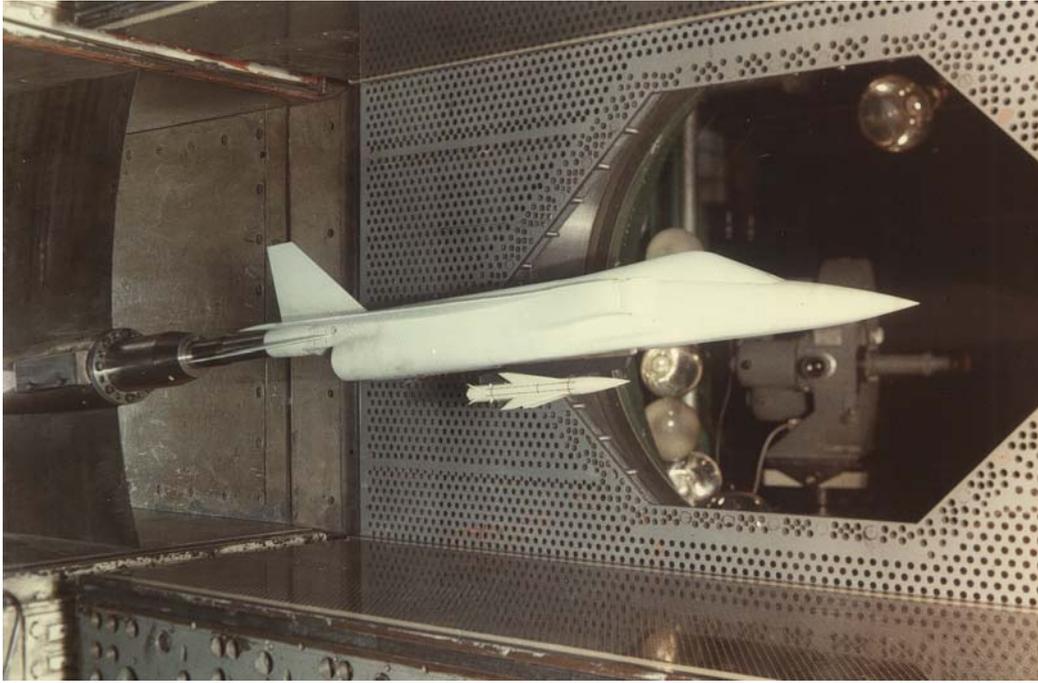


Fig. 42

Essai de tirs d'engins AS30 sous Jaguar (échelle 1/15) dans la soufflerie S3MA de Modane (1969)

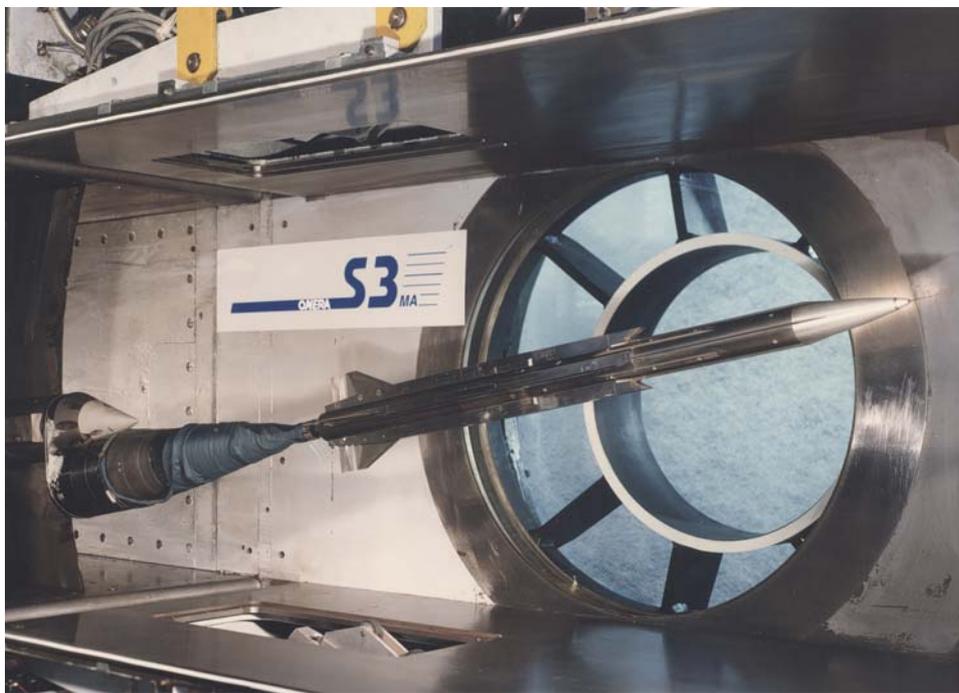


Fig. 43

Essai d'aérodynamique externe d'une maquette du missile ONERA-Matra MPSR2 (Missile probatoire à statofusée rustique 2^e génération) dans la soufflerie S3MA de Modane (1991)

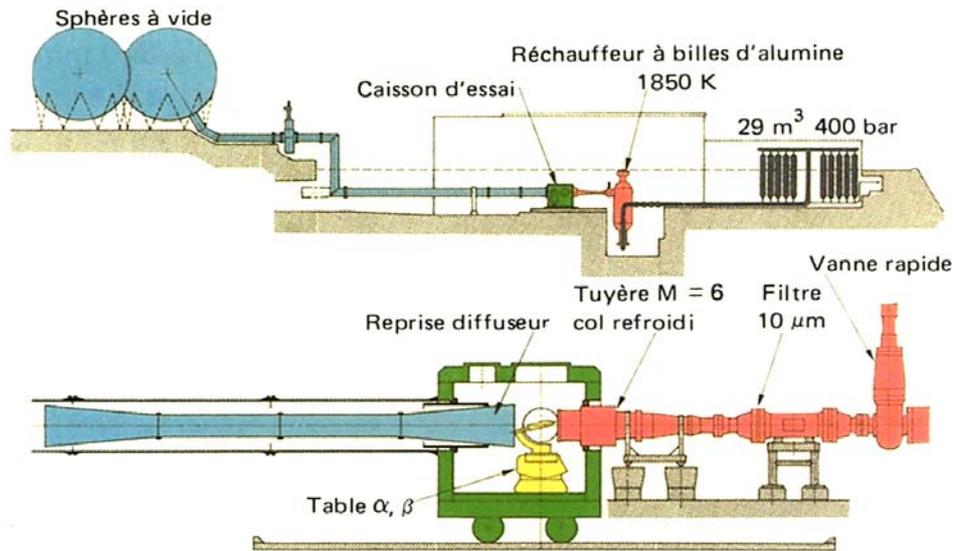


Fig. 44
Schéma de la soufflerie S4MA de Modane



Fig. 45
Vue de la soufflerie S4MA de Modane

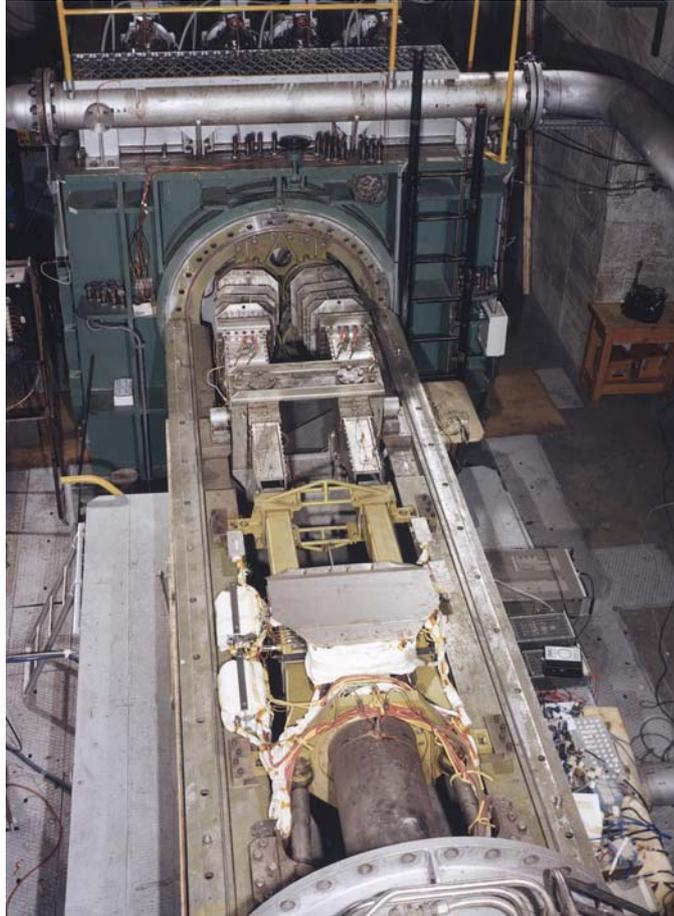


Fig. 46
Etude des entrées d'air de l'ASMP dans la soufflerie S4MA de Modane

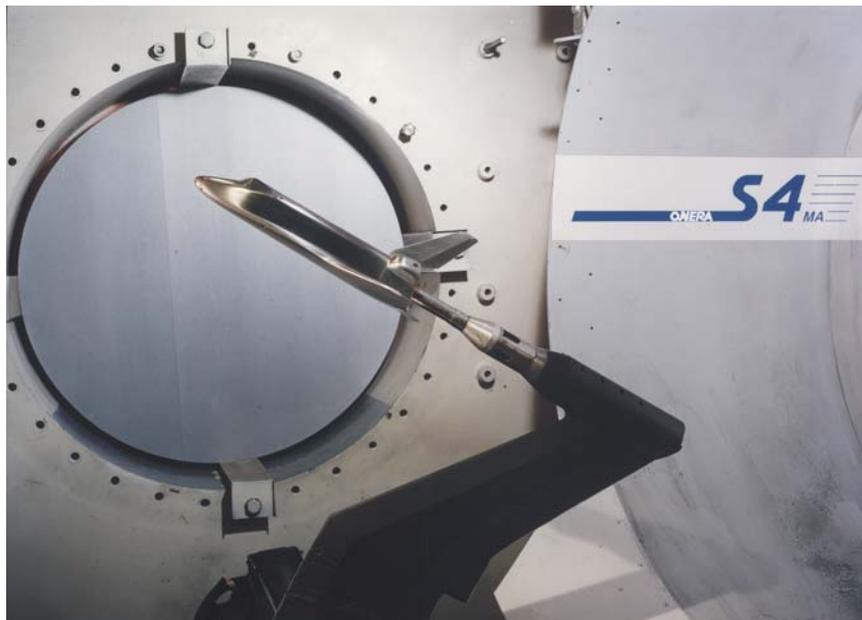


Fig. 47
Essai d'une maquette d'Hermès à l'échelle 1/30 dans la soufflerie S4MA de Modane

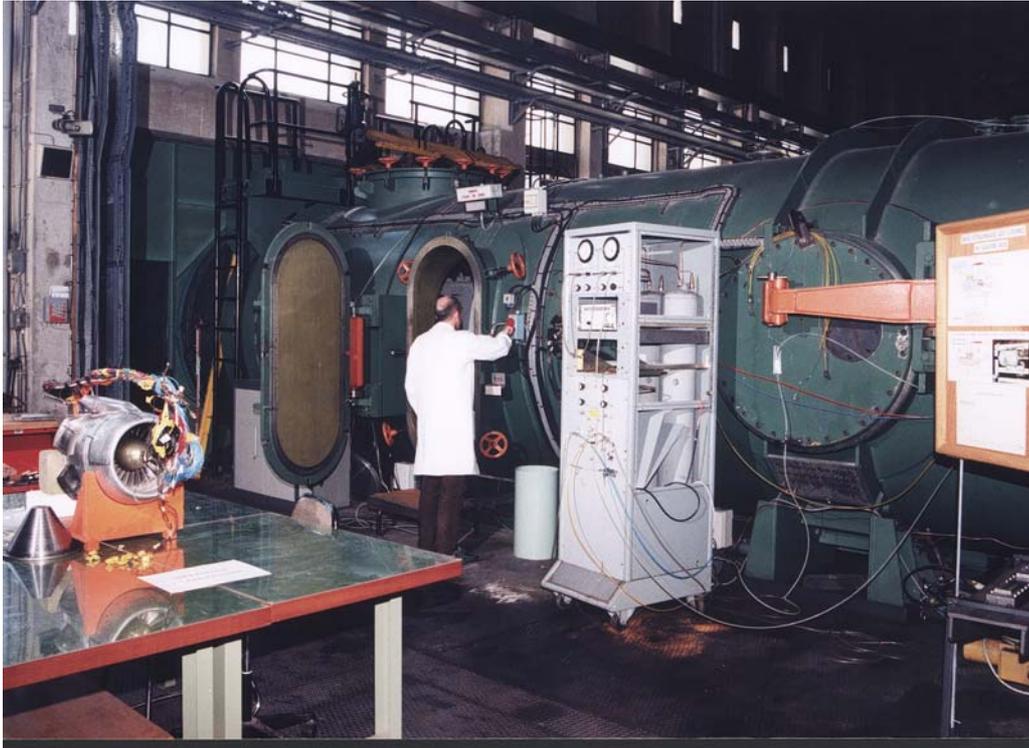


Fig. 48
Caisson S4B de Modane

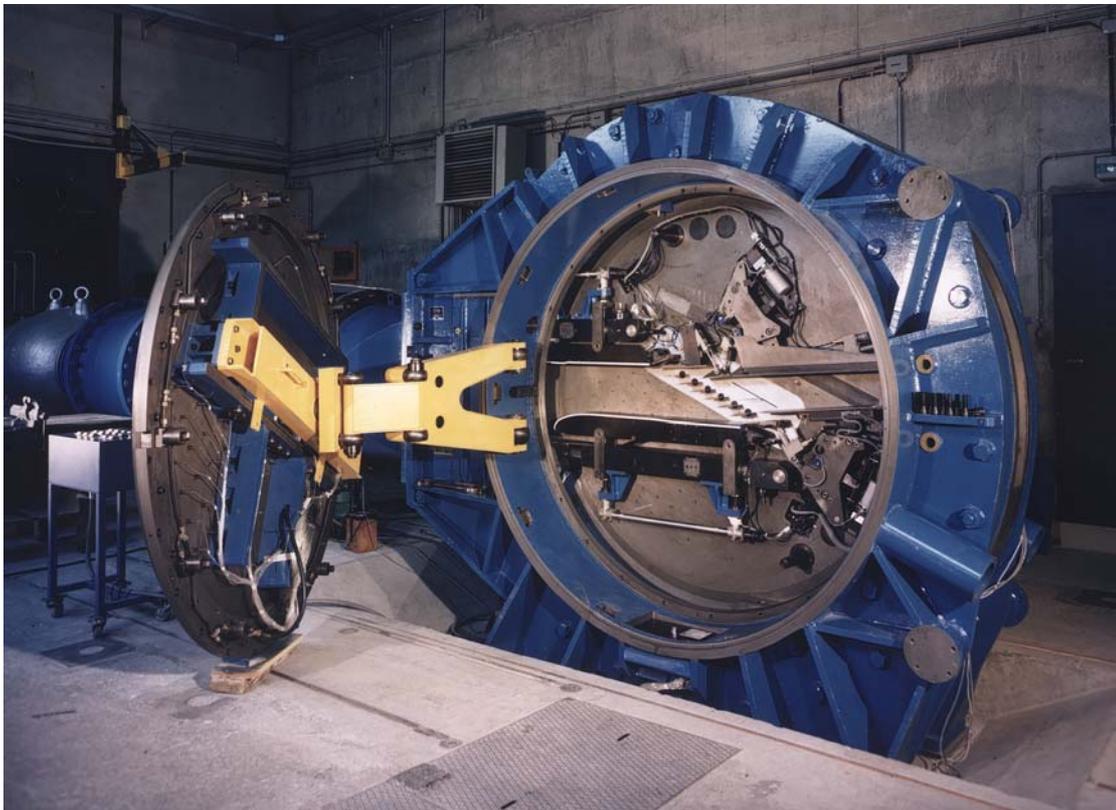


Fig. 49
Soufflerie de grille d'aubes R4.3 de Modane

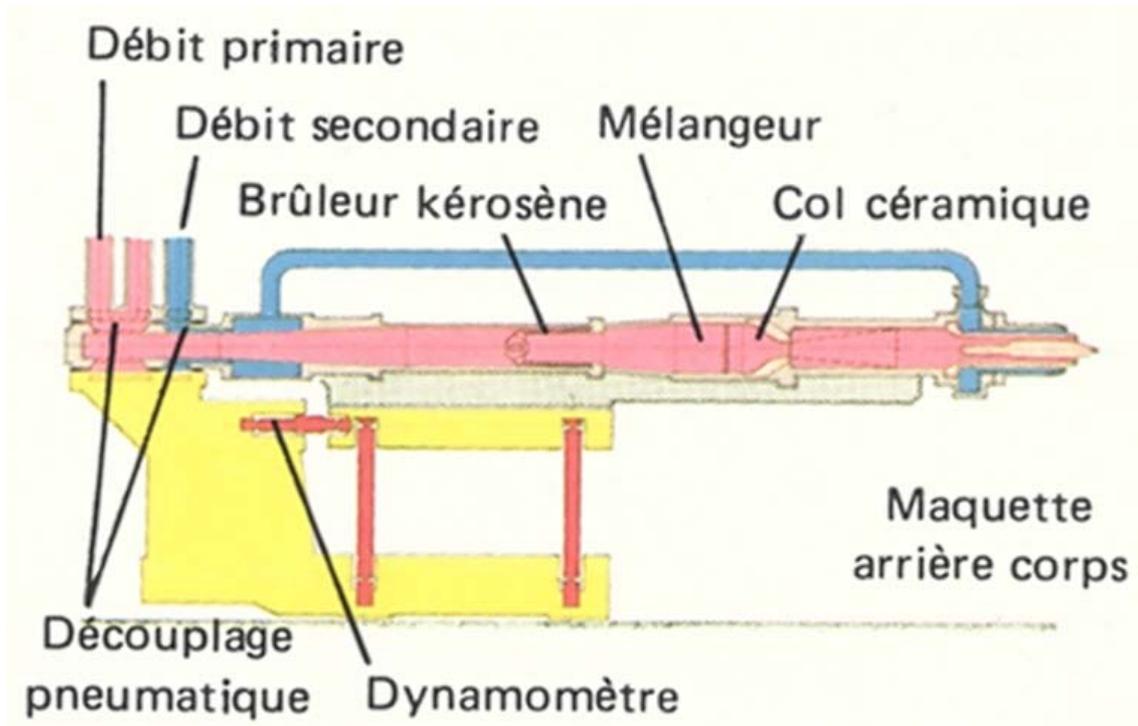


Fig. 50
Banc de dyanlpie BD2 de Modane

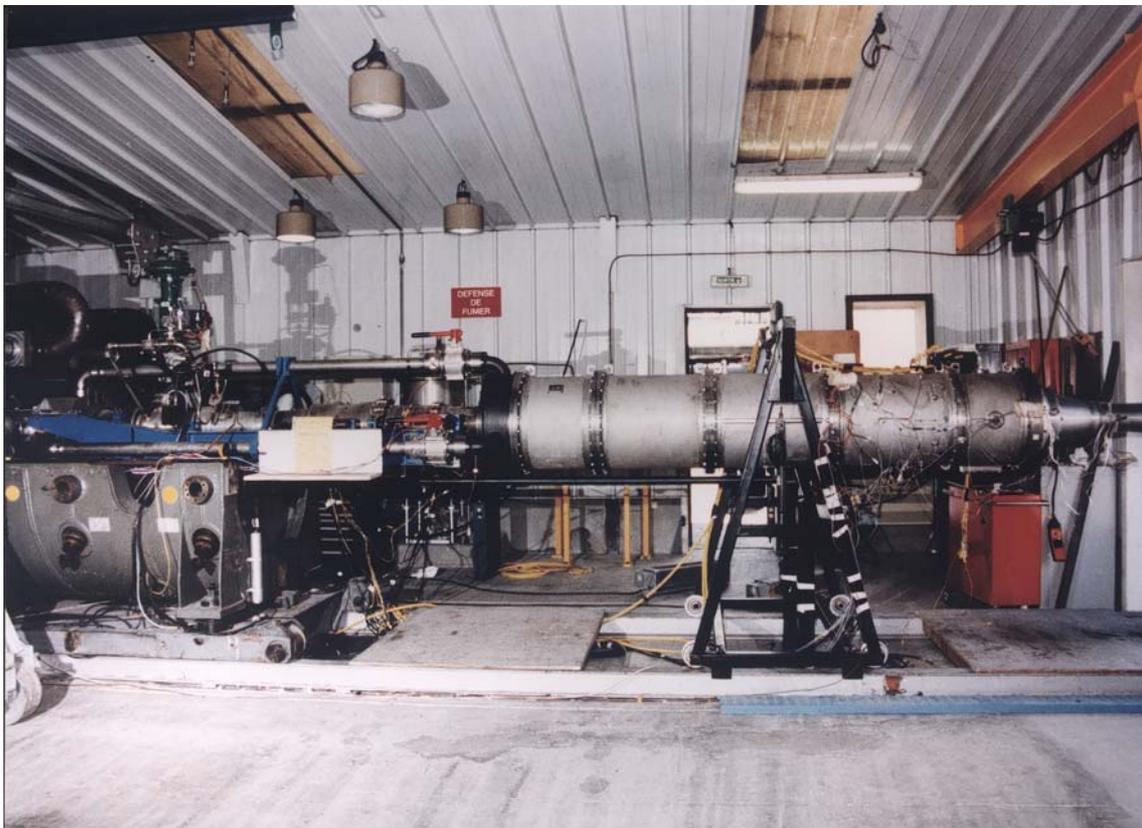


Fig. 51
Essai de qualification du banc de dyanlpie BD2 au CMA



Fig. 52
Le Centre du Fauga-Mauzac (CFM) en 1994



Fig. 53
Soufflerie F1 du Fauga, en construction

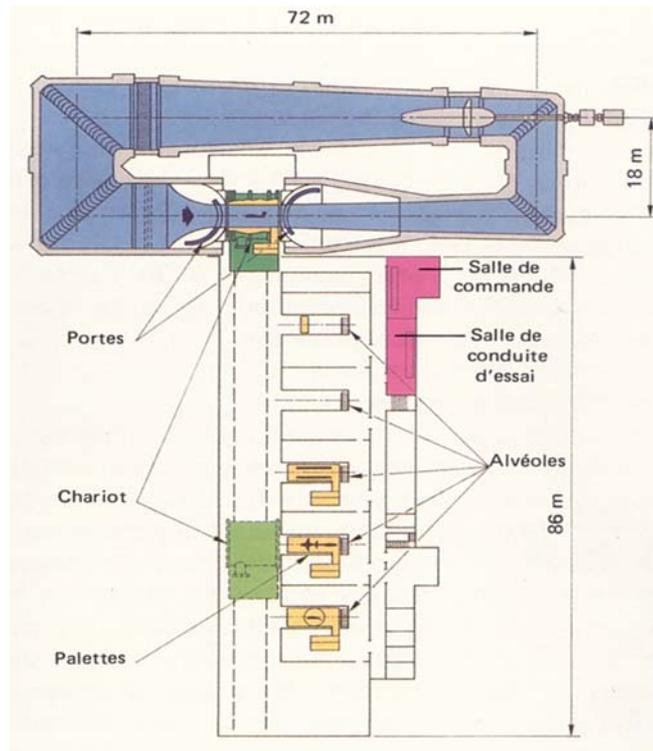


Fig. 54
Plan de la soufflerie F1 du Fauga



Fig. 55
Préparation d'un essai sur maquette Airbus dans l'un des chariots de la soufflerie F1 du Fauga



Fig. 56

Essai d'une maquette du Mirage 2 000 (éch. $\frac{1}{4,28}$) dans la soufflerie F1 du Fauga



Fig. 57

Essai d'une maquette (échelle 1/10) du Mercure 100 hypersustenté dans la soufflerie F1 du Fauga



Fig. 58
Essai d'une maquette (échelle 1/8) de l'ATR 42 dans la soufflerie F1 du Fauga



Fig. 59
Essai d'une maquette Aérospatiale d'Airbus A340 dans la soufflerie F1 du Fauga

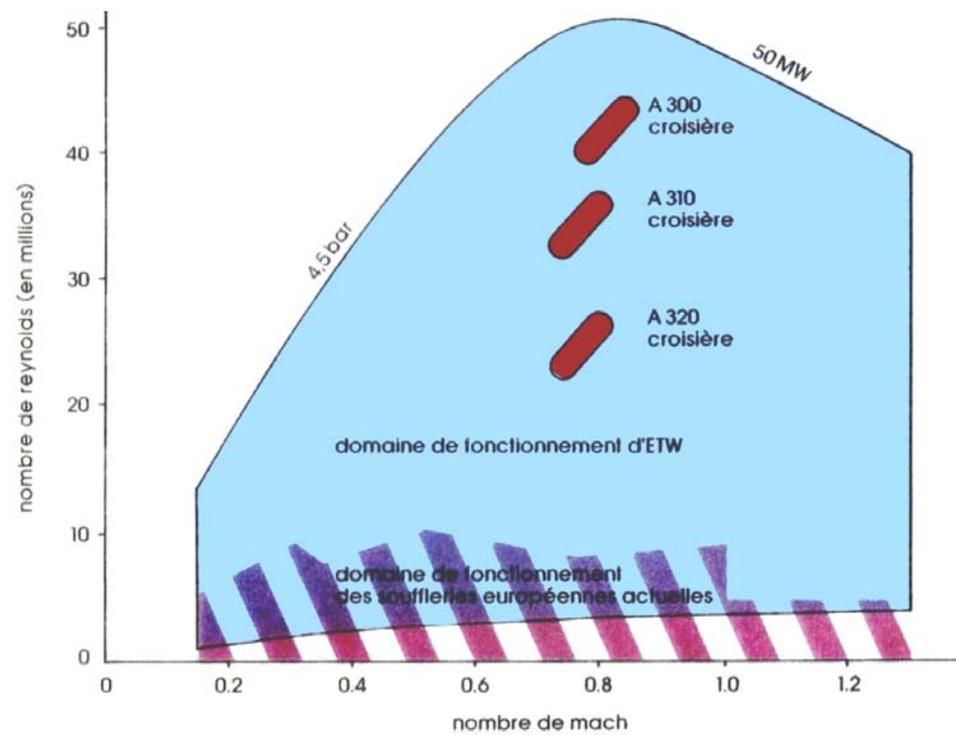


Fig. 60
Soufflerie transsonique cryogénique européenne ETW (1995)

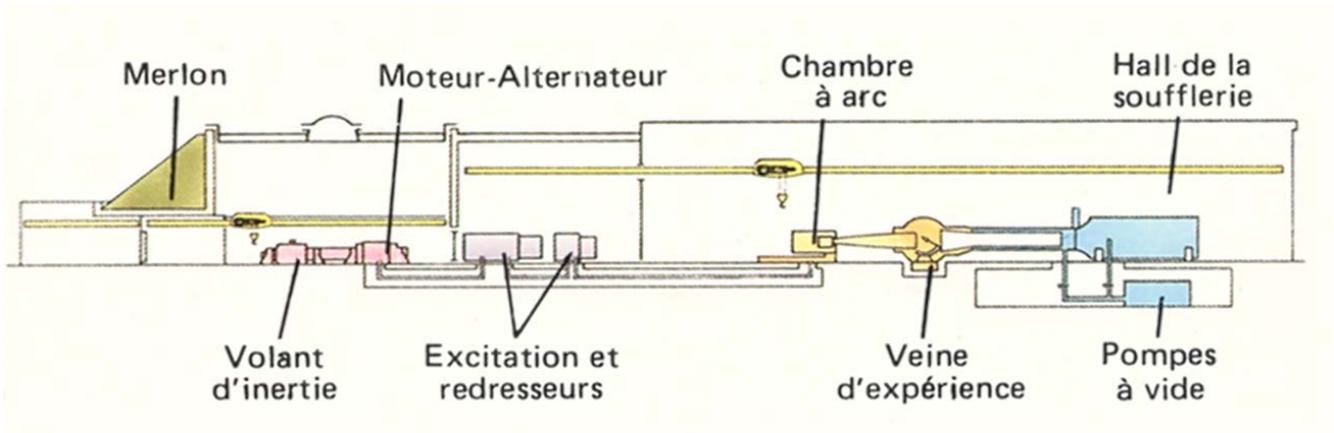


Fig. 61
Soufflerie F4 du Fauga

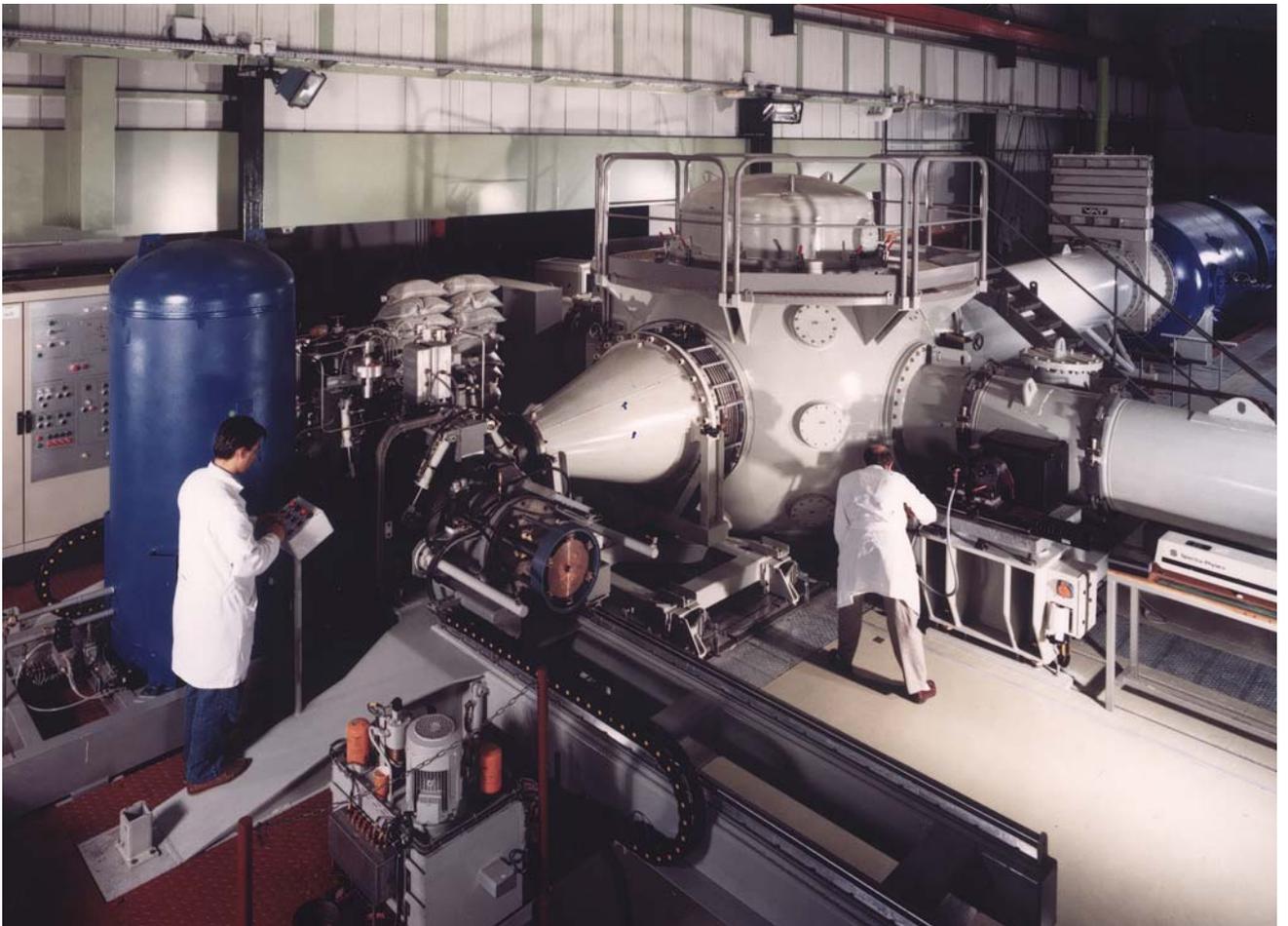


Fig. 62
Soufflerie hypersonique F4 au CFM



Fig. 63
Essai d'une maquette X38 à l'échelle 1/24 pour des mesures d'efforts, dans la soufflerie F4 du Fauga

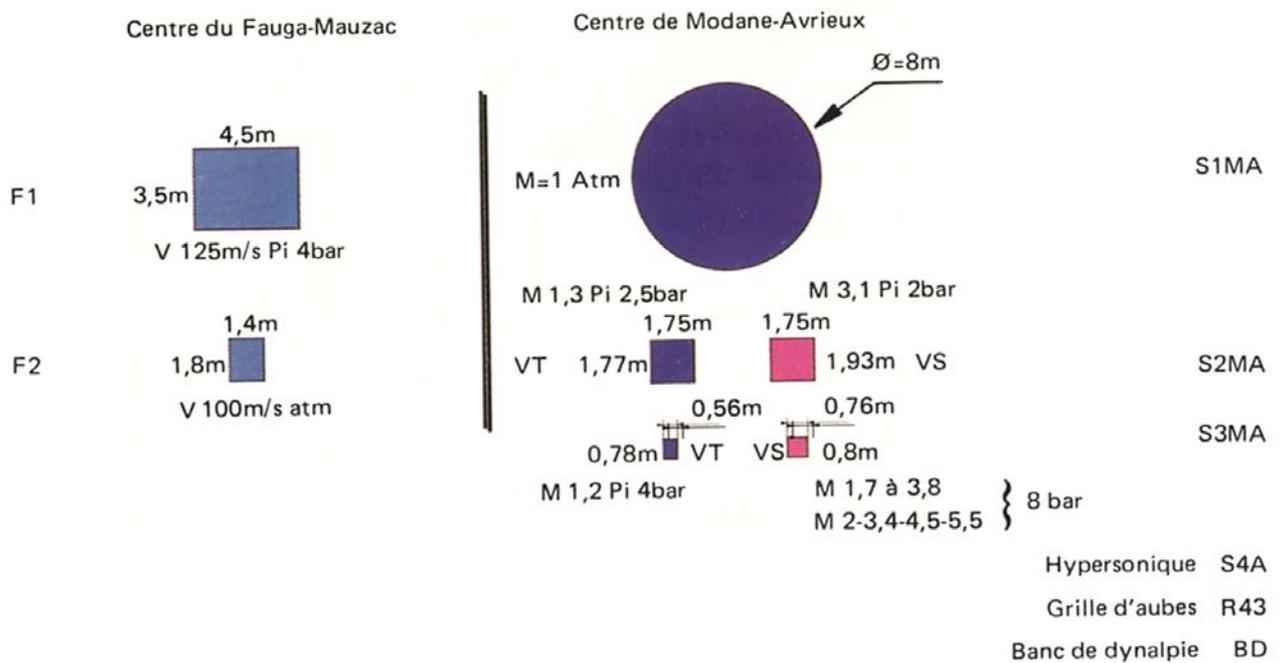


Fig. 64
Principales installations des Grands moyens d'essais (GME) de l'ONERA (hors F4)

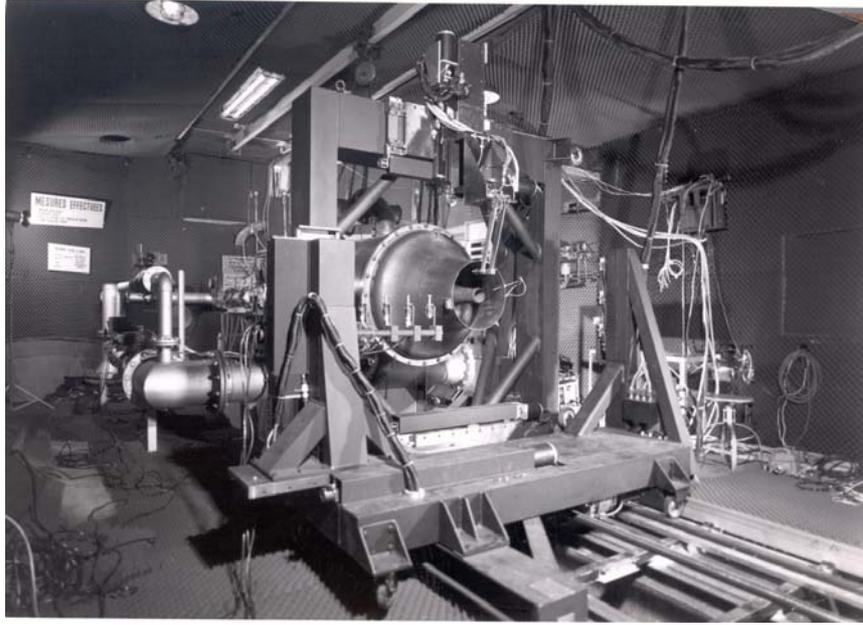


Fig. 65

Montage d'essais pour les études de bruit de jet effectuées en cellule ATD9 par la Direction de la physique (OP) dans le milieu des années 1970

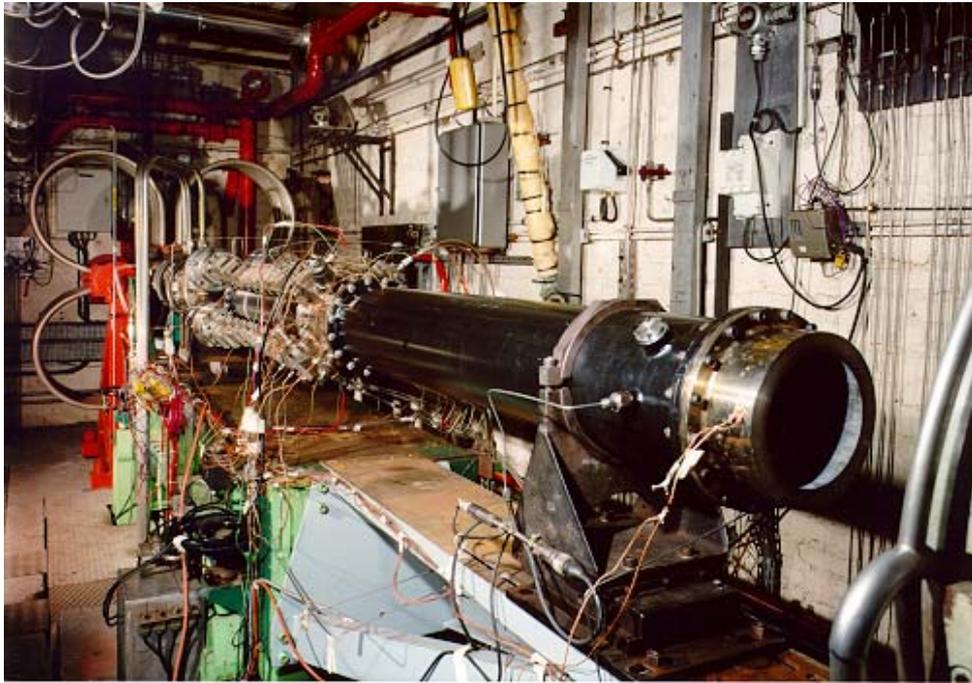


Fig. 66

Banc d'essais de statofusée en cellule ATD8

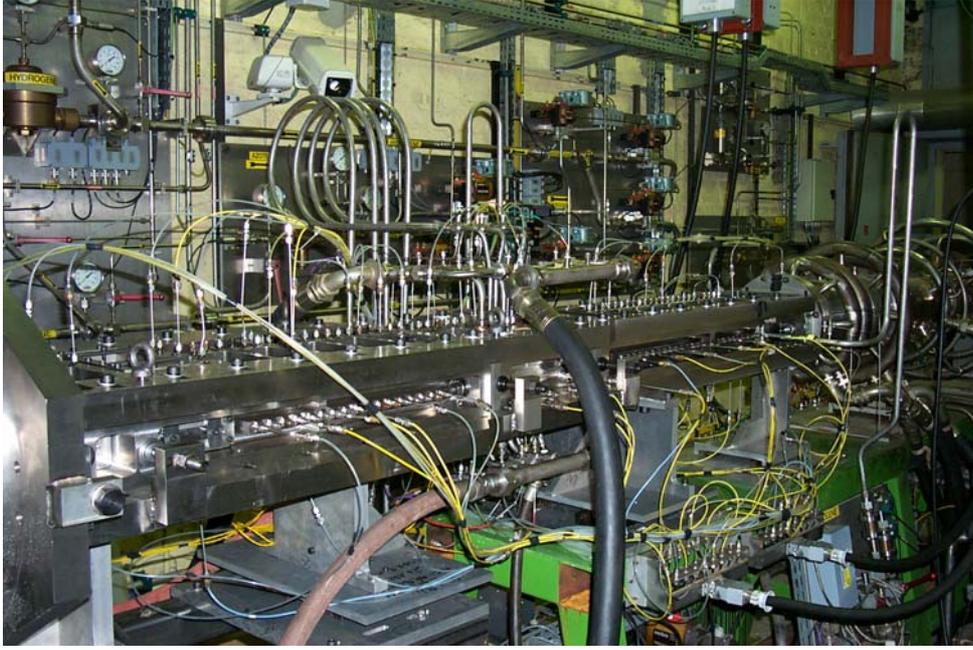


Fig. 67
Banc d'essais de superstatoréacteur en cellule ATD5

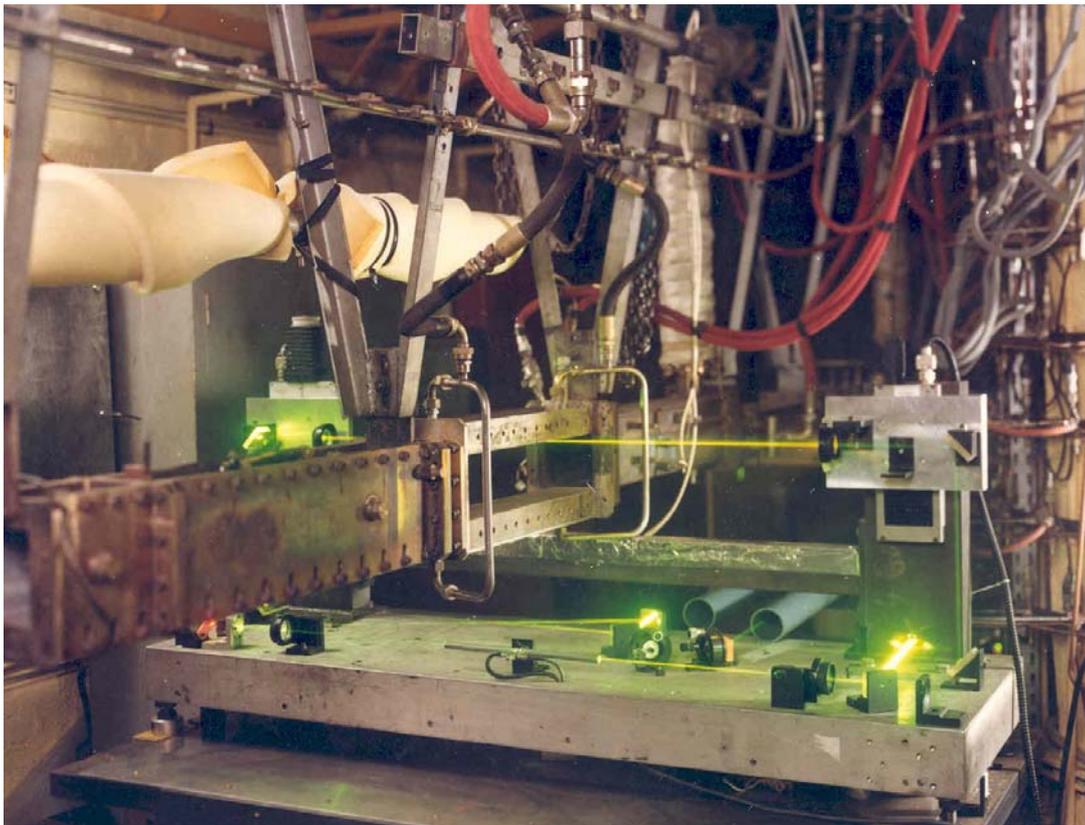
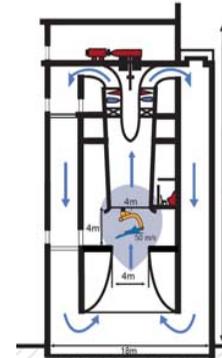


Fig. 68
Mesure de température par DRASC (Diffusion Raman anti-Stokes cohérente) en cellule ATD5 dans le milieu des années 1980



Centre de Lille (IMFL)



Soufflerie verticale SV4



Vrilie libre



Balance rotative (« tournebroche »)

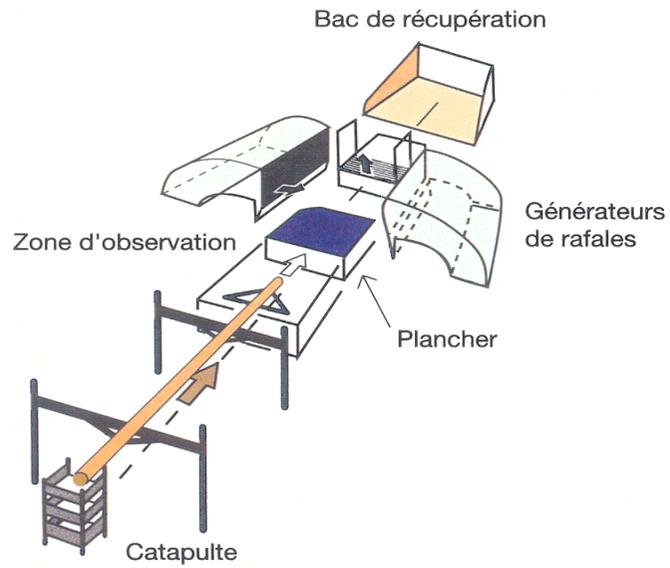
Fig. 69
Vol à grande incidence



Fig. 70
Préparation d'un essai de largage sur la catapulte B5 de l'IMFL



Fig. 71
Essai de perte de contrôle à la catapulte B5 de l'IMFL. La maquette catapultée est visible au centre



Catapulte B10 de l'IMFL



Essai d'une maquette d'avion d'affaires TGA
(Très Grand Allongement)
au banc B10 , avec rafales verticales
(1982-1989)

Fig. 72
Vol en turbulence



Fig. 73
Contrôle d'une maquette de Rafale dans le laboratoire de qualification de maquettes de l'IMFL.



Fig. 74
Essai d'une maquette (échelle 1/50) du porte-avions Charles de Gaulle dans la soufflerie horizontale de l'IMFL. Au fond est visible la grille qui permet d'ajuster la couche limite amont



Fig. 75
Maquette d'Airbus fabriquée à l'IMFL



Fig. 76
Réglage et vérification de l'électronique embarquée dans une maquette d'A330
catapultée

Vol



Planeur SB9 – Extrait d'une vidéo DLR

Principe

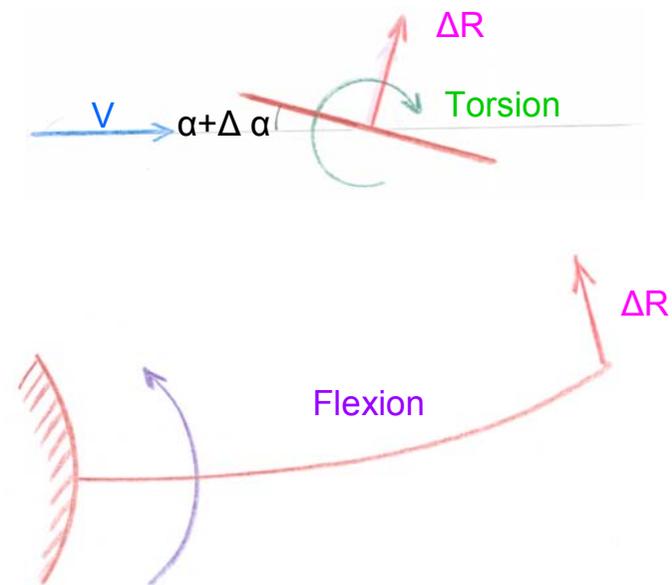


Fig. 77

Flottement (*flutter*)



Fig. 78
Essai de vibration au sol de l'ATR42 par l'ONERA



Fig. 79
Essai de vibration au sol de l'A330



Fig. 80
Première installation mobile d'essais de la SOPEMEA (1956)



Fig. 81
Essai de vibration du Rafale



Fig. 82
Essai de vibration d'un Falcon



Fig. 83
Essai de vibration du Concorde (1971)

MODAL ANALYSIS SYSTEM « MIMOSA »

Fig. 84
Installation MIMOSA



Fig. 85
L'équipe d'essais du Léo 45 au CRV en 1948



Fig. 86
Etude du comportement en vol de l'avion Gerfaut au CRV en 1956



Fig. 87
Equipe de vol sur la piste près du Mystère II au CRV en 1956



Fig. 88
Maquette Deltaviex sous avion Siebel au CRV en 1954



Fig. 89
Essais en vol de l'avion expérimental Deltaviex au CRV

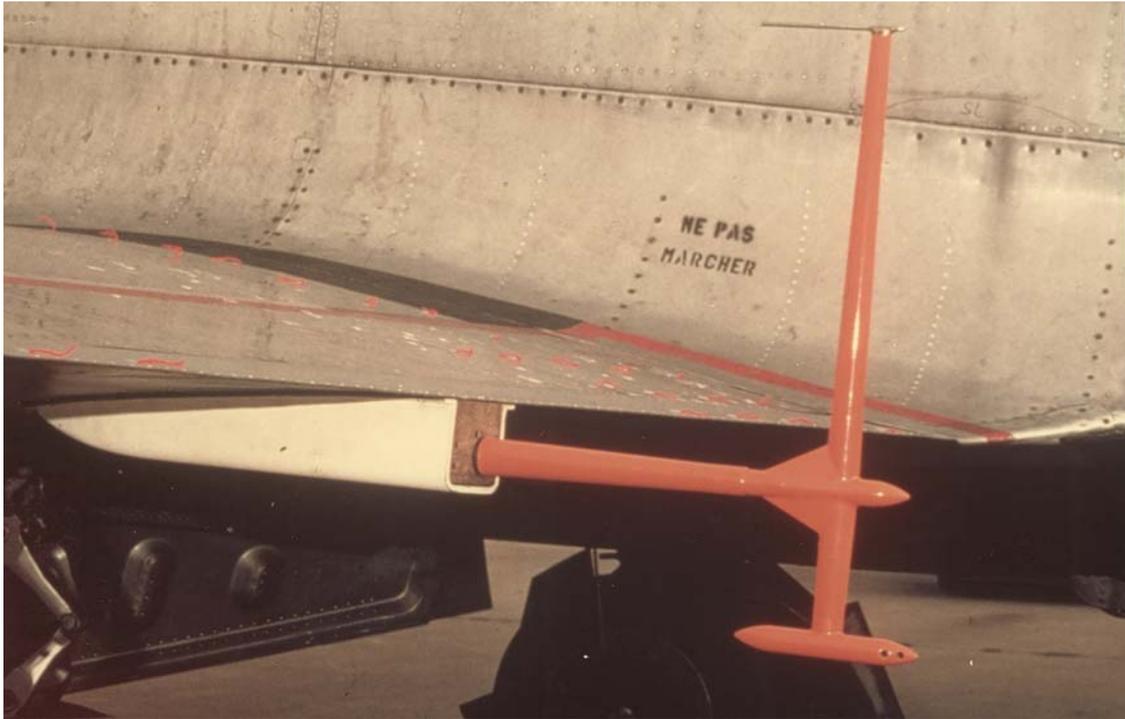


Fig. 90
Explorateur de sillage fixé à l'aile d'un T33 pour la mesure des pressions statique et dynamique

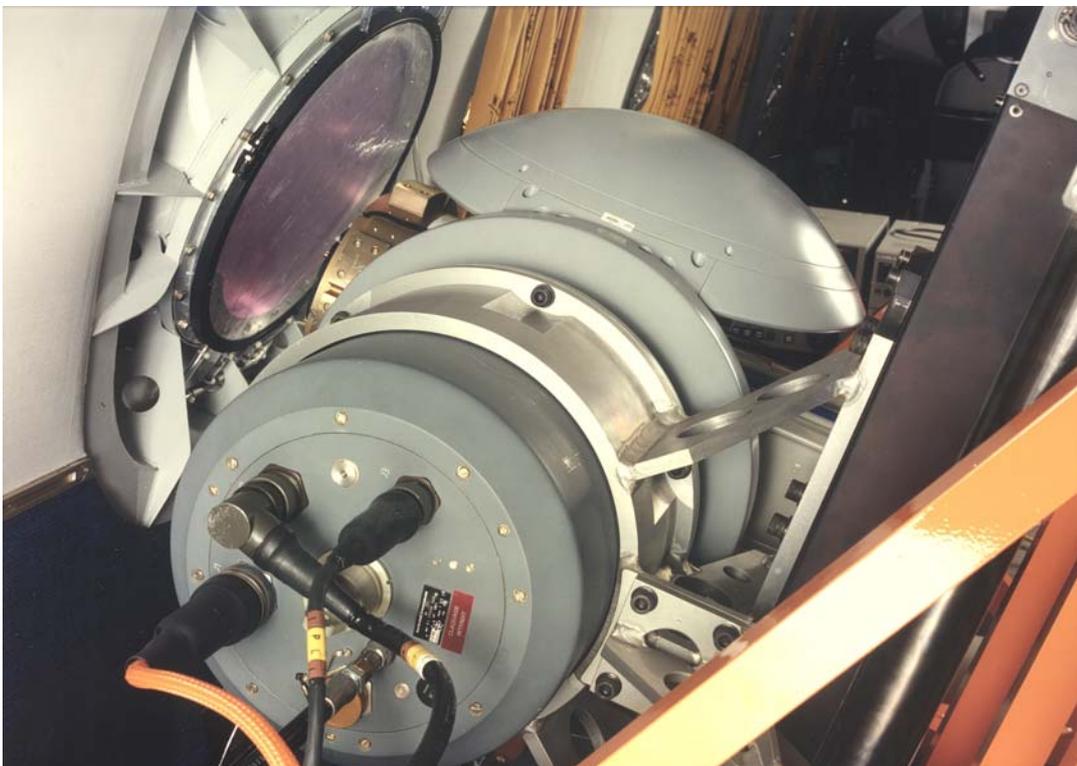


Fig. 91
Montage SICAP sur Caravelle au CEV de Brétigny



Fig. 92

Détermination par l'ONERA des zones d'impact de la foudre sur un Airbus A319 au CEAT dans le cadre du programme européen FULMEN

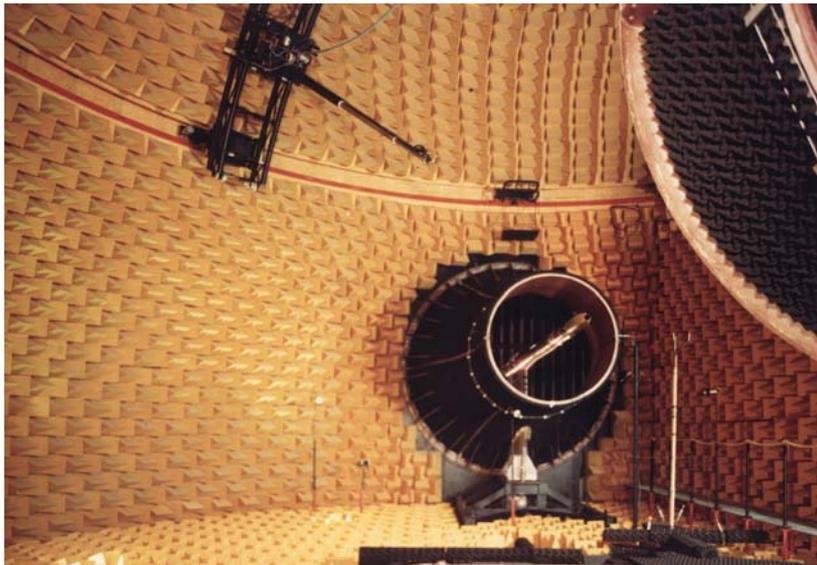


Fig. 93

Soufflerie anéchoïque CEPRA 19 au CEPr

ANNEXE

Dissuasion nucléaire et missiles balistiques¹

La dissuasion nucléaire est décidée formellement à partir de 1958, lorsque le 11 avril le gouvernement de Félix Gaillard² prévoit que l'explosion de la première bombe atomique française aura lieu début 1960.

Le 8 juin 1959, le général de Gaulle confiant dans les capacités de la France à maîtriser rapidement la technique de la « bombe », et afin qu'elle soit à même de tenir son rang de grande puissance, décide qu'elle doit impérativement se doter de vecteurs capables de transporter cette bombe.

Le 17 mars 1959, une directive gouvernementale indique que la priorité absolue doit être consacrée à la « force de frappe » : démarrage de la fabrication en série des bombardiers à réaction Mirage IV et étude de l'engin balistique, comme vecteur ultérieur.

Le 27 juillet 1959, le Groupe engins balistiques (GEB) est mis en place, au sein de la Direction technique et industrielle de l'aéronautique (DTIA), pour assurer la conduite étatique des programmes de missiles balistiques. La Société pour l'étude et la réalisation d'engins balistiques (SEREB) est constituée le 17 septembre de la même année, pour mener les études de base, les essais en vol de ces missiles et leur mise en place opérationnelle. Par ailleurs, en tant que mandataire de l'État, elle doit mettre en place les moyens industriels nécessaires et assurer la coordination des activités des différents coopérants concernés par ces programmes.

Le 13 février 1960, la première bombe française explose à Reggane au Sahara.

Le Conseil de défense du 23 février 1962 décide : le développement d'un missile sol-sol balistique stratégique (SSBS) qui sera placé en silo, la construction d'un sous-marin nucléaire lanceur d'engins (SNLE) et les études concernant le missile mer-sol balistique stratégique (MSBS).

Le 2 mai 1963, le Conseil de défense confirme ses premiers choix et décide la création de la Force nucléaire stratégique (FNS) à trois composantes : aérienne (Mirage IV), terrestre en silos (SSBS), océanique (SNLE et MSBS).

1- Les Pierres Précieuses et Diamant

Quand débutent les premiers travaux relatifs aux missiles balistiques, l'expérience française dans ce domaine est très faible. La France doit acquérir les bases technologiques et expérimentales dans quatre domaines : la propulsion, le pilotage, le guidage, la rentrée dans l'atmosphère.

C'est dans ce cadre qu'est lancé, dès 1960, le programme des Études balistiques de base (EBB), proposé et dirigé par la Société pour l'étude et la réalisation d'engins balistiques (SEREB). Pour tester en vraie grandeur les résultats des travaux correspondants, le programme EBB comporte toute une série d'essais en vol. Ceux-ci sont effectués avec des fusées appelées véhicules d'essais baptisés de noms de pierres précieuses. Ces véhicules du plus simple au plus complexe, ont pour noms : Agate, Topaze, Émeraude, Rubis et Saphir. Ce dernier, véhicule de synthèse balistique, permet les essais en vol pour les quatre domaines techniques affectés

¹ Par Roger Peuron.

² Félix Gaillard, homme politique français, président du Conseil du 5 novembre 1957 au 15 avril 1958.

aux EBB, en conditions réelles. Il a en effet une vitesse et une portée de l'ordre de grandeur de celles de la première génération des missiles dont la France veut se doter. En remplaçant la case à équipements et le corps de rentrée du véhicule Saphir, par une nouvelle case, un 3^e étage propulsif et un satellite sous sa coiffe, on obtient un lanceur. Ce sera Diamant.

Tous les tirs de ces véhicules Pierres Précieuses ont lieu au Centre interarmées d'essais d'engins spéciaux (CIEES)³ à Colomb-Béchar/Hammaguir en Algérie, du 3 juin 1961 au 15 février 1967.

Le vendredi 26 novembre 1965, à 15 heures 47 minutes et 21 secondes, le premier lanceur Diamant est mis à feu. Une heure et demie plus tard, Astérix, le premier satellite français boucle son premier tour de la Terre. La France devient ainsi la troisième puissance spatiale, après l'URSS et les USA.

Pour mener à bien ces études de base, tout un ensemble de développements a lieu dans les bureaux d'études, laboratoires et centres d'essais nationaux. L'Aquitaine y prend une part croissante au fur et à mesure de la montée en puissance du pôle balistique aquitain, principalement dans les domaines touchant à la propulsion à propergol solide, à l'intégration des missiles et à leurs essais en vol.

2 - Les missiles balistiques

Le 31 juillet 1961, la SEREB présente aux services de la Délégation ministérielle pour l'armement les solutions envisageables pour les deux systèmes d'armes SSBS et MSBS. Plusieurs possibilités sont explorées. Le choix se portera sur un missile SSBS, comportant un 1^{er} étage à 16 tonnes de propergol et un 2^e étage à 10 tonnes et, d'autre part, sur un missile MSBS ayant un 1^{er} étage à 10 tonnes de propergol et un 2^e étage à 4,5 tonnes.

Le programme SSBS

Le premier essai en vol du programme SSBS a lieu au CIEES le 23 octobre 1965, peu avant le premier lancement de Diamant. Cette concomitance est historiquement significative. Le premier tir du programme SSBS à Biscarrosse a lieu le 15 février 1966. C'est le premier essai en vol du programme balistique effectué par le Centre d'essais des Landes (CEL)⁴. Tous les autres tirs de développement sont réalisés également au CEL. À noter la date historique du 21 décembre 1968 : ce jour-là est tiré le premier SSBS dans la version qui deviendra opérationnelle sur le plateau d'Albion, au nord d'Apt dans le Vaucluse, le 2 août 1971.

Le programme MSBS

Les deux premiers essais en vol du programme MSBS ont lieu au CIEES en 1966. Les 9 tirs suivants sont effectués au Centre d'essais et de recherches d'engins spéciaux (CERES) de Toulon/Ile du Levant, qui deviendra plus tard le Centre d'essais de la Méditerranée (CEM)⁵. À partir de 1968, le CEL réalise les 19 autres essais en vol du programme MSBS, à savoir : 4 à partir du sol et 15 depuis le sous-marin d'essais *Gymnote*. Pour ces 15 derniers essais, les missiles sont mis au tube sur le sous-marin *Gymnote* au port de Pauillac. La date historique est celle du 16 novembre 1968, qui voit le tir par le *Gymnote* en plongée au large du CEL, du premier MSBS dans la version qui va devenir opérationnelle sur le SNLE Le

³ Voir chapitre 5.

⁴ Voir chapitre 7.

⁵ Voir chapitre 8.

Redoutable. Ce dernier part pour sa première patrouille opérationnelle le 29 janvier 1972.

3 - Le complexe industriel et étatique aquitain

Dès 1959 la propulsion par des propergols solides est choisie de préférence à l'option ergols liquides. Ceux qui préfèrent le propergol solide précisent qu'un missile à ergols liquides est d'une utilisation plus contraignante et moins souple, notamment pour une mise en œuvre éventuelle sur un sous-marin.

Il est également nécessaire de choisir la région où il est possible d'implanter un complexe industriel et étatique capable de mener à bien une partie des études, de la réalisation et des essais des missiles balistiques. L'Aquitaine, qui possède de grands espaces et où sont implantées des industries aéronautiques et militaires, est bien placée pour l'accueillir. D'autant qu'il existe près de Bordeaux, à Saint-Médard-en-Jalles, une Poudrerie nationale (PNSM⁶), que la Direction des poudres a dotée d'installations pour l'élaboration et la mise en œuvre de propergols solides, capables de réaliser les blocs de grandes dimensions nécessaires aux missiles balistiques.

Entre 1961 et 1969, l'État et plusieurs sociétés industrielles vont implanter, autour de la PNSM, de nombreux établissements qui vont se consacrer d'abord au programme dit des Pierres Précieuses et au lanceur Diamant, puis aux missiles balistiques :

- le Centre d'essais des propulseurs (CEP), annexe du Centre d'essais des propulseurs de Saclay (CEPr)⁷, à Saint-Médard-en-Jalles (Moulin-Bonneau) ;
- le Centre d'achèvement des propulseurs et engins (CAPE), à Saint-Médard-en-Jalles (Bois de Candale) ;
- la Société pour l'étude et la réalisation d'engins balistiques (SEREB) à Saint-Médard-en-Jalles et à Saint-Aubin-de-Médoc ;
- la société Sud-Aviation au Haillan (Cinq Chemins) ;
- la société Nord-Aviation à Saint-Médard-en-Jalles (Issac) ;
- la Société nationale d'étude et de construction de moteurs d'aviation / Département engins (SNECMA / DE), à Bordeaux puis à Blanquefort ;
- la Société d'étude de la propulsion par réaction au Haillan (Cinq Chemins) ;
- le Centre d'essais des Landes (CEL), à Biscarrosse ;
- le Centre d'études scientifiques et techniques d'Aquitaine au Barp.

Cet ensemble industriel et étatique, va subir de nombreuses évolutions au cours des années, sans que ses missions soient sensiblement modifiées. En 1996, il est composé : du Centre d'achèvement et d'essais des propulseurs et engins, du Centre d'essais des Landes, du Centre d'études scientifiques et techniques d'Aquitaine, de l'établissement de Saint-Médard-en-Jalles de l'Aérospatiale, de l'établissement de la Société européenne de propulsion (SEP), de l'établissement de Saint-Médard-en-Jalles de la Société nationale des poudres et explosifs (SNPE).

⁶ Poudrerie nationale de Saint-Médard-en-Jalles

⁷ Voir chapitre 3.

LES AUTEURS

Marcel Bénichou

Ingénieur général de l'armement. Né le 27 avril 1931 à Alger. X 51, SUPAERO 56, CHEAR 71. Ingénieur militaire de l'Air à l'AIA d'Alger, à la section avions du STAé, ingénieur de marque Mirage III (1962). Chef de la section avions du SPAé (1971), sous-directeur des affaires industrielles à la DPAI (1974), directeur de la DPAI (1981), directeur des constructions aéronautiques (1984), délégué aux programmes d'armement (1986), président de l'ONERA (1991-1995).

Dans la série du COMAERO, il a participé à l'ouvrage introductif (2003) et aux ouvrages thématiques *Les avions militaires* (2007), *Les AIA* (2009), *Les centres et moyens d'essais* (2013) et *La formation* (2013).

Franco-Renso Bonan

Affecté au Centre d'études de Gramat (CEG)⁸ en 1962, à sa sortie de l'Ecole technique supérieure de l'armement d'Arcueil, il a été chargé d'organiser un atelier-laboratoire d'usinage d'explosifs performants. Affecté en 1966 au Centre aéroporté de Toulouse, il y a dirigé les études puis les développements des matériels aéroportés de la génération Transall C160. Intégré en 1976 dans le corps des ingénieurs de l'armement, il est affecté au Service des études de la SEFT où il participe aux divers développements d'armement pour hélicoptère et participe au regroupement des activités Systèmes d'armes et Simulateurs. Nommé sous-directeur du CAP en 1983, il a terminé sa carrière en 1990 comme directeur de cet établissement.

Marcel Cado

X49, SUPAERO 54. Breveté pilote militaire à Avord, il commence sa carrière à la section Equipements du STAé, où il est affecté, de 1955 à 1969, à la sous-section Pilotage. En 1969, il devient chef de la section Equipements du STAé. En 1973, il est nommé chef des sections Equipements et Armement, au Service de la production aéronautique. Il devient, en 1976, sous-directeur de ce service et exerce cette fonction jusqu'en 1979. Maintenant ingénieur général, il est nommé président directeur général de la SOPEMEA, présidence qu'il exerce conjointement avec celle d'Intespace, de 1983 à 1992.

Jean Carpentier

X44, SUPAERO 49. Après un stage d'un an à la SFENA, pour étudier les pilotes automatiques pour avions et missiles, il est affecté à la section Equipements du STAé, où il est chargé, de 1950 à 1960, des recherches sur le pilotage et la navigation. Il lance, en 1956, les premières études sur la navigation par inertie en France. Il est détaché à la SFENA en 1960, pour participer aux travaux confiés à la SERNI, société filiale de SFENA, SAGEM et SACM, dans le domaine du guidage inertiel.

En 1961, il rejoint la DRME nouvellement créée. Il y est nommé successivement chef de section Equipements mesures informatiques, chef du Service des recherches, directeur adjoint. En 1977, la DRME devient la DRET et il en est le directeur.

⁸ Voir chapitre 11 de ce document.

En 1984, il est nommé président de l'ONERA, fonction qu'il exerce jusqu'à sa limite d'âge, en 1991.

Il préside, de 1989 à 1994, le comité de direction du Bureau national de métrologie et, de 1992 à 1996, le comité Avion-Ozone constitué par la DGAC.

Il est membre honoraire de l'AAE et membre émérite de l'AAAF.

Alain Cochet

Alain Cochet est diplômé de l'Ecole nationale supérieure des arts et métiers (ENSAM) en 1977, ainsi que de l'Ecole spéciale des techniques aérospatiales (ESTA) en 1978.

Entré à l'ONERA en 1980, à la direction de l'Energétique, il a participé à de nombreuses études sur les statofusées et les statoréacteurs à liquide en tant qu'ingénieur de recherches. Dans le cadre de programmes nationaux, il était particulièrement en charge de travaux expérimentaux sur le développement et la mise au point de chambres de combustion pour ce type de propulseur. Il a participé par ailleurs à des groupes de travail et à plusieurs manifestations internationales liées à la propulsion par statoréacteur.

Il est devenu responsable de la division Statoréacteurs en 1992, à laquelle se sont ajoutées les activités sur les foyers aéronautiques en 1993. Il est actuellement, dans le Département d'énergétique fondamentale et appliquée (DEFA), le responsable de l'unité de recherches sur la propulsion aérobie qui regroupe à la fois les activités expérimentales sur les chambres de combustion mais également les activités de modélisation et de simulations numériques liées à la propulsion aérobie.

Les Laboratoires d'aérothermodynamique de l'ONERA/Palaiseau sont le cadre principal de ses activités et cela depuis le début de sa carrière professionnelle, et il contribue en permanence à maintenir et à faire évoluer ces installations en fonction des besoins actuels et futurs des différents acteurs du domaine.

Jean Crosnier

Jean Crosnier choisit, à sa sortie de l'Ecole Polytechnique en 1955, le corps des Fabrications d'armement, en raison des larges possibilités d'orientation scientifique qu'il offre. A sa sortie, en juillet 1958, de l'Ecole nationale supérieure de l'armement, il opte pour un poste au Service balistique du Centre d'études de Limeil. Après une formation de six mois en physique des explosifs et en électronique rapide impulsionnelle, Jean Crosnier se voit confier l'équipement de l'Annexe de Gramat en moyens électroniques de mesure et de synchronisation.

Le Centre d'études de Gramat est officiellement créé le 31 décembre 1959, sous la direction de l'ingénieur militaire principal Jean-Marie Buscailhon. Jean Crosnier y construit un ensemble de 256 chronomètres électroniques à résolution de 6,25 nanosecondes, à l'épreuve des parasites des explosions. Il développe, à partir de 1967, dans le tunnel de Sauclières, un simulateur du souffle créé par les explosions nucléaires. Une collaboration avec l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis s'instaure alors durablement. Pour profiter des dernières explosions aériennes au Centre d'expérimentations du Pacifique, Jean Crosnier exécute, en 1969, 1970 et 1971, des campagnes de mesure avec des capteurs de pression adaptés, ce qui lui vaudra, en 1972, l'attribution du prix « Ingénieur général Chanson » et un témoignage du Délégué général pour l'armement. Ces mesures permettront la réalisation du Simulateur de souffle à grand gabarit (SSGG) qui effectuera plus de 500 tirs. Pour répondre à la demande de l'état-major des Armées en 1975, Jean Crosnier s'investit dans l'étude des effets de l'Impulsion

électromagnétique nucléaire (IEM). En février 1977, Jean Crosnier succède à l'ICA Jean-Marie Buscailhon à la direction du CEG qui compte alors 290 agents.

Après avoir puissamment contribué, pendant plus de deux décennies, à l'expansion du CEG et à sa renommée internationale, Jean Crosnier est nommé, le 1^{er} septembre 1981, chef du Service des recherches de la DRET, ce qui lui donne la responsabilité des relations contractuelles avec les organismes scientifiques et techniques travaillant pour la Défense.

Jean Crosnier est admis, par anticipation et sur sa demande, dans la deuxième section des ingénieurs généraux, en octobre 1985.

Jean-Baptiste Dard

Ingénieur de l'Ecole polytechnique (promotion 1959), ingénieur du Génie maritime (promotion 1964).

Affecté en 1964 au GTES, il est d'abord chargé de l'antenne du GTES auprès du CERES sur l'île du Levant jusqu'en 1967, ensuite ingénieur chargé des dépouillements et calculs du GTES puis du CEM (lorsqu'en 1968 le GTES et le CERES deviennent le CEM) jusqu'en 1970, enfin sous-directeur technique du CEM jusqu'en fin 1972.

De début 1973 à 1977, il est chargé du service Organisation, méthodes, informatique et contrôle de gestion de la DCAN Brest.

De 1978 à 1981, il est réaffecté au CEM comme directeur adjoint.

De 1982 à 1984, il est chef du GESTA au sein de la sous-direction Etudes de la DCAN Toulon.

De 1985 à 1990, il est directeur du Centre d'achèvements et d'essais des propulseurs et engins (CAEPE) à Saint-Médard-en-Jalles près de Bordeaux.

De 1991 à 1995, il est directeur du Centre d'essais des Landes à Biscarrosse.

Enfin, de 1995 à 2000, il est directeur de la partie étatique de l'ex-DCAN Toulon, scindée en 1995 en deux sous-ensembles, un sous-ensemble étatique et un sous-ensemble industriel, séparation qui se situait dans le cadre de l'évolution de l'organisation et des missions de la DGA et préparait le changement de statut de la partie industrielle de la Direction des constructions navales.

Bruno Debout

Diplômé de l'Ecole Polytechnique et de SUPAERO, Bruno Debout a commencé sa carrière comme ingénieur d'essais en vol au CEV Istres, dont il a dirigé la section « Essais moteurs ». Affecté en 1983 au STPA, il a été membre puis chef du département Moteurs à l'époque du lancement des grands programmes d'aujourd'hui tels que le M88 (Rafale), RTM322 (NH 90) et MTR390 (Tigre). Il a dirigé le CEPr Saclay de 1995 à 1999, puis le BNAE de 2000 à 2009.

Claude Etienne

Ingénieur de l'Ecole polytechnique (promotion 1949), ingénieur du Génie maritime (promotion 1954) et de SUPAERO (promotion 1955).

Affecté en 1955 au GTES, où il est chargé des infrastructures du CEM, de l'atelier de réparation des cibles aériennes et du laboratoire photographique du GTES. A la création du CEM, il est nommé directeur adjoint du CEM. En 1969, il rejoint la Direction des programmes et affaires industrielles de l'armement au bureau des programmes aéronautiques. En 1976, il quitte le service actif et entame une carrière dans l'industrie privée. Il est directeur de filiales de Thomson (LTT, CABELTEL, SNET) puis termine sa carrière comme directeur à ALCATEL CIT.

Robert Finance

D'abord affecté au CEAT en 1968, où il a été responsable des essais structuraux de nombreux avions et hélicoptères, l'ingénieur général Robert Finance a ensuite été muté au Service technique des programmes aéronautiques. Dans ce service, il a été successivement directeur du programme Mirage F1 (1980-1984), chef du département Etudes générales (1985-1987), et enfin directeur du programme Rafale durant la période du lancement effectif de ce programme (1988-1991). Nommé directeur du CEAT en 1991, il a engagé le processus de regroupement de cet établissement sur le seul site de l'Hers.

Inventeur de plusieurs dispositifs, dont certains ont donné lieu à des productions de série, il est également enseignant à l'ISAE (ENSICA et ENSAE).

Jean-Paul Gillyboeuf

Ingénieur puis chef du Centre de calcul scientifique de l'armement (CCSA) (1968-1978).

Chef de la division Evaluation et simulation de systèmes (ESSY) du Centre d'électronique de l'armement (CELAr) (1978-1984).

Directeur du programme Horus, composante aéroportée de la dissuasion (1984-1988) à la DGA.

Conseiller du ministre de la défense pour les affaires industrielles, scientifiques et les programmes (1988-1991).

Chef du Service central des affaires industrielles (SCAI), devenu ensuite Direction de la stratégie industrielle et technologique (DSIT) de la DGA.

Adjoint au délégué général pour l'armement (1997-2000).

Inspecteur général des armées Armement, poste qu'il a créé (2000-2004).

Chargé de mission au cabinet du ministre de la défense et créateur de la Direction générale des systèmes d'information et de communication (DGSIC) (2004-2006).

Membre du bureau de l'Académie d'intelligence économique.

Joseph Goursolle[†]

Engagé volontaire à la Libération après une intense activité de résistance en Corrèze, il a fait la campagne d'Indochine dans les troupes parachutistes et y a gagné ses galons d'officier. Intégré dans le corps des ingénieurs des travaux d'armement, il fit carrière à la DTAT au centre d'essais de parachutisme et au département Mobilité de l'administration centrale. Intégré au choix dans le corps des ingénieurs de l'armement en 1970 comme ingénieur principal, puis ingénieur en chef; il devint directeur du Centre aéroportés de Toulouse (CAP). Admis en 2^e section du cadre des ingénieurs généraux en 1986, il devait décéder en 2010.

Michel de Launet

Ingénieur général de l'armement (2^e section). Ancien élève de l'école polytechnique (X51) et ingénieur ESE (1961).

Il commence sa carrière à l'Etablissement de Bourges de la DEFA, au service « Mesures ». En 1961, il est affecté au service des équipements de champs de tir, comme chef de groupe, puis directeur technique. En 1975, il est directeur adjoint au Centre d'électronique de l'armement dont il devient directeur en 1980. Il rejoint la Direction des armements terrestres en 1984, comme directeur de la Section d'études et de fabrication des télécommunications (SEFT) et simultanément chef du bureau ELEC à l'administration centrale.

Il vient de quitter la présidence du Comité pour l'histoire des armements terrestres (ComHArT).

Bernard Laurent

Ingénieur général de l'armement (télécommunications), il a commencé sa carrière à la Section d'études et de fabrications des télécommunications (SEFT) au Fort d'Issy-les-Moulineaux en 1963, comme responsable des équipements de vision nocturne, infrarouges et laser pour l'armée de Terre. Il rejoint en 1969, la Direction de programmes et affaires industrielles (DPAI), chargé des investissements en technologies avancées. En 1972, à la Direction techniques des engins, au Service des engins tactiques nouvellement créé, il prend la direction du Groupe industrie-international et à ce titre prépare les nouveaux programmes de missiles tactiques, de drones et d'engins cibles, en liaison étroite avec l'ONERA et les industriels, et en recherchant la coopération internationale. A partir de 1980, il prend différentes fonctions dans l'état-major de la Direction des engins : adjoint au directeur, responsable industriel.

De 1985 à 1990, il est directeur du LRBA. Il revient auprès du directeur des engins comme responsable des affaires internationales - missiles et espace - et assure la direction de programmes pour différents grands programmes d'exportation. En 1995, il est nommé directeur-adjoint de la Direction des affaires internationales de la DGA. Passé en seconde section fin 1999, il a mené une activité d'expert en matière de technologies avancées et auprès de la COFACE.

Michel Lecomte

Ingénieur EFREI, il débute sa carrière en 1961 à la CSF, département des antennes hyperfréquences. Embauché en 1963 par le SECT à Colomb-Béchar, chargé de la mise en service du fizeaugraphe et de l'intégration d'équipements de télémessures, il rejoint à Montrouge en 1965 le groupe technique (GT3) dirigé par Michel de Launet, chargé du développement des moyens de télémessures et de télécommande du CEL. Il rejoint l'antenne du SECT à Biscarrosse en 1968 et devient chef du département TM-TC du CEL de 1972 à 1976, puis ingénieur méthodes à la sous-direction technique jusqu'en 1979 ; il y assure la conduite du projet de la station de Bretagne. Affecté à Quimper de 1979 à 1982, il coordonne son installation comme responsable technique jusqu'au premier tir M4 au large de la Bretagne. De retour à Biscarrosse en 1982, il est chargé de créer le service de formation continue du CEL, en assure le fonctionnement jusqu'en 1987. Nommé adjoint organisation et plans du directeur, puis organisation gestion, il propose les évolutions de structure des services, organise le contrôle de gestion et le contrôle interne. Sous-directeur technique « en courte finale », il est retraité depuis fin 1999.

Jean-Pierre Marec

X57, SUPAERO 62, master of sciences 1963, docteur ès sciences 1967. IGA. ONERA (1964) : astrodynamicien, directeur pour les applications aéronautiques (1985-96), directeur scientifique général (1997-2000), haut conseiller (2001). Maître de conférences à l'École Polytechnique (1969-86), professeur à SUPAERO (1971-98). Membre du CADAS (1999), de l'Académie des technologies (2000), de l'AAE (1998), de l'IAA (1986) ; rédacteur en chef de *Acta Astronautica* (1980-2007). Délégué national AGARD/RTO (1994-2001). *Honorary Fellow* de l'IAA (2003), membre émérite de l'AAAF (2002). Président de l'ICAS (1998-2000).

Jean-Luc Monlibert

Ingénieur général de l'armement, il a débuté sa carrière à la DGA comme responsable d'essais moteurs au CEV. Il a participé au sein du Service technique des programmes aéronautiques, à la conduite de plusieurs programmes d'armement et a, notamment, été directeur du programme Mirage 2000. Sa carrière s'est poursuivie au CEV, qu'il a dirigé de 1997 à 2000, et à la tête de la Direction de la gestion et de l'organisation de la DGA de 2000 à 2004.

Maurice Natta

Ingénieur de l'Ecole polytechnique (promotion 1938), ingénieur de l'Ecole d'application des industries navales (promotion 1941) et de SUPAERO (promotion 1955).

Sous-lieutenant de l'armée de l'Air pendant la guerre 1939-1940.

Affecté au Bassin des Carènes de 1945 à 1946, il rejoint la CEPA en 1946.

En 1954, il crée et dirige le Groupe technique des engins spéciaux.

En 1961, il rejoint la Direction des recherches et moyens d'essais qui vient d'être créée, en tant que directeur des Moyens d'essais.

De 1968 à 1970, il est chargé des Etudes missions.

En 1970, il est nommé sous-directeur du Personnel militaire.

De 1975 à 1980, il est inspecteur technique de l'Armement pour les poudres et explosifs.

Puis, il termine sa carrière comme inspecteur général de l'Armement.

Roger Peuron

Ingénieur en chef des études et techniques d'armement.

En 1968, en poste à la base des SNLE de l'Île Longue, il est responsable contrôle missile.

En 1974, il est affecté au CAEPE, chargé du suivi des activités industrielles liées au développement des missiles M2, M20 puis M4 : préparation des missiles expérimentaux, installations, logiciels et procédures pour l'Île Longue.

En 1988, adjoint au chef du Service communication de la DGA, il est chargé de la mise en place de la charte graphique, de la documentation et des grands salons d'armement en France.

En 1993, de retour au CAEPE, il est responsable de la communication externe.

Il a été responsable du groupe de travail qui a rédigé *Préludes aux vols*, édité pour les 40 ans du CAEPE.

Lucien Vayssié

Né en 1937, il est admis à l'Ecole nationale supérieure d'électrotechnique, électronique, informatique et hydraulique de Toulouse (ENSEEIH), promotion 1962. Il entre au CEG en 1965, comme ingénieur chargé de simulation numérique. La qualité de ses prestations dans ce domaine essentiel pour les études et réalisations du CEG conduit à le nommer chef du Service informatique, puis adjoint au directeur des études. Il est ensuite nommé adjoint au directeur du CEG, qui est alors Jean-Marc Peyrard. Il est chargé de la bureautique et de l'agrandissement du site, ainsi que de la communication.

Lucien Vayssié termine sa carrière en l'an 2000.

La compétence de Lucien Vayssié et sa parfaite connaissance des activités du CEG justifiaient pleinement que la rédaction de l'historique de la période 1980-2000 lui soit confiée par l'IGA Jean-Marc Peyrard.

SIGLES

AA : Armée de l'Air
AAAF (3AF) : Association aéronautique et astronautique de France
AAE : Académie de l'air et de l'espace
AAEV : Association amicale des essais en vol
AASM : Armement air-sol modulaire
ACMP : Anti-char moyenne portée
ADAC : Avion à décollage et à atterrissage courts
ADAV : Avion à décollage et atterrissage verticaux
AFARP : *Anglo-French Aerospace Research Program*
AGARD : *Advisory Group for Aeronautical Research and Development*
AGI : Année géophysique internationale
AIA : Atelier industriel de l'aéronautique
AIAA : *American Institute of Aeronautics and Astronautics*
AICPRAT : Association amicale des ingénieurs, cadres et personnels retraités anciens de Thomson
ALGROUPEM : Amiral commandant le groupe naval d'essais et de mesures
AME : *Angle Measurement Equipment*
AMOR : Avion de mesures et d'observation au réceptacle
AMRAAM : *Advanced Medium-Range Air-Air Missile*
ANF : Antinavire futur
APU : *Auxiliary Power Unit*
APX : Atelier de construction de Puteaux (de la DEFA)
ASCOP : *Applied Science Corporation of Princeton*
ASMP : Air-sol moyenne portée
ASMPA : Air-sol de moyenne portée améliorée
ASRAAM : *Advanced Short-Range Air-Air Missile*
ASRE : Analyse des signatures et rayonnements électromagnétiques
ASTE : Association pour le développement des sciences et techniques de l'environnement
ATAR : Atelier technique aéronautique de Rickenbach
ATE : Atelier de fabrication de Toulouse
ATR : Avion de transport régional
ATS : Atelier de Tarbes
ATSF : Avion de transport supersonique futur
ATV : *Automated Transfer Vehicle*
AUTEC : *Atlantic Undersea Test and Evaluation Center*

BAB : Bureau animation Béchar (du SECT)
BAC : *British Aircraft Corporation*
BAGUERA : Banc d'essai de guerre électronique radar
BAL : Bureau animation des Landes (du SECT, à Biscarosse)
BAM : Bureau animation mer (du SECT, à Brest)
BBO : *Brown Boveri Oerlikon*
BD1, BD2 : Bacs de dynalpie de Modane
BDC : Effet « bouchon de champagne »
BEAP : Banc d'essais des accélérateurs à poudre
BEDYMI : Banc d'évaluation dynamique pour autodirecteurs millimétriques
BEDYRA : Banc d'essai dynamique pour radar et autodirecteur

BEDYSSO : Banc d'essai dynamique pour systèmes optroniques
 BEG : Bureau études générales (du SECT)
 BEM : Bâtiment d'essais et de mesures
 BEMHP : Bâtiment d'essais et de mesures *Henri Poincaré*
 BICM : Bureau interarmées de codification des matériels
 BMW : *Bayerische Motoren Werke*
 BNAE : Bureau de normalisation de l'aéronautique et de l'espace
 BNM : Bureau national de métrologie
 BP : Basse pression
 BRAHMS : Banc radar d'analyse holographique et de mesure de signatures
 BSC : Bureau scientifique commun (au CEA et à la DEFA)

C3S : Comité consultatif de coordination des souffleries
 CAA : Centre d'archives de l'armement (Châtelleraut)
 CAD : Centre d'analyse de défense
 CADAS : Conseil des applications de l'Académie des sciences
 CAEPE : Centre d'achèvement et d'essais des propulseurs et engins
 CAG : Contrôle actif généralisé (en anglais : CCV : *Control Configured Vehicle*)
 CALAS : Cible autonome légère arme sous-marine
 CAP : Centre aéroporté de Toulouse
 CAPE : Centre d'achèvement des propulseurs et engins
 CAR : Circonscription aéronautique régionale
 CARAPACE : Concept d'avions résistant aux pertes accidentelles de contrôle effectif
 CASA : *Construcciones aeronauticas S. A.*
 CASDN : Comité d'action scientifique de la Défense nationale
 CASOAR : Caméra d'attitude et support orientable asservi par radar
 CASSI : Centre de l'armement pour la sécurité des systèmes d'information
 CATRE : Centre aérien technique de réception et d'entraînement
 CBVN : Compagnie des bateaux à vapeur du Nord
 CCSA : Centre de calcul scientifique de l'armement
 CCV : *Control Configured Vehicle*
 CDC : Compagnie des compteurs
 CEA : Commissariat à l'énergie atomique
 CEAM : Centre d'expérimentations aériennes militaires de Mont-de-Marsan
 CEAT : Centre d'essais aéronautique de Toulouse
 CECLES : Commission européenne pour la mise au point et la construction de lanceurs d'engins spatiaux
 CEES : Centre d'essais d'engins spéciaux
 CEG : Centre d'études de Gramat
 CEL : Centre d'essais des Landes
 CELAr : Centre d'électronique de l'armement
 CEM : Centre d'essais de la Méditerranée
 CEM : Compagnie électromécanique
 CEMA : Centre d'essai du matériel aérien
 CEMH : Centre d'essais des moteurs et des hélices
 CEMo : Centre d'essais des moteurs
 CEP : Centre d'essais des propulseurs de Moulin-Bonneau, annexe du CEP
 CEP : Centre d'expertise parisien (SECT)
 CEPA : Centre d'études des projectiles autopropulsés

CEPA : Commission d'études pratiques d'aviation
 CEPr : Centre d'essais des propulseurs de Saclay
 CEPRA 19 : Soufflerie anéchoïque au CEPr
 CERES : Centre d'essais et de recherches d'engins spéciaux
 CERMA : Centre d'études et de recherches de médecine aérospatiale
 CERT : Centre d'études et de recherches de Toulouse
 CERTI : Centre d'études et de recherches en télécommunications et informatique
 CEV : Centre d'essais en vol
 CFAO : Conception et fabrication assistées par ordinateur
 CFM : Centre du Fauga-Mauzac
 CFTH-HB : Compagnie française Thomson-Hotchkiss Brandt
 CGAFCEM : Centre de gestion automatisée des fréquences et de la comptabilité électromagnétique
 CHEOPS : Chambre hyperfréquence pour l'évaluation optimale de signatures
 CIEES : Centre interarmées d'essais d'engins spéciaux
 CII (C2I) : Compagnie internationale pour l'informatique
 CIMD : Centre d'identification des matériels de défense
 CMA : Centre de Modane-Avrieux
 CMCM : Centre mécanique, chimie, matériaux
 CNES : Centre national d'études spatiales
 CNET : Centre national d'études de télécommunications
 COFACE : Compagnie française d'assurance pour le commerce extérieur
 COFRAC : Comité français d'accréditation
 COMAERO : Comité pour l'histoire de l'aéronautique
 ComHArT : Comité pour l'histoire de l'armement terrestre
 COSMAR : Contrôle opérationnel des senseurs de la Marine
 COTAL : Conduite de tir d'artillerie lourde
 COTAR : *Correlation Tracking And Ranging*
 CPE : Centre de prospective et d'évaluations (du ministère de la Défense).
 CREHN : Centre de recherches et d'études en hydrodynamique navale
 CRV : Centre de recherches en vol (de l'ONERA, à Brétigny)
 CSADN : Club sportif et artistique de la défense nationale
 CSEE : Compagnie des signaux et entreprise électrique
 CSF : Compagnie générale de télégraphie sans fil
 CTME : Centre technique des moyens de mesure et d'essais
 CTP : Centre technique parisien
 CTS : Chaland de transport et de servitude
 CTW : Centre technique de Wasserburg

 DAM : Direction des applications militaires (du Commissariat à l'énergie atomique).
 DAP : Dispositif d'arrêt de poussée
 DARPA : *Defense Advanced Research Projects Agency*
 DAT : Direction des armements terrestres
 DATAR : Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale
 DCAé : Direction des constructions aéronautiques
 DCAN : Direction des constructions et armes navales
 DCCAN : Direction centrale des constructions et armes navales
 DCE : Direction des centres d'expertise et d'essais
 DCP : Défilement continu à prisme

DCN : Direction des constructions navales
 DE : Développement exploratoire
 DED : Direction des études et développements (du CIEES)
 DEFA : Direction des études et fabrications d'armement
 DEI : Direction de l'électronique et de l'informatique
 DEn : Direction des engins
 DERA : Département d'études et de recherches en automatique (du CERT)
 DERAT : Département d'études et de recherches en aérothermodynamique (du CERT)
 DERMO : Département d'études et de recherches en micro-ondes (du CERT)
 DES : Département (puis Direction) des études de synthèse (de l'ONERA)
 DEXTRE : Développement exploratoire de turbine refroidie
 DGA : Délégation générale pour l'armement
 DGAC : Direction générale de l'Aviation civile
 DGO : Direction de la gestion et de l'organisation
 DGRST : Délégation générale à la recherche scientifique et technique
 DIAL : DIAmant + Allemand
 DICOM : Dispositif impulsif de courant à ondes multiples
 DLR : *Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt*
 DMA : Délégation ministérielle pour l'armement
 DME : Direction des missiles et de l'espace
 DMP : Dispositif de mesure de poussée
 DPAI : Direction des programmes et des affaires industrielles
 DRASC : Diffusion Raman anti-Stokes cohérente
 DRET : Direction des recherches, études et techniques
 DRME : Direction de recherches et moyens d'essais
 DSTI : Direction des systèmes terrestres et d'information
 DSV : Dérive sous voile
 DT : Direction technique
 DT : Détection (CELAr)
 DTAT : Direction technique des armements terrestres
 DTCA : Direction technique des constructions aéronautiques
 DTCN : Direction technique des constructions navales
 DTEn : Direction technique des engins
 DTI : Direction technique et industrielle
 DTIA : Direction technique et industrielle de l'aéronautique
 DTM : Direction des travaux maritimes
 DTP : Développement technologique probatoire
 DYVAS : Dynamique vibratoire de l'avion souple

EADS : *European Aeronautic Defence and Space Company*
 EAP : Etage d'accélérateur à poudre (Ariane 5)
 EAT : Etablissement aéronautique de Toulouse
 EBB : Etudes balistiques de base
 ECA : Etablissement central de l'armement
 ECA : Etudes et constructions aéronautiques
 ECAN : Etablissement de construction et armes navales
 ECP : Ecole centrale de pyrotechnie de Bourges
 EDF : Electricité de France
 EDIC : Engin de débarquement d'infanterie et de chars

EERT : Etablissement d'études et recherches de Toulouse
 EET : Etablissement d'études de Toulouse
 EETIM : Etablissement d'expériences techniques d'Issy-les-Moulineaux
 EFREI : Ecole française de radioélectricité, d'électronique et d'informatique
 EFTN : Ecole de formation technique normale (de Villebon-sur-Yvette)
 ELDO : *European Launcher Development Organization*
 EM : Evaluation de matériels (CELAr)
 EMA : Etat-major des Armées
 EMAA : Etat-major de l'armée de l'Air
 EMAC : Essais de matériels et de composants (CELAr)
 EMAT : Etat-major de l'armée de Terre
 EMBOW : Nom d'une campagne d'essais de leurrage OTAN
 EMGA : Etat-major général des armées
 EMM : Etat-major de la Marine
 EMR : *Electro-Mechanical Research*
 ENICA : Ecole nationale d'ingénieurs des constructions aéronautiques
 ENSAE : Ecole nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace
 ENSAR : Ecole nationale supérieure des armements terrestres
 ENSI : Ecole nationale supérieure d'ingénieurs
 ENSICA : Ecole nationale supérieure d'ingénieurs des constructions aéronautiques
 ENSMA : Ecole nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique (Poitiers)
 ENSTA : Ecole nationale supérieure des techniques avancées
 EOLE : Engin fonctionnant à l'oxygène liquide et à l'éther de pétrole
 EPA : Etablissement public administratif
 EPI : Ensemble de parachutage individuel
 EPNER : Ecole du personnel navigant d'essais et de réception
 ERA : Etablissement de recherche aéronautique
 ERAé : Etablissement de recherche aéronautique
 ERARP : Etablissement de recherches aéronautiques de la région parisienne
 ERART : Etablissement de recherches aéronautiques de la région de Toulouse
 ERAT : Etablissement de recherches aéronautiques de Toulouse
 ES : Evaluation et systèmes d'information (CELAr)
 ESOTGH : Equipement pour sauts opérationnels à très grande hauteur
 ESSY : Evaluation et simulation de systèmes (CELAr)
 ETAG : Etablissement d'expériences techniques des engins autopropulsés guidés
 ETAP : Ecole des troupes aéroportées de Pau
 ETAS : Etablissement technique d'Angers
 ETBs : Etablissement d'expériences techniques de Bourges
 ETCA : Etablissement technique central de l'armement
 ETO : Evaluation technico-opérationnelle
 ETTN : Etablissement technique de Toulon
 ETVS : Etablissement d'expériences techniques de Versailles
 ETW : *European Transonic Wind-tunnel*

F1 : Soufflerie basse vitesse, pressurisée, du Fauga
 F2 : Soufflerie subsonique du Fauga
 F4 : Soufflerie hypersonique du Fauga
 FATAC : Force aérienne tactique
 FH : Faible hauteur
 FIACRE : Faisabilité et intérêt aérodynamique du concept récent d'engin

FLAM : Falcon laminaire (DTP)
 FNS : Force nucléaire stratégique
 FORACS : *Naval FORces sensor and weapons Accuracy Check Site*
 FSAF : Famille sol-air futurs

G2P : Groupement pour les gros propulseurs à poudre
 GAG : Groupement d'artillerie guide
 GARTEur : *Group for Aeronautical Research and Technology in Europe*
 GEB : Groupe des engins balistiques (de la DTIA)
 GENEPI : Générateur photonique impulsional
 GEOS : Guerre électronique, information, signatures (CELAr)
 GESTA : Groupe d'étude des systèmes de télécommunications et armes
 GIE : Groupement d'intérêt économique
 GIFAS : Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales
 GMP : Groupe motopropulseur
 GMT : Direction des Grands moyens techniques
 GOPA : Groupement opérationnel des projectiles autopropulsés
 GPS : *Global Positioning System*
 GRA : Groupement français pour le développement des recherches aéronautiques
 GRAVES : Grand radar adapté à la veille spatiale
 GSE : Gyroscope à suspension électrostatique
 GSMA : Grandes souffleries de Modane-Avrieux (de l'ONERA)
 GTES : Groupe technique d'étude des engins spéciaux
 GV : Grande vitesse

HB : Hussenot-Beaudouin
 HP : Haute pression

IA : Ingénieur de l'armement
 IC : Ingénieur-en-chef
 IC : Informatique et calcul (CELAr)
 ICA : Ingénieur-en-chef de l'armement
 ICAS : *International Council of the Aeronautical Sciences*
 ICETA : Ingénieur en chef des études et travaux de l'armement
 ICEV : Informatique, conseil, évaluation (CELAr)
 IEM : Impulsion électromagnétique (créée par les explosions nucléaires)
 IG : Ingénieur général
 IGA : Ingénieur général de l'armement
 IGM : Ingénieur du Génie maritime
 IGN : Institut géographique national
 IGOR : *Intercept Ground Optical Recorder*
 IMFL : Institut de mécanique des fluides de Lille
 IPA : Ingénieur principal de l'armement
 IPETA : Ingénieur principal des études et techniques d'armement
 IRIG : *Inter-Range Instrumentation Group*
 ISAE : Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace
 ISS : *International Space Station*
 ITES : Informatique, télécommunications, sécurité (CELAr)

L1 : Soufflerie horizontale subsonique de l'IMFL

L2 : Soufflerie de site grande veine de l'IMFL
 LADD : *Low Altitude Down Delivery*
 LAMAS : Laboratoire de médecine aéronautique
 LCA : Laboratoire central de l'armement
 LCT : Laboratoire central des télécommunications
 LCVP : *Landing Craft, Vehicle, Personnel*
 LEA : Laboratoire d'équipements aéronautiques
 LIDAR : *Light Detection And Ranging*
 LRBA : Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques (Vernon)

MADIR : Moyen d'acquisition de données infrarouge
 MADISON : Moyen d'acquisition de données informatisées de signatures optiques numérisées
 MALAFACE : Marine Latécoère surface
 MALAFON : Marine Latécoère fond
 MARS : Miroir asservi au rail de simulation (SECT)
 MARTEL : Missile anti-radiation télévision (Nom donné au missile AS37)
 MARUCA : Marine Ruelle contre avion
 MASALCA : Marine Salmon contre avion
 MASURCA : Marine surface contre avion
 MAT : Manufacture d'armes de Tulle
 MBB : *Messerschmitt-Bölkow-Blohm*
 ME : Mesures et essais (CELAr)
 MESA : Moyen d'essais en simulation d'altitude
 MICA : Missile d'interception, de combat et d'autodéfense
 MILAS : Missile lutte anti-sous-marine
 MINOS : Montage inter ONERA-SNECMA
 MITRA : Mini-machine pour l'informatique temps réel et automatique
 MLRS : *Multiple Launch Rocket System*
 MPS : Moteur à propergol solide
 MPSR2 : Missile probatoire à statofusée rustique de 2^e génération
 MSBS : Mer-sol balistique stratégique
 MTBF : *Mean time between failures* = temps moyen entre pannes

NASA : *National Aeronautics and Space Administration*
 NENE : La rivière Nene est une rivière de l'est de l'Angleterre. Conçu en 1944, le Nene ou Rolls-Royce RB41 est l'un des premiers turboréacteurs fabriqués en série par Rolls-Royce
 NOTAMS : *Notice to Airmen* (avis aux navigateurs - ou navigants - aériens)

OA : Direction de l'aérodynamique (de l'ONERA)
 ODSA : Observation, détection, systèmes d'armes (CELAr)
 OE : Direction de l'énergétique (de l'ONERA)
 OE : Officier d'essais
 OM : Direction des matériaux (de l'ONERA)
 ONERA : Office national d'études et de recherches aérospatiales
 OP : Direction de la physique (de l'ONERA)
 OR : Direction de la résistance des structures (de l'ONERA)
 OSAACAS : Outil synthétique et automatisé d'aide à la conception et à l'analyse des simulations

OSV : Officier de sauvegarde en vol
 OTAN : Organisation du traité de l'Atlantique Nord
 OTOMAT : Oto Melara Matra

PACA : Poste calculateur du Masurca
 PAL : Propulseur à liquide
 PAM : *Pulse Amplitude Modulation*
 PARCA : Projectile autopropulsé, radioguidé, contre avions
 PC : Poste de commandement
 PCCT : Poste central de conduite de tir
 PCCT : Poste de commandement du champ de tir
 PCM : *Pulse Code Modulation* (Modulation à impulsions codées)
 PDM : *Pulse Duration Modulation*
 PIV : *Particle Image Velocimetry*
 PNSM : Poudrerie nationale de Saint-Médard-en-Jalles
 PPB : Pôle perforation – blindage
 PSP : Peinture sensible à la pression

R4.3 : Soufflerie de grilles d'aubes de Modane
 RAE : *Royal Aircraft Establishment*
 RENOVATMOS : Rénovation des moyens d'atmosphérisation
 RPE : Responsable de programme d'essai
 RPT : Rhone-Poulenc textile
 RTO : *Research and Technology Organization*

S1Ca : Soufflerie subsonique de Cannes
 S1Ch : Grande Soufflerie subsonique de Meudon
 S1MA : Soufflerie sonique, continue, de Modane
 S2Ch : Soufflerie subsonique de Meudon
 S2MA : Soufflerie continue, sub-, trans-, et supersonique de Modane
 S3Ch : Soufflerie transsonique, continue, de Meudon
 S3I : Systèmes d'information, interopérabilité et informatique générale (CELAr)
 S3MA : Soufflerie transsonique et supersonique, à rafales, de Modane
 S45 : Soufflerie d'étalonnage de l'IMFL
 S4B : Caisson à vide réglementation-essais de Modane
 S4MA : Soufflerie hypersonique, à rafales, de Modane
 S5 : Soufflerie du CEAT
 SABA : Sol-air basse altitude
 SAGEM : Société d'applications générales d'électricité et de mécanique
 SAMRO : Satellite militaire de reconnaissance optique
 SAR : *Synthetic Aperture Radar* (radar à synthèse d'ouverture)
 SAS : *Scandinavian Air System*
 SAT : Société anonyme des télécommunications
 SCSSI : Service central de la sécurité des systèmes d'information (CELAr)
 SCTI : Service central des télécommunications et de l'informatique
 SDI : *Strategic Defense Initiative*
 SDME : Sous-direction moyens d'essais (de la DRME)
 SDTA : Sous-direction technique Air
 SDTT : Sous-direction technique Terre
 SEC : Suspension élastique compensée

SECOR : *Sequential Correlation and Ranging*
SECT : Service des équipements de champs de tir
SEFT : Section d'études et de fabrication des télécommunications
SEM : Service environnement et métrologie
SEP : Société européenne de propulsion
SEPR : Société d'études de la propulsion par réaction
SER : Surface équivalente radar
SEREB : Société d'études et de réalisations d'engins balistiques
SETEL : Société européenne de téléguidage
SFACT : Service de la formation aéronautique des Corps techniques
SFENA : Société française d'équipements pour la navigation aérienne
SFIM : Société de fabrication d'instruments de mesure
SGN : Système global de navigation
SIAR : Service de la surveillance industrielle de l'armement
SIMS : Statoréacteur intégré modulable solide
SIR : Section infrarouge
SIROS : Simulateur d'images de radar à ouverture synthétique
SIS : Société d'instrumentation Schlumberger
SNCAN : Société nationale de constructions aéronautiques du Nord
SNCASE : Société nationale de constructions aéronautiques du Sud-Est
SNCASO : Société nationale de constructions aéronautiques du Sud-Ouest
SNECMA : Société nationale d'études et de constructions de moteurs d'aviation
SNIAS : Société nationale industrielle aéronautique et spatiale
SNLE : Sous-marin nucléaire lanceur d'engins
SNPE : Société nationale des poudres et explosifs
SOGREAH : Société grenobloise d'études et d'applications hydrauliques
SOLANGE : Système orientable lourd pour avions et gros engins
SOPEMEA : Société pour le perfectionnement des matériels et équipements aérospatiaux
SPEES : Système perfectionné d'évaluation de l'endommagement structural
SPRAT : Système portable de réseau acoustique de trajectographie.
SSBS : Sol-sol balistique stratégique
SSGG : Simulateur de souffle à grand gabarit
SSI : Sécurité des systèmes d'information (CELAr)
SSIG : Sécurité des systèmes et informatique générale (CELAr)
SSM : *Small Scale Motor*
SST : *Supersonic Transport*
STAé : Service technique aéronautique
STAT : Section technique de l'armée de Terre
STBFT : Section technique des bâtiments et des fortifications de l'armée de Terre
STC : Système de trajectographie captive
STCAN : Service technique des constructions et armes navales
STEn : Service technique des engins balistiques
STET : Service technique des engins tactiques
STPE : Service technique des poudres et explosifs
STRADA : Système de trajectographie d'approche
STRADI : Simulateur temps réel pour autodirecteur doppler à impulsions
STRADI : Système de translation et rotation pour l'acquisition de données d'imagerie (CELAr)
STRADIVARIUS : Station radar automatique et diversifiée, apte à la recherche de

l'identification universelle des satellites (ONERA)

STRATOS : Système temps réel d'acquisition et de traitement par ordinateur scientifique

STME : Service technique des moyens d'essais

STTA : Service technique des télécommunications de l'Air

SUPAERO : Ecole nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace

SYRCA : Système de restitution de combat aérien

SYRINX : Source impulsionnelle intense de rayonnement ionisant X

T2 : Soufflerie cryogénique du CERT/DERAT

TAI : Transports aériens intercontinentaux

TAY : La Tay est une rivière écossaise. Le Rolls-Royce RB44 Tay est une extrapolation, avec réchauffe (post-combustion), du RB41 Nene

TCOM : Télécommunications

TECN : Technologies, environnement, composants, normalisation (CELAr)

TFH : Très faible hauteur

THALES : Tunnel hydrodynamique horizontal du CERT/DERAT

THR : Turboréacteur à hélices rapides

TK : Technologie (CELAr)

TL : Télécommunications (CELAr)

TOSCA : Tourelle orientable, support de caméra d'attitude

TPS : *Turbo Powered Simulator*

TRA : Tuyère réverse arrière

TREMAIL : Trajectographe pour engins marins à l'île du Levant

TSS : Transport supersonique

TVB : Tuyère vers le bas

UR : Ultra-rapide

UTA : Union de transports aériens

VDL : « Vitesse-distance » structure en L

VE : Véhicule d'essais

VERAS : Véhicule expérimental de recherches aérodynamiques et structurales

VERDON : Rivière française. A donné son nom à un turboréacteur dérivé du Tay, construit sous licence par la société Hispano-Suiza

VERONIQUE : VERnon électRONIQUE ou VERnOn, acide NItrique

VESTA : Vecteur à statoréacteur

VFW : *Vereinigte Flugtechnische Werke*

INDEX DES NOMS

Nota : les chiffres romains renvoient aux volumes, les chiffres arabes aux pages, les numéros en italiques aux notes infrapaginales, les astérisques aux légendes de figures.

- Affre, Gilbert ; I, 82
Aimelet, Bernard ; II, 116
Alberge, Jacques ; II, 105, 106, 113, 116
Alexandre, André ; I, 245
Aliotti, Philippe ; II, 59
Anglade, Patrick ; I, 201, 215, 225
Apert, Charles ; I, 93
Arnaud, Emile ; I, 184 ; II, 59
Arretche, Louis ; II, 109, 112
Aucher, Max ; I, 210, 247, 248
Aubinière, Robert ; I, 185, 187
Auriol, André ; II, 82, 133
Auriol, Jacqueline ; I, 55
Auriol, Vincent ; I, 65*
Authesserre, Jacques ; II, 96
Auzepy, Christian ; II, 118
Avril, Jean-François ; II, 120
- Bacou, Jean-Pierre ; II, 13
Bagaria, Damien ; II, 83
Bahurel, Daniel ; II, 168
Barbance, Jean-Claude ; II, 90, 96
Barbotin, Robert ; II, 116
Bardin, Georges ; II, 159
Barlet, Louis ; II, 114
Baroux, Marie-Hélène ; I, 93
Barrois, William ; I, 90
Basseguy, Maurice ; I, 92
Bastin, Etienne ; I, 247
de Batz de Trenquelléon, François ; I, 128
Bazin, Maurice ; II, 165, 167
Béatrix, Christian ; II, 173, 174
Beaudoin, Paul ; I, 32, 40
Bècle, Jean-Paul ; II, 146, 150
Bédoura, Jacques ; I, 177
Bénichou, Marcel ; I, 23 ; II, 133
Berger, Jean ; II, 91
Berthet, Dominique ; I, 93 ; II, 116
Besseau, René ; I, 208, 220
Bévert, Amédée ; II, 172
Bidault, Georges ; I, 108
Bigand, René ; I, 55
- Bignier, Michel ; I, 171, 187
Bindel, Serge ; I, 210, 247, 248
Blamont, Jacques ; I, 180 ; II, 11
Blanc, Emile ; I, 75, 92, 93
Blancard, Jean ; I, 69*, 212, 247 ; II, 53
Bloch, René ; II, 13
Blot, Jean-Marie ; I, 218
Blouin, Emile ; I, 76, 92
Bonan, Franco-Renso ; I, 151
Bonaparte ; II, 135
Bonnet, Guy ; II, 37
Bonnet, Paul ; II, 90
Bonte, Louis ; I, 25, 33, 34, 65*
Borredon, Adrien ; I, 171, 187
Boucher, Henri ; II, 110, 111, 123*
Bouchet, François ; I, 93
Boudin, René ; I, 205, 218
Bouis, Xavier ; II, 162, 165, 165, 167
Boulet, Jean ; I, 55
Bovis ; II, 118
Breguet, Louis ; II, 134
Buscailhon, Jean-Marie ; II, 90
Busson, Michel ; II, 119
- Cado, Marcel ; II, 133, 176, 178
Cambois, Maurice ; I, 24, 25, 33
Capelier, Claude ; II, 82, 163
Caquot, Albert ; II, 134, 135, 138, 189*
Cardamonne, Jean-Christophe ; I, 128
Cardot, Henri ; I, 221, 241 ; II, 59
Carougeau, Maurice ; I, 202
Carpentier, Jean ; I, 20 ; II, 133, 133, 162, 184
Carpentier, Roger ; I, 36
Carrara, Jean-Marie ; II, 165
Carrière, Pierre ; II, 82, 154, 163
Cartier, Robert ; I, 50, 67*
Cassagnavères, Pierre ; I, 92
Castaing, Raimond ; II, 133
Cavassilas ; II, 37
Cavin, André ; I, 46, 71*
Cazin, Philippe ; II, 155
Chaban-Delmas, Jacques ; I, 250

- Chaboureau ; I, 187
 Chanson, Paul ; II, 89, 90
 Chapoulaud, Claude ; I, 245
 Chareyre, Henri ; II, 165
 Chenuil, Claude ; I, 128
 Chéret, Jacques ; I, 215, 248
 Chevallier, Dominique ; I, 186, 221
 Chevallier, Jean-Pierre ; II, 162
 Chevènement, Jean-Pierre ; II, 119
 Chiquet, Pierre ; I, 172, 181, 187
 Chirac, Jacques ; II, 121, 131*
 Christophe, Jean ; II, 166, 167
 Coatanhay, Jean-Louis ; II, 113
 Cochet, Alain ; II, 133, 167
 Colas, Alain ; II, 147
 Colin, Gabriel ; I, 33, 172, 181, 182, 230
 Collet-Billon, Antonin ; I, 211 ; II, 77
 Combes, Raymond ; I, 128
 Contensou, Pierre ; II, 133, 184
 Correc, Yves ; II, 119
 Costes, Alain ; I, 93
 Costes, Bertrand ; II, 167
 Coupry, Gabriel ; II, 173, 174
 Coutelle, Jean-Marie Joseph ; II, 135
 Coz, Gabriel ; II, 110
 Crocco, Arturo ; II, 134
 Crosnier, Jean ; II, 89, 90, 94

 Damien ; I, 41
 Daniel, Maurice ; II, 159
 Dard, Jean-Baptiste ; II, 13, 29, 59
 Darmon ; I, 69*
 Darricau, Jacques ; II, 83, 113
 Dassault, Marcel ; I, 37, 49
 Dat, Roland ; II, 173, 174
 Daum, Noël ; I, 33
 Debout, Bruno ; I, 105, 128
 Debout, François ; II, 120
 Debré, Michel ; I, 69*, 249, 250 ; II, 16, 125*
 Decaix, Gérard ; I, 128 ; II, 49, 50
 Deck, Alphonse ; II, 178
 Deforges, Michel ; II, 13, 19
 Delacroix, Jean ; I, 171, 177, 187
 Delaye, Michel ; II, 59
 Dellus, Paul ; I, 75, 93
 Delor, Bruno ; I, 92
 Delyon, Gérard ; I, 230, 231
 Deschamps, Marc ; II, 150

 Destuynder, Roger ; II, 173
 Devaux, Paul ; I, 212, 213
 Deveaux, Jean ; II, 95
 Dorey, Gérard ; II, 82, 165,
 Doris, Gilbert ; I, 206
 Dornon ; I, 217
 Dreyfus, Paulette ; II, 111
 Duc, Jean-Michel ; I, 93 ; II, 150
 Dumanois, Paul ; II, 141
 Dumas, Michel ; I, 76, 92, 93
 Dupriez, Francis ; II, 150, 168
 Dupuis, Georges ; II, 83

 Eiffel, Gustave ; II, 134, 134, 138,
 Etévé, Albert ; II, 135
 Etienne, Claude ; II, 29

 Faisandier, Paul ; I, 93, 177
 Fasso, Guy ; II, 142, 144, 167
 Faury, Marc ; I, 75, 76, 92, 93
 Fayard, François ; II, 120, 121
 Fayolle, Pierre ; I, 171, 181, 202, 204, 205, 206, 208 ; II, 89
 Ferber, Ferdinand ; II, 135, 190*
 Fermier, Patrick ; II, 116
 Fehrenbach, Jean-Marie ; I, 93
 Ferreol ; II, 30
 Finance, Robert ; I, 73, 91, 93
 Foch, Jacques ; I, 46, 71*
 Forestier, Jean ; I, 33, 71*
 Fouché, Yves ; II, 114, 118
 Fourure, Olivier ; I, 93
 Freson, Jean-Louis ; I, 93
 Fropier, Jean ; II, 95
 Frossard, Henri ; II, 106

 Gadenne, Philippe ; II, 113
 Gaillard, Félix ; II, 239, 239
 Gallois, Louis ; II, 119, 130*
 Gaudillière, Pierre ; II, 94
 de Gaulle, Charles ; I, 170, 178, 201 ; II, 34, 239
 Gaudon, Pierre ; II, 83, 113, 117, 120
 Gautrot, Stéphane ; I, 93
 Gay, Jean ; II, 184
 Gay, Jean-Patrice ; I, 128
 Geoffroy, Pascal ; II, 168
 Gerlier, Patrick ; II, 116
 Germain, Paul ; II, 133

- Giacometto, Charley ; I, 92
 Gillyboeuf, Jean-Paul ; II, 105, 111, 112, 113, 114, 116, 118, 119
 Girardin, Pierre ; II, 83
 Girerd, Henri ; II, 140, 141,
 Girerd, Louis ; II, 141
 Giusta, Louis ; I, 75
 Givaudon, Pierre ; I, 237 ; II, 106, 116
 Givois, Georges ; I, 128,
 Glavany, Roland ; I, 37
 Gobeltz, Jean ; II, 168
 Gobin, Lucien ; II, 105
 Gontier, Gérard ; II, 168
 Gouédard, Lyonel ; I, 201, 213 ; II, 83
 Gougeaud, Robert ; II, 177
 Goursolle, Joseph ; I, 151
 Grabas, Patrice ; II, 120
 Grandclément, Pierre ; II, 120
 Gretchko, Andreï ; I, 71*
 Griffoul, Philippe ; I, 128
 Groualle, Hervé ; I, 34
 Guénod, Roger ; I, 33
 Guichard, Olivier ; II, 106
 Guiguet, Jean-Claude ; II, 114
 Guérin, Maurice ; I, 170, 180 ; II, 11
 Guillou, René ; II, 119

 d'Hauthuille, Philippe-Alban ; I, 39, 60
 Hautière, Yves ; I, 187
 Helmer, Jean-Yves ; II, 80, 120, 121
 Heng, Raymond ; I, 75
 Hergé ; II, 136, 191*
 Hernu, Charles ; II, 119, 130*
 Hervet ; II, 90
 Hervieu, Claude ; I, 92
 Heriard-Dubreuil ; I, 187
 Huet, Charles ; II, 155
 Hussenot, François ; I, 32, 36, 40
 Hutin, Pierre-Marie ; II, 173, 174

 Iablokoff, Arthur ; II, 142
 Idrac, Jean ; I, 32

 Jamin, Pierre ; II, 13
 Javelot, Michel ; II, 106, 110, 114, 116, 119
 Joubert, Michel ; I, 222 ; II, 95
 Joxe, Pierre ; II, 121
 Jugeau, René ; II, 133
 Juliot, Philippe ; II, 83

 Kampé de Fériet, Joseph ; II, 168
 Kervella, Michel ; II, 120
 Klopstein, Gilbert ; I, 52
 Krebs, Arthur ; II, 135, 189*

 de L'Estoile, Hugues ; II, 154, 176
 L'Haridon, André ; II, 117
 La Burthe, Claudius ; II, 138
 Labourdette, Roger ; II, 173, 174, 178
 Lacoste, Marie ; II, 105
 Lafargue, Jacques ; II, 70
 Landry, Pierre ; I, 217
 Lapière, André ; II, 110, 116
 Lapresle, Antonin ; II, 135
 Lars, Roger ; II, 116, 117
 Laruelle, Gérard ; II, 155
 Lasserre, Michel ; I, 105
 Latreille, Bernard ; I, 70*
 Latron, Patrice ; II, 116
 de Launet, Michel ; I, 151, 169, 201 ; II, 116
 Laurent, Bernard ; II, 69, 83
 Lauriac, Georges ; I, 128
 Lavaud, Gaston ; I, 181 ; II, 30
 Lazennec, Henri ; II, 110
 Laverré, Jean ; II, 159
 Le Baron, Yves ; II, 110
 Le Gad, Jean ; II, 116, 120
 Le Guennic, Yannick ; II, 117
 Le May, Curtis ; I, 70*
 Lecomte, Michel ; I, 225 ; II, 11
 Lecomte, Pierre ; I, 51
 Leduc, René ; I, 48
 Leger, Georges ; I, 173, 190*
 Leparmentier, Robert ; I, 173, 188
 Lerat, Jacques ; II, 150
 Leray, Pascal ; II, 114, 126*
 Levannier, Gaston ; II, 119
 Levionnois, Jean-Luc ; II, 119
 Leygonie, Jacques ; II, 91
 Leynaert, Jacky ; II, 167
 Liautard, Marc ; II, 120
 Libessart, Paul ; II, 70, 83
 Lions, Jacques-Louis ; II, 163
 Lisbonis, Max ; I, 201, 218, 219
 Littolff, Yvan ; I, 37

 Mainguy, Anne-Marie ; II, 168
 Malavard, Lucien ; II, 133, 141, 148

- Marchal, Jacques ; I, 171 ; II, 76, 83
 Marec, Jean-Pierre ; II, 133
 Margier, Gilbert ; II, 105, 116
 Margot, Philippe ; II, 120
 Marguet, Roger ; II, 82, 155
 Marias, Michel ; I, 46, 71*
 Martelli, Philippe ; I, 201
 Martinot-Lagarde, André ; II, 168
 Marvillet, Jean-Pierre ; I, 239, 243
 Mathieu, Marcel ; II, 142
 Maugars, Denis ; II, 133
 Maybach, Karl ; II, 70
 Mazer, Paul ; II, 148
 Mazet, Robert ; II, 173, 174
 Meauzé, Georges ; II, 150
 Messmer, Pierre ; I, 205, 249 ; II, 13, 32, 106, 109, 123*,
 Michaud, Robert ; I, 185, 187
 Moch, Jules ; I, 108
 Moinardeau, Jean ; I, 90
 Mollard, Amédée ; I, 185
 Monlibert, Jean-Luc ; I, 15
 Monnerie, Bernard ; II, 151
 Monnet, Maurice ; II, 90, 91
 Moreau, Claude ; I, 92
 Moreau, Michel ; I, 201, 211, 217, 244, 245
 Moret, Jean ; II, 59
 Moureu, Henri ; II, 70
 Moutier, Gérard ; I, 245
 Munnich, Robert ; I, 33, 69*, 71*
- Nardin ; I, 59
 Natta, Maurice ; I, 203, 205, 216 ; II, 29, 29, 30
 Naville, François ; I, 93
 Normand, Jean-Yves ; I, 91
- Oestrich, Herman ; I, 106
 Osterroth, Bernard ; I, 93
- Pacaud, Louis ; I, 76, 92, 93, 128
 Parayre, Pierre ; II, 116
 Pélioso, Jean-Claude ; II, 59
 Pelosse, Pierre ; I, 93
 Pénin, Francis ; II, 106
 Pérès, Joseph ; II, 141, 148
 Perrais, Jean-Paul ; I, 75, 93
 Peters, Henrich ; II, 141
 Peuron, Roger ; II, 239
- Peyrard, Jean-Marc ; II, 94
 Philippe, Jean-Jacques ; II, 139
 Pianko, Marc ; II, 168
 Piazzoli, Gérard ; II, 173, 174
 Pierre, Marcel ; II, 133, 139, 140, 142, 165
 Pieters, Bernard ; I, 225
 Pilz, Wolfgang ; II, 11
 Playe, Noël ; I, 182, 204, 205
 Plenier, Jacques ; I, 75, 93
 Plessier, Francis ; I, 71*
 Pléven, René ; I, 65*
 Poimboeuf, Jean-Marie ; II, 120, 121
 Poincaré, Léon ; I, 128
 Poisson-Quinton, Philippe ; II, 133, 139, 172
 Pommaret, René ; I, 33
 Pompidou, Georges ; II, 106
 Prandtl, Ludwig ; II, 134
 Protte, Bernard ; I, 171
- Queffélec, Didier ; II, 83, 117, 120
 Quidet, Michel ; I, 45
- Rabault, Jean-Pierre ; II, 133
 Rabouchinsky, Dimitri ; II, 134
 Raffin, André ; II, 141, 142
 Raguin, Denis ; II, 120
 Ramette, Philippe ; I, 93
 Reagan, Donald ; II, 80
 Rebuffet, Pierre ; II, 139, 184
 Receveur, Henri ; I, 208, 220 ; II, 116
 Renard, Charles ; II, 134, 135, 138, 189*
 Renard, Patrice ; I, 231
 Renaudie, Jean ; I, 208
 Reydellet, Daniel ; II, 120
 Reymond, René ; I, 205, 208, 216, 217
 Ricard, François ; I, 106, 128
 Richard, Alain ; II, 121
 Ripoll, Jean-Claude ; I, 93
 Rocca, Louis ; I, 217
 Rombout, Émile ; II, 106, 107, 109, 110, 114, 116
 Rosoor, Jean-Louis ; I, 171, 185, 187 ; II, 51, 59
 Roux, Claude ; I, 201 ; II, 31
 Roy, Maurice ; II, 133, 148
 Rozmarin, Jean ; I, 201, 241, 242

- Salmon ; II, 90
Salmon, Max ; II, 41
Sarrail, Jean ; I, 37
Sautier, Pierre ; I, 34
Sauvaget, Jacques ; I, 128
Sauvan, Henry ; II, 117
Schardin ; II, 90
Scheller, Michel ; II, 133
Schmitt, Volker ; II, 151
Schneider, Stanislas ; II, 167
Schwebel, Maurice ; I, 201
Schweich, André ; II, 167
Ségalen, Jean ; II, 110, 116
Sillard, Yves ; I, 185, 187 ; II, 119
Simon, François ; II, 83
Sintes, Pierre ; I, 93
Soissons, Jean ; I, 69*, 205 ; II, 13
Sompayrac, Jean-Claude ; I, 171, 187
Sorlet, Jean ; I, 202 ; II, 83
Soufflet, Pierre ; II, 50, 51
Souto Cruz ; I, 216
Stanton, Thomas ; II, 134
Stierlé, Yves ; I, 211, 241, 242
Surugue, Jean ; II, 148
- Tamagnini, Pierre ; I, 34
Taran, Jean-Pierre ; II, 164
Targa, Francis ; I, 128
- Taurel, Louis ; I, 92
Tayeau, Jean ; I, 170
Terrazoni, Claude ; I, 69*
Texier, Henri ; I, 92
Thoral, Marius ; II, 110
Thouraud, René ; I, 74
Tillon, Charles ; I, 108 ; II, 141
Trichard, Jean ; II, 155
Truchetet, Dominique ; II, 116
- Vassy, Etienne ; I, 180
Vayssié, Lucien ; II, 89, 93
Vellay, Eugène ; II, 133
Verney, Henri ; I, 213
Verstraete, Edouard ; I, 206
Vidart, Alain ; II, 91
de Villemagne, Christian ; II, 83
Villetorte, Edmond ; I, 33, 71*
Villoing, Philippe ; II, 119
Voiney ; II, 118
Von Karman, Théodore ; II, 141
- Wagner, Patrick ; II, 165
Wanner, Jean-Claude ; I, 51
Wenham, Frank ; II, 134
Wenisch, Jacques ; I, 128
Wright (Frères) ; II, 134
Willaume, Roland ; II, 148

CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

Chapitre 1 (CEV) : Figs. 1-7, 9, 10, 13, 14 : Photos CEV ; Fig. 8 : Photo AAEV ; Figs. 11, 12 : Photos ministère des Armées « Air », Service d'information et d'études.

Chapitre 2 (CEAT) : Photos CEAT.

Chapitre 3 (CEPr) : Photos CEPr.

Chapitre 4 (CAP) : Photos CAP. Fig. 6 : photo rapport DTAT 1972, origine ECPA.

Chapitre 5 (CIEES) : Photos CIEES.

Chapitre 6 (SECT) : Photos SECT.

Chapitre 7 (CEL) : Photos DGA / Essais de missiles.

Chapitre 8 (CEM) : Photos DGA / Essais de missiles.

Chapitre 9 (CAEPE) : Photos DGA / Essais de missiles.

Chapitre 10 (LRBA) : Photos LRBA.

Chapitre 11 (CEG) : Photos CEG.

Chapitre 12 (CELAr) : Photos CELAr.

Chapitre 13 (ONERA) : Photos ONERA, sauf Fig. 3 : Photo IGN Paris 2005 – Photothèque 1999 FR 9039 ; Figs 4-5 : Musée de l'air et de l'espace / Le Bourget ; Fig. 6, illustration en bas à droite : Hergé / Moulinsart 2006 ; Fig. 60 : Photo ETW ; Fig. 77, gauche : photo extraite d'une vidéo du DLR ; Figs 80-84 : Photos SOPEMEA.

Achévé d'imprimer à l'Onera/ISP le 30/06/2013

COMAERO

Un demi siècle d'aéronautique en France

Pendant la seconde moitié du XXe siècle, l'aéronautique française a vécu une aventure passionnante. Réduite à peu de chose au lendemain de la guerre, il lui fallait se reconstruire et se réorganiser. C'est ce qu'elle a fait avec brio, en se retrouvant en quelques décennies à l'égal des meilleures. Elle est ainsi devenue capable de satisfaire la plupart des besoins de l'armée française et de prendre une place majeure dans le maintien en conditions opérationnelles des flottes militaires de toutes origines. Cette réussite est due à des facteurs techniques, industriels, financiers et politiques, et notamment à une collaboration originale entre l'industrie, les services officiels et les établissements d'état, fournisseurs, prestataires de service et clients étant mus par un même désir de renaissance, puis de succès. C'est cette histoire que la présente collection veut retracer. Ses rédacteurs, souvent ingénieurs de l'Air, anciens directeurs de programme, d'établissements ou chefs de service, se sont regroupés au sein du Comité pour l'histoire de l'aéronautique (COMAERO) pour animer le travail de mémoire collectif, complété par l'exploitation des archives. Leur travail se veut un témoignage de l'oeuvre accomplie en un demi-siècle d'aéronautique et une invitation, pour les historiens, à se pencher sur elle.

Centres et moyens d'essais

Au lendemain de la deuxième guerre mondiale, la création du Centre d'essais en vol (CEV), du Centre d'essais des moteurs et hélices et de l'Établissement aéronautique de Toulouse - devenu plus tard le Centre d'essais des propulseurs (CEPr) et le Centre d'essais aéronautique de Toulouse (CEAT) - a permis à la Direction technique et industrielle de l'aéronautique de reconstituer son potentiel d'essais et de mise au point d'aéronefs. Ces centres, associés aux laboratoires des services de la direction technique, ainsi que l'Office national d'études et de recherches aéronautiques (Onera) créé en 1946, ont contribué par leurs compétences et leurs moyens d'essais à la renaissance de l'industrie aéronautique française et à son essor.

Créé en 1946 sous l'égide de la Direction des études et fabrications d'armement, le Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques (LRBA) constitue le premier maillon des moyens consacrés au développement de missiles. D'autres établissements liés à cette activité sont ensuite créés comme le Centre d'achèvement et d'essais des propulseurs et engins (CAEPE), le Centre d'essais des Landes (CEL) et le Centre d'essais de la Méditerranée (CEM). Le Service des équipements de champs de tir (SECT) a lancé les études et les réalisations des grands moyens d'essais du CEL et du CEM. Le Centre d'Etudes de Gramat (CEG), créé en 1947 pour les essais de missiles, s'est consacré depuis 1955 aux recherches et expérimentations en détonique.

La part de plus en plus importante prise par l'électronique et l'informatique dans les systèmes d'armes conduit à la création du Centre d'électronique de l'armement (CELAr) en 1964.

Tous ces établissements ont joué dans les programmes aéronautiques et de missiles un rôle éminent qu'il convenait de relater.

Tel est l'objet du présent ouvrage, qui retrace l'évolution de leurs moyens, de leurs missions et leur adaptation à l'évolution de leur environnement jusqu'au regroupement des moyens de la DGA au sein de la Direction des centres d'expertise et d'essais (DCE) en 1997.

Les auteurs

Autour de Jean-Pierre Marec, coordinateur de l'ensemble de l'ouvrage et rédacteur du chapitre Onera, le groupe de travail est constitué de Jean-Luc Monlibert (Introduction et documentation), Marcel Bénichou (CEV), Robert Finance (CEAT), Bruno Debout (CEPr), Joseph Goursolle et Franco-Renso Bonan (CAP), Michel de Launet (CIEES et SECT), Michel Lecomte (CEL), Claude Etienne, Jean-Baptiste Dard et Maurice Natta (CEM), Roger Peuron (CAEPE), Bernard Laurent (LRBA), Jean Crosnier et Lucien Vayssié (CEG), Jean-Paul Gillyboeuf (CELAr), Marcel Cado (SOPEMEA). La coordination a été facilitée par l'aide efficace de Michel de Launet et de Jean Carpentier, avec le concours initial éclairé de Roger Guénod.

ISBN 978-2-7257-0017-5 (Tome I)

ISBN 978-2-7257-0018-2 (Tome II)

ISBN 978-2-7257-0019-9 (Set)

COMAERO



Onera Chemin de la Hunière
91761 PALAISEAU CEDEX

Tél. : +33 1 80 38 60 60

Fax : +33 1 80 38 65 10

www.onera.fr