

## Les essais en Vol du RAFALE

*Patrick CASTAGNOS*  
*Responsable des essais en vol RAFALE*  
*Dassault Aviation*  
*BP 28, 13801 Istres Cedex, France*

*Marc TOURTOULON*  
*Responsable équipe intégrée des essais en vol RAFALE*  
*Centre d'Essais en Vol*  
*13128 Istres Air, France*



### Résumé :

Les essais en vol du RAFALE ont été l'occasion de relever des défis difficiles, de mettre en oeuvre de nouvelles techniques d'essais, d'adopter de nouveaux schémas d'organisation.

Alors que 5 années se sont écoulées depuis le 1er vol du RAFALE C01 et que les 4 prototypes totalisent plus de 2300 vols, il a paru opportun de se livrer à une comparaison entre les essais en vol tels que nous les avions prévus en 1990 et tels qu'ils se sont réellement déroulés jusqu'à aujourd'hui.

Les deux articles qui suivent effectuent cette analyse. Le premier s'intéresse plus spécialement aux aspects coûts, objectifs généraux du programme et état de la mise au point technique. Le deuxième est plus axé sur les relations état-industrie et sur l'optimisation des compétences et des ressources.

## Les essais en vol du RAFALE

### Regard sur 5 ans d'activité

*Patrick CASTAGNOS  
Responsable des essais en vol RAFALE  
Dassault Aviation*



Le 19 mai 1991, Guy Mitaux-Maurouard décollait le RAFALE C01. Ce 1er vol du prototype RAFALE monoplace air fut suivi en décembre de la même année par celui du 1er prototype marine M01 puis, un peu plus tard, par les prototypes biplace B01 et marine M02.

Depuis, les avions ont régulièrement volé ; 85% des essais nécessaires pour la mise au point du système dans le 1er standard sont effectués et l'intérêt marqué par certaines forces aériennes étrangères nous a permis d'aller bien au-delà des limites de notre zone aérienne d'essai et d'agrémenter les dépliants publicitaires de Gizhé, Singapour ou Kuala Lumpur.

Aujourd'hui, même si le ralentissement voulu du programme pour des raisons budgétaires a sensiblement modifié les hypothèses de mise en série, notre impression est que les objectifs techniques, calendaires et financiers du programme ont jusqu'ici été tenus et qu'il n'existe pas de réelle distorsion entre le déroulement des essais en vol

tels que nous les avions prévus et tels qu'ils se sont jusqu'à aujourd'hui réellement déroulés.

Au-delà d'un sentiment général, il est toutefois intéressant d'analyser aujourd'hui ces écarts ; ce qui suit en est une première tentative.

### **Planning général**

Le planning officiel de début 1991 prévoyait la mise en vol des 2 premiers prototypes C01 et M01 dans l'année, le vol du B01 début 1993 et le vol du 2ème proto marine M02 mi 1993.

2 campagnes d'essais sur base à terre mi et fin 1992 devaient permettre de poser le RAFALE sur le pont d'un porte avions en avril 1993.

La mise au point de l'ensemble des systèmes avion dans la totalité du domaine de vol nous semblait devoir être acquise après 2 ans de vols, avant que ne nous mobilisent l'ouverture des domaines d'emport avec charges - considérés comme une

formalité suite à l'expérience qu'on en a sur Mirage 2000 -, l'ouverture des domaines de séparation et la mise au point du système.

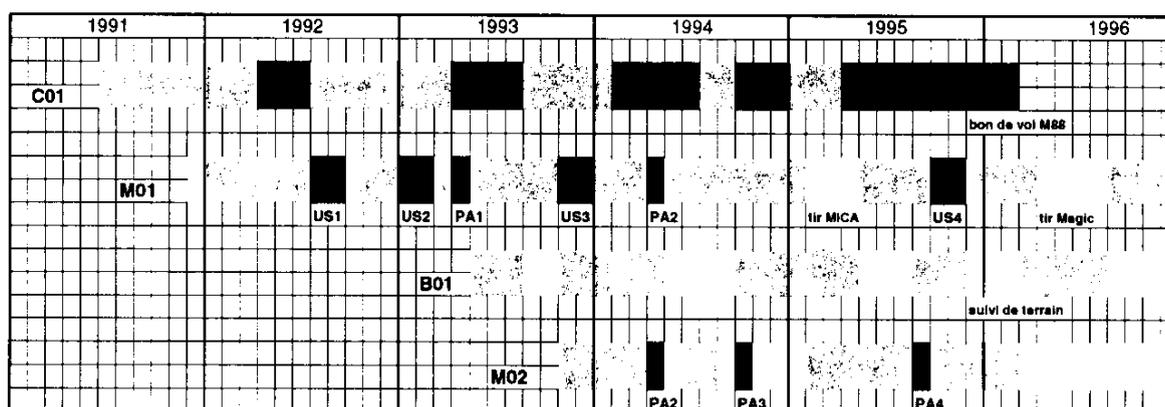
Du point de vue moteur, le bon de vol était espéré pour fin 95.

Les objectifs de série étaient alors de produire des RAFALE à partir de fin 1996 dans un 1er standard principalement axé sur des missions air-air.

Force est de noter que les premières années d'essais en vol furent très comparables à nos prévisions : malgré une mauvaise surprise sur les générations hydrauliques 350 bars lors des premiers points fixes - quelques minutes de fonctionnement ayant suffi à faire casser en fatigue les tuyauteries aval pompes HP, la situation fut assainie par une action commando et le C01 ne vola qu'avec 2 mois de retard sur le planning objectif. Le M01 vola à la date prévue tandis qu'en 1993 les 2 prototypes suivants volaient 4 mois plus tard que nous ne l'avions imaginé début 1991. Ces légers décalages s'expliquent par la correction de problèmes mis en évidence par les 2 premiers prototypes, quelques retards sur des nouvelles fournitures (sièges, nouveaux composants électroniques) ou par le

Les rendez vous marins furent ponctuellement respectés : une action volontariste, dont un des aiguillons fut de donner tort à ceux qui ne croyaient pas qu'un delta puisse être un excellent avion embarqué, permit d'apponter sur le porte-avions Foch le jour dit. Les rendez-vous suivants furent aussi ponctuels sauf quand la situation internationale appelait les porte-avions à des activités plus opérationnelles et plus lointaines.

L'ouverture du domaine de vol jusqu'à 750 kt/M = 1.8 se fit sans difficulté et la mise au point des systèmes généraux à l'intérieur de ce vaste domaine ne posa pas de gros problème. Remarquons toutefois que, si après 2 ans de vol, les systèmes généraux étaient mis au point à 95%, la finition prit beaucoup plus de temps. C'est le côté pervers du "tout numérique" ; la moindre modification de logique dans un système risquant soit de dégrader le niveau de sécurité du système considéré, soit d'avoir des effets secondaires sur d'autres systèmes, toute évolution nécessite de longs mois d'instruction et de délicates opérations de coordination entre les industriels. Alors qu'il y a une dizaine d'années, nous attendions avec impatience que des calculateurs numériques



## PLANNING DES 4 PROTOTYPES

déménagement de l'atelier de fabrication prototype initialement situé au sein du bureau d'études vers l'usine de production. Eu égard à l'importance du changement, cette mesure de rationalisation industrielle n'ayant, en fin de compte, que peu altéré les opérations de fabrication.

embarqués nous permettent à loisir de jouer avec les logiques et d'optimiser les systèmes en un tournemain, nous pensons parfois aujourd'hui avec nostalgie à l'époque où un fer à souder et quelques résistances permettaient, dans la soirée, de

modifier une loi de freinage sans craindre que cela n'influe sur la séquence de sortie du train.

La mise au point du système d'avionique et d'armements s'est initialement déroulée au rythme prévu puis s'est progressivement ralentie dans un contexte où les délais doivent s'effacer devant l'économie.

Toutefois, on peut aujourd'hui considérer qu'une bonne partie du chemin est déjà parcourue, notamment dans la mise au point du 1er standard opérationnel. En particulier, des tirs Magic et Mica sur cibles ont permis de valider les conduites de tir tandis que des essais de suivi de terrain nous ont pleinement rassurés sur l'architecture du système et la précision de localisation de l'avion. Dans le contexte budgétaire et politique précédemment souligné, le début de la série a été repoussé de 2 ans soit 2ème semestre 98.

### Volume des essais en vol

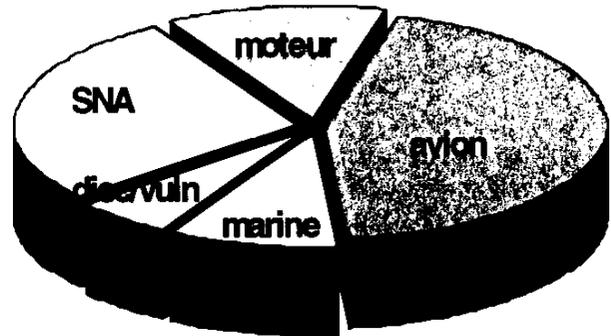
Dès le début du programme, quand il fut nécessaire de déterminer le nombre de prototypes nécessaires et leur date de disponibilité pour assurer le développement, des discussions après s'engagèrent. Nombre d'éléments incitaient à prévoir large pour ne pas se laisser surprendre par les difficultés de la tâche :

- développement simultané d'un monoplace air, d'un biplace air et d'un monoplace embarqué sur porte-avions,
- innovations nombreuses dans la définition de la cellule et des systèmes généraux,
- mise en oeuvre de technologies de furtivité,
- nécessité de traiter très tôt les problèmes de vulnérabilité électromagnétique,
- système d'armes ambitieux dès le 1er standard.

A l'opposé, les contraintes budgétaires exigeaient que le nombre de mois d'essais en vol soit réduit au strict nécessaire.

Une attitude particulièrement volontariste permit de maintenir notre prévision à un volume comparable à ce que le Mirage 2000 avait nécessité lors de ses essais initiaux : environ 190 mois x avions de développement entre le 1er vol du 1er prototype et le 1er vol de l'avion de série.

Un gain de productivité particulier était attendu des essais de mise au point avion (cellule, systèmes généraux, emports, séparations) dont le volume était, par rapport au Mirage 2000, divisé par 2.



### Répartition des essais du 1er standard

Aujourd'hui, ce pari est en passe d'être gagné : alors que plus des trois quarts de ce volume d'essai a été réalisé, notre prévision recalée montre que :

- le nombre total de mois d'essai sera sensiblement égal à la prévision de 1991,
- les essais de mise au point cellule auront été légèrement plus consommateurs de temps (les gains de productivité entre le Mirage 2000 et le RAFALE auront quand même été de 40% - pour 50% espérés -),
- la mise au point moteur est restée à l'intérieur du quota alloué,
- le bon déroulement des essais spécifiques Marine a permis quelques gains,
- de nouvelles méthodes mises en oeuvre lors des essais de vulnérabilité et de discrétion ont permis des gains appréciables (40% du temps prévu a été économisé),
- la mise au point du système d'avionique et d'armements sera réalisée dans le temps prévu,

Deux unités permettent d'évaluer une activité d'essais en vol : le nombre de mois d'essais et le nombre de vols.

Si le nombre de mois d'activité - au sol ou en vol - des avions de développement est une donnée essentielle car directement corrélée au coût, le nombre de vols n'est pas moins intéressant : c'est un indicateur de la maturité de l'avion et de la fiabilité que l'on pourra espérer avec les avions de série. Début 1991 nous évaluions à 1500 vols,

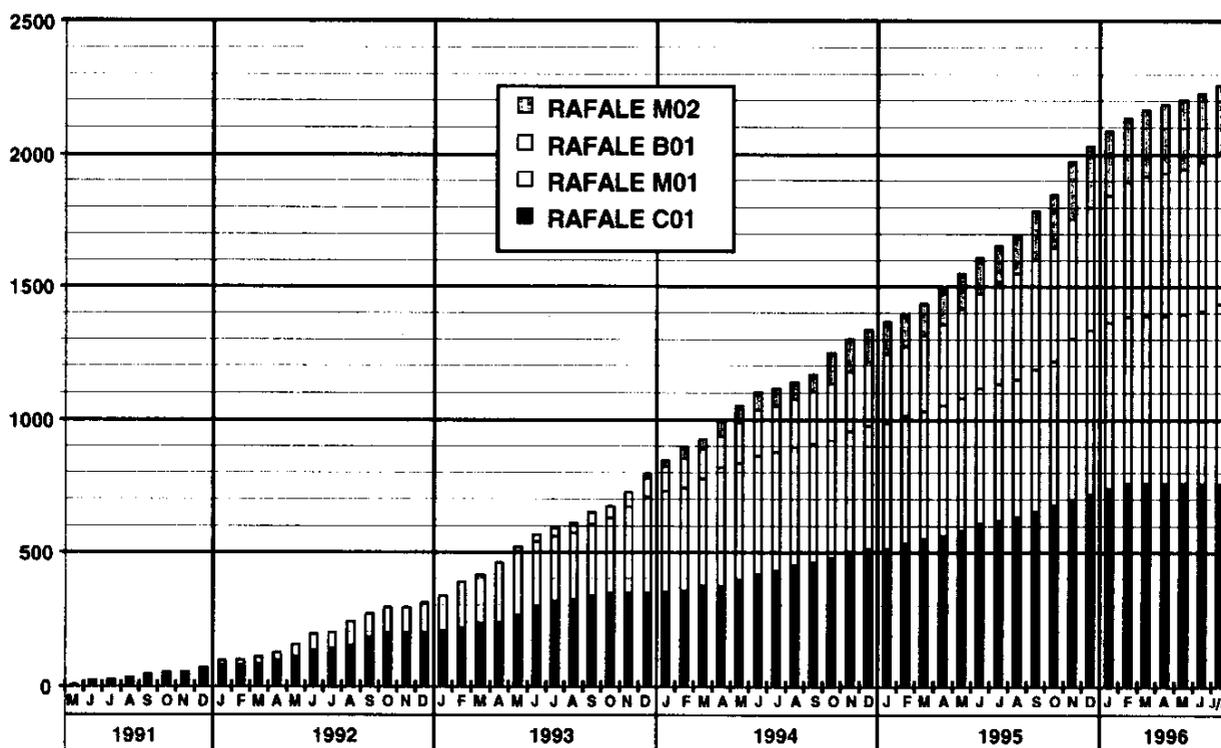
l'expérience, nécessaire à la maîtrise des risques, dont nous disposerions au moment de la sortie en série. Calculé à partir du nombre de mois d'essais prévus et des cadences de vol "classiques" suivant les types d'essais, ce volume de vols nous semblait un plancher sous lequel il ne fallait pas tomber. Aujourd'hui plus de 2300 vols ont été réalisés par les 4 prototypes, sans compter les 867 vols du démonstrateur RAFALE A. Même si certains vols réalisés à partir du porte-avions Foch (catapultage - vidange - appontage) ne constituent pas des records d'autonomie en l'air, nous pouvons mettre en avant une expérience solide et faire état d'une excellente fiabilité. En corrolaire de l'activité totale, quelques chiffres peuvent être soulignés :

- pendant le mois d'octobre 1994, le M02 a fait 52 vols d'essais dont 25 depuis le porte-avions,
- durant la dernière campagne d'essais sur base à terre, en 6 semaines d'essais, le M01 a réalisé 57 catapultages et plus de 120 arrêts par brin dans 8 configurations d'emport différentes,
- au cours des vols de convoyage vers les Salons aéronautiques de Dubaï et Singapour, des étapes de plus de 7 h ont été faites avec ravitaillement en vol.

## Composition de l'équipe d'essais

Rentrer dans le détail des métiers et de leur évolution ces dernières années nous emmènerait loin et serait d'un intérêt réduit tant l'organisation est liée à la culture de l'entreprise. Certaines tendances méritent toutefois d'être soulignées. Bien qu'entrevoiant l'organisation dans la continuité des programmes précédents - une forte proportion de l'équipe d'essai en vol du RAFALE ayant précédemment travaillé aux essais en vol du Mirage 2000 ou du démonstrateur RAFALE A -, il fut décidé en 1990,

- de mettre en commun les personnels travaillant sur les bancs d'intégration et ceux affectés à la mise en oeuvre des systèmes sur avion ;
- d'augmenter, dans les équipes de mise en oeuvre avion, la part des techniciens dits "systèmes" donc d'une culture plus électronique/automatique/informatique que mécanique ;
- de renforcer le département des ingénieurs d'essais spécialistes - destinés à suivre les problèmes de leur compétence sur les différents programmes - afin de traiter correctement les



**NOMBRE DE VOLS EFFECTUES PAR LES 4 PROTOTYPES**

technologies les plus pointues. A cet égard, certains pensaient alors que s'éteignait l'ère de l'ingénieur d'essai généraliste, historiquement meneur des équipes d'essais, capable de s'occuper de tous les thèmes d'essais en vol ;

d'intégrer à l'équipe d'essai un contrôle budgétaire local. Il était clair, dès le début, que les aspects économiques seraient un point focal et qu'il faudrait veiller avec acuité à respecter les allocations budgétaires.

5 ans d'expérience prouvent bien que la mise en oeuvre d'un avion aux systèmes totalement intégrés est, en essais, plus compliquée que pour les avions de génération précédente. A titre d'exemple, un essai de manoeuvre train au sol ne nécessitait que de mettre l'avion sur vérin et de l'alimenter en hydraulique ; un bon chronographe et l'observation des lampes en cabine faisaient le reste - Aujourd'hui un tel essai sera incomplet - et parfois non faisable - si les calculateurs de mission et les visualisations ne sont pas mises en route et si on n'observe pas avec des "espions de bus" que



les 2 voies du calculateur numérique d'atterrisseur commandent des ordres simultanés et cohérents - Les équipes de mise en oeuvre des prototypes ont donc vu leur niveau technique s'accroître considérablement avec parfois pour corollaire une "spécialisation excessive". Il a fallu batailler parfois pour ne pas voir émerger des "Monsieur mise en oeuvre du carburant", "Monsieur mise en

oeuvre des visualisations"... Notons que la tâche est dure parfois pour nos ingénieurs de piste - chefs des équipes de mise en oeuvre des prototypes - qui doivent traiter avec la même dextérité les problèmes mécaniques et les subtilités des logiques internes des calculateurs.

Toujours au chapitre de la maîtrise de la complexité, nous avons réussi à ce que les ingénieurs d'essais programme restent des généralistes capables d'enchaîner des essais aussi différents que des vols d'ouverture de domaine et des essais d'intégration de contre-mesures. Cette capacité nous semble essentielle pour maîtriser la mise au point d'un avion et opérer les bons arbitrages.

Le contrôle de gestion n'a pas - pas seulement ! - eu pour but de fournir des tableaux de bord de synthèse à notre direction de programme mais de veiller sur place, et avec un temps de réaction très court, à ce que les courbes de dépenses ne s'infléchissent pas dans le mauvais sens - Dans ce domaine, les méthodes mises en oeuvre sur RAFALE se sont généralisées à tous les programmes, ce qui tend à en prouver l'efficacité.

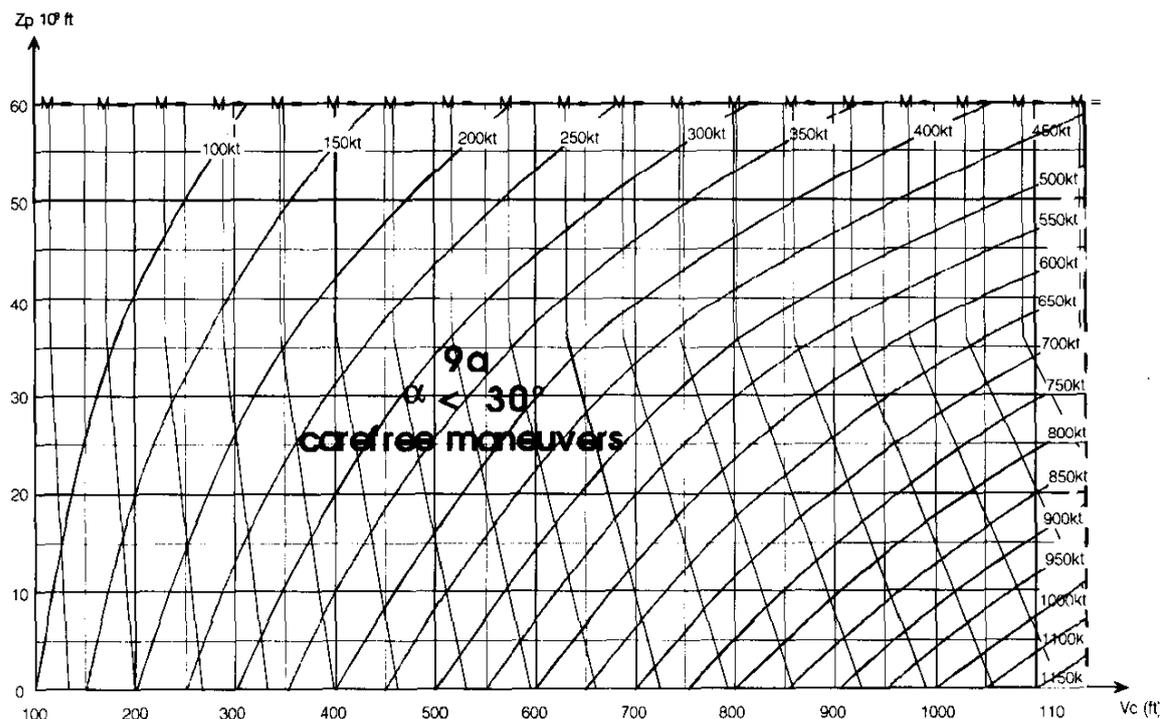
### Domaine de vol

Traditionnellement, l'ouverture des domaines de vol est effectuée avec célérité sur les avions Dassault. Le RAFALE n'a pas failli puisque, dès son 1er vol, le RAFALE C01 évoluait dans le domaine  $450 \text{ kt/M} = 1.2/4 \text{ g}$ .

8 g étaient obtenus au 5ème vol et  $M = 1.6$  au 27ème vol. Le domaine de vol a donc été ouvert jusqu'à  $750 \text{ kt/M} = 1.8/9 \text{ g}$  et  $30^\circ$  d'incidence sur les 3 versions du RAFALE sans rencontrer de problème notable sur la structure, les commandes de vol, ni sur l'ensemble des systèmes.

Du côté des basses vitesses, la limite est 100 kt mais 80 kt est parfois pratiqué lors des démonstrations en vol par des pilotes désireux de mettre en valeur les qualités de l'avion. Un minimum de 15 kt a été pratiqué dans un exercice de combat contre un Mirage 2000 par un pilote vindicatif ; c'était donc un essai avec un peu d'avance sur une campagne de vols à grande incidence que, vus les risques inhérents à ce type d'évolutions, nous n'avons prévue que lorsque nous considérerons qu'un prototype est "surabondant".

D'une manière générale, l'ouverture des domaines de vol se fit donc sans heurts et les méthodes mises en oeuvre (modélisations, simulations, mode de progression) s'avèrent sûres et efficaces. Le seul point qui mérite réflexion est la circonspection que



### DOMAINE DE VOL OUVERT

nous eûmes à déployer à l'origine du programme pour ouvrir le domaine à basse altitude grande vitesse ; celui-ci est significatif des problèmes que posent les systèmes intégrés. A partir de divers capteurs, l'anémo-baro-clinométrie de l'avion est calculée par les calculateurs des commandes de vol qui l'utilisent à leur profit pour adapter les différentes lois de pilotage aux conditions de vol et distribuent ces données (Mach, vitesse, incidence...) à l'ensemble des systèmes de l'avion y compris les moteurs. Lorsqu'une cascade de pannes fait totalement perdre les sources anémo-baro-clinométriques, chaque système se replie sur un fonctionnement dégradé, qui dans la 1ère phase du développement impliquait certaines contraintes. Ainsi, en supersonique basse altitude les commandes de vol exigeaient-elles que, en panne totale d'anémométrie, le pilote rejoigne le subsonique moyenne altitude pour y sélectionner un mode secours en suivant un profil de vol particulier (montée supersonique puis décélération iso altitude). Parallèlement les moteurs, en l'absence de conditions de vol de référence, interdisaient l'usage de la post-combustion. Les études de sécurité préalables au 1er vol du RAFALE C01 mirent en évidence un hiatus : dans le coin du domaine situé en supersonique en dessous de 10000 ft - dénommé "Triangle des Bermudes" - la poussée des moteurs en plein gaz sec ne permettait pas de monter iso-Mach. Comme l'amélioration de ces fonctionnements dégradés n'était possible qu'après être allé identifier

finement les coefficients aérodynamiques et les modes souples de l'avion, l'ouverture du domaine de vol se fit néanmoins. Nous limitâmes toutefois au strict nécessaire les incursions dans le "triangle des Bermudes" et les vols correspondants ne se firent qu'avec une vigilance accrue sur le fonctionnement de l'anémométrie et après que les pilotes aient répété de multiples fois au simulateur une procédure à appliquer en cas de panne. Grâce à cela, aujourd'hui, 750 kt est ouvert à toute altitude ; depuis, en cas de panne totale anémo la post-combustion reste disponible et il est seulement demandé au pilote de rejoindre le subsonique en palier.

### Qualités de vol

Le système de commandes de vol est numérique 3 chaînes avec secours électrique analogique. Un module de surveillance veille à la cohérence du comportement de l'avion et ferait commuter du numérique vers l'analogique au cas où une évolution anormale de l'avion serait détectée. Cette architecture a déjà été éprouvée sur le RAFALE A de même que la méthode de validation du logiciel qui inclut un cycle final de plusieurs centaines d'heures en boucle fermée au Banc de Simulation Global.

Le travail des essais en vol consiste pour une part importante à recalibrer en vol les modèles

aérodynamiques afin d'optimiser les réglages des commandes de vol. Pour cela, on dispose à bord de l'avion d'un boîtier (Boîtier Programme Multifonction BPM) qui, via les gouvernes, génère des stimuli. L'enregistrement des réactions de l'avion à ces sollicitations permet de restituer les coefficients aérodynamiques. Le volume d'essai nécessaire pour assurer ce recalage fut dans l'ordre de grandeur prévu et l'ampleur des corrections en accord avec la confiance que l'on accordait aux modèles : le subsonique et le supersonique étaient parfaitement modélisés ; le transsonique nécessita de nombreuses mesures, ce d'autant plus que les contraintes de l'anémométrie actuelle - pas de perchette de nez, mesures brutes dépendant de multiples paramètres - ne facilitent pas la tâche.

Parallèlement à ce travail très méthodique, les essais en vol ont pour but de vérifier que les performances requises (incidence, facteur de charge maximum, taux de roulis ...) sont atteints, que l'avion est bien protégé contre toute surcharge structurale et toute perte de contrôle, que le pilotage de base permet au pilote de faire évoluer l'avion selon son gré et sans y consacrer une attention excessive, que les modes de pilotage automatique permettent de le décharger totalement du souci de conduite de l'avion.

Dans l'ensemble de ce travail, le processus utilisé nous a semblé bien maîtrisé :

- les essais en vol se sont situés dans la stricte continuité du travail réalisé en commun par les équipes de définition et les équipes d'essais sur le simulateur global. Nous n'avons donc jamais été étonnés par ce que nous trouvions en vol ; nous ne faisons que travailler avec un simulateur plus représentatif que lors de l'étape précédente,
- l'architecture s'est avérée robuste et la qualité du logiciel n'a jamais été mise en défaut. Le module de surveillance nous a fait automatiquement passer en analogique à 4 reprises mais à chaque fois parce que les seuils de surveillance étaient trop étroits par rapport au comportement réel de l'avion. Depuis plus de 3 ans, aucun déclenchement du module de surveillance n'est intervenu et, dans l'avion de série, nous pourrions assurer qu'il n'en existera pas,
- nous mettons en vol, ce mois-ci, la version 4 du système de commande de vol. Cette version dite "de série" permet de voler dans l'ensemble du domaine, avec les performances exigées et

dans toutes les configurations d'emports que nous avons identifiées. Les évolutions par rapport à la version précédente, en vol depuis 1 an, en sont peu nombreuses dans la mesure où tant les modes de base que les modes automatiques sont actuellement jugés d'une excellente qualité.

Avoir des lois de commandes de vol bien optimisées pour protéger la structure, obtenir les facteurs de charge, incidences, taux de roulis requis et assurer le pilote qu'il ne risque pas de perte de contrôle quelle que soit la manoeuvre apparaît donc comme issue logique de la méthode de travail. Les critères qu'il faut satisfaire pour que le pilote "sente bien" son avion sont moins rigoureux.



A cet égard, 2 thèmes de mise au point furent plus difficiles qu'on ne s'y attendait : le mini-manche latéral et le mode automatique de tenue de vitesse train sorti. Dans les 2 cas, les sensations pilotes sont essentielles et les simulateurs, malgré tous les raffinements qu'on y a intégrés, ne permettent pas d'y finaliser les réglages.

Dans les phases classiques du pilotage (autour du neutre, sur la butée) le mini-manche latéral fut initialement apprécié mais au fur et à mesure que les pilotes se succédèrent, que l'avion fut essayé dans des conditions plus opérationnelles - vol en formation, ravitaillement en vol -, il fut évident que la précision des commandes n'était pas au niveau

requis. Par le BPM, nous nous donnâmes la capacité d'essayer en vol de nouveaux Amédées (lois de commandes non linéaires), de nouveaux filtrages de la commande mais il fut rapidement déterminé que des modifications mécaniques du manche s'imposaient, en particulier pour obtenir une homogénéité de comportement sur le roulis et le tangage ; par de simples modifications de logiciel, toute amélioration sur un axe avait pour contrepartie de rendre l'autre axe trop sensible. Une augmentation de 44% du débattement manche à cabrer - ce qui ne fait jamais que 3.5 mm en plus - et de nouvelles lois d'effort en profondeur et gauchissement permirent d'aboutir à un "bon manche" qui devint excellent lorsque des raffinements tels que des filtres à avance de phase furent implantés dans le logiciel. La leçon à en tirer restera toutefois qu'il convient dès le début du développement de se donner la possibilité dans le logiciel d'essayer en vol de multiples lois, temporisations mais que, de la même façon une palette d'aménagements mécaniques doit être disponible. Initialement, se doter de ces capacités paraît toujours une politique chère et source de nombreux vol, d'avis pilotes multiples et difficiles à synthétiser.

Dans les faits il s'avère que seul le vol permettra la mise au point et que l'impératif d'excellence dans le domaine de la pilotabilité imposera bon gré mal gré la mise en oeuvre des moyens précédents.

Le mode "couplage manette train sorti" a pour objectif de tenir précisément la vitesse en approche afin, en particulier, de minimiser la dispersion de vitesse d'entrée brin sur porte-avions. Dès sa première version, ce mode s'avéra très efficace avec une tenue à  $\pm 2$ kt dans des conditions représentatives d'emploi sur porte-avions. Les pilotes les plus enthousiastes utilisèrent donc ce mode systématiquement et sans état d'âme. Toutefois arrivèrent sur le programme de nouveaux pilotes moins confiants dans les capacités des asservissements numériques et qui regrettèrent de ne pas retrouver sur RAFALE les sensations qu'ils avaient sur les avions de la génération précédente : en pilotage manuel, leur tendance aurait été de commander aux moteurs des réactions plus vives et de moindre amplitude ; en conséquence la vigilance qu'ils devaient maintenir sur la vitesse faisait perdre une partie de l'intérêt de ce mode automatique. Toujours grâce au BPM, on se donna le choix de plusieurs types de réglages du mode (constante de temps, gain d'asservissement) et l'optimum fut déterminé en vol : la performance

s'en trouva légèrement dégradée avec une tenue à  $\pm 3$  kt mais les réactions de l'avion apparurent plus

naturelles et satisfaisantes pour tous. Comme précédemment la leçon à en tirer est que, sur tout mode pour lequel la performance n'est pas le seul critère tandis que la sensation pilote est un paramètre important, il convient de se donner, dans le logiciel, le choix de divers réglages à essayer en vol.

## Spécificités Marine

Finalisée en 1990, la logique de développement des essais Marine faisait apparaître 4 campagnes sur base à terre et 3 campagnes sur porte-avions pour qualifier l'avion dans l'état du 1er standard. L'enchaînement des essais était le suivant :

- une campagne sur bases à terre - Lakehurst et Patuxent River - en configuration de base (2 Magic) pour identifier le comportement de l'avion au catapultage et à l'appontage,
- une deuxième campagne quelques mois plus tard dans la même configuration afin de valider les corrections des faiblesses éventuellement mises en évidence durant la 1ère campagne,
- une première campagne sur porte-avions Foch,
- une deuxième campagne sur Foch avec 2 avions dont un équipé de radar et de contre-mesures,
- une campagne d'essais sur base à terre pour catapulter et apponter un avion équipé des charges du 1er standard : réservoirs largables et missiles air-air,
- une campagne sur porte-avions dans les configurations du 1er standard,
- une campagne "charges lourdes" sur base à terre destinée à catapulter et apponter dans les conditions extrêmes de masse, centrage, chargement de chaque point d'emport, dissymétrie afin de valider la structure de l'avion avant passage en série.



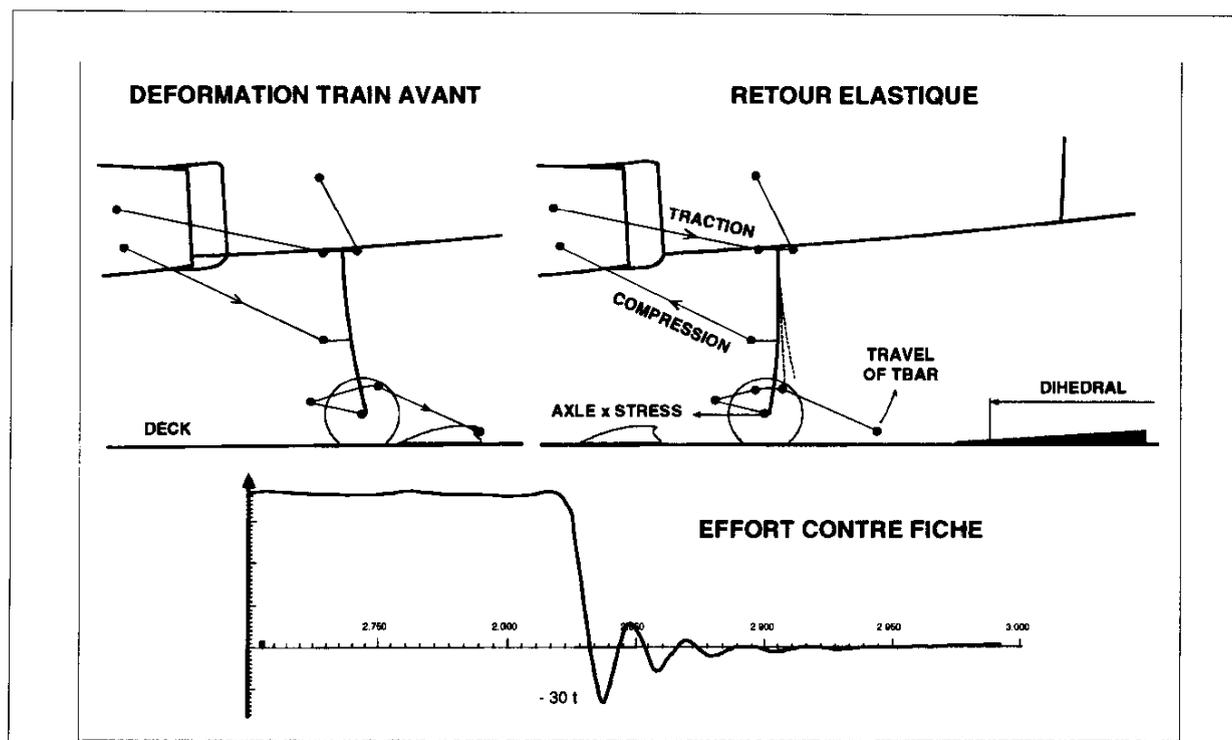
A l'époque, les points durs que nous imaginions concernaient principalement :

- la mise au point du mode automatique des commandes de vol qui assure la mise en vol au catapultage - Plusieurs éléments concouraient à cette inquiétude : la mise en vol en bout de pont nécessite sur un delta une prise d'incidence énergétique - pour avoir rapidement de la portance - et bien maîtrisée pour ne pas excéder une incidence au-delà de laquelle la traînée serait trop élevée ; l'utilisation d'un dièdre ou d'un dispositif de restitution d'énergie du train pour obtenir une prise d'assiette rapide étaient aussi des nouveautés à défricher,
- les risques de désorientation spatiale au catapultage. Pour la 1ère fois sur un avion embarqué, le pilote est dans un siège incliné de 29°, soumis à une forte accélération (5.5 g) immédiatement suivie d'une vitesse de tangage importante (30°/s). Le risque que le pilote en soit perturbé apparaissait réel.
- le vérin de crosse dont le réglage risquait d'être pointu vu la forme du fuselage arrière et l'assiette de l'avion à l'appontage.

En revanche, les problèmes de tenue structurale ne nous apparaissaient pas comme particulièrement difficiles tant les méthodes (modélisation ELFINI, mesures sur avion, recalage de modèle) que nous utilisons quotidiennement sont fiables et maîtrisées.

Le 10 juillet 1992, 7 mois après son 1er vol le RAFALE M01 était sur la catapulte TC13-2 de Lakehurst pour y débiter une progression qui, en 4 essais, devait permettre d'atteindre 3 g d'accélération (soit environ 45 tonnes de traction catapulte). Nous avons ensuite prévu une longue série d'essais destinés à vérifier l'efficacité du dièdre et celle du train à restitution d'énergie ; puis nous progresserions lentement en vitesse de tangage et incidence en sortie de catapulte. Ensuite nous reprendrions la progression en accélération jusqu'à démontrer 5.5 g.

Le désenchantement fut rapide : dès le 1er catapultage, nous mesurâmes des efforts nettement plus importants que prévus dans le train avant ; ralentissant le rythme de progression nous enregistrâmes dès les 1ers essais, des accélérations au niveau du train avant bien supérieures à l'étendue de mesure garantie des capteurs. Divers éléments - biellettes, ressorts - s'avéraient sous dimensionnés. Nous avons largement sous-estimé les chocs qu'induisent les variations d'effort



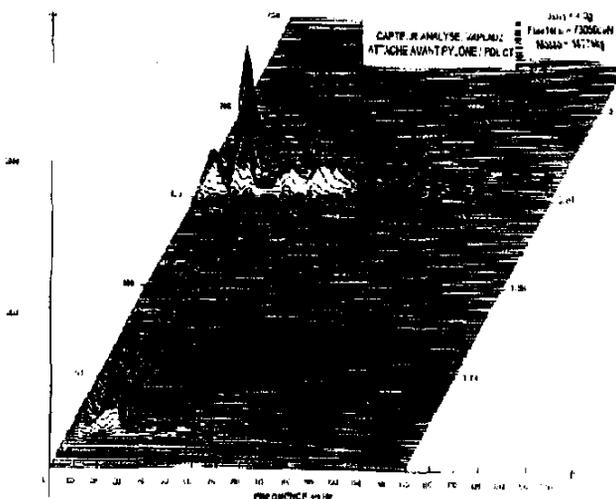
### CHOC AU CATAPULTAGE

rapides - jusqu'à 90 tonnes en 10 ms - inhérentes au catapultage en tirant directement l'avion par le train (et non au travers d'élingues).

Divers bricolages opérés sur place nous permirent d'accélérer l'avion jusqu'à 3.2 g mais il faudrait attendre d'avoir sensiblement modifié le train avant pour reprendre la progression en accélération longitudinale. Sur les autres aspects en revanche, on constata que tremplin et train à restitution d'énergie avaient les effets attendus ; nos spécialistes de commandes de vol ne nous déçurent pas non plus : la concordance entre le comportement au simulateur global et l'avion en sortie de catapulte était totale.

L'avion n'était pas revenu des Etats-Unis que déjà, 3 actions d'envergure étaient lancées :

- la première consistait en diverses modifications du train avant allant du renforcement d'éléments existants à l'adjonction de nouveaux dispositifs,
- une modélisation était mise en place pour simuler les chocs d'un catapultage et justifier la nouvelle définition du train avant,
- un nouveau moyen d'essai était développé au Centre d'Essais Aéronautique de Toulouse afin de soumettre un train avant à des chocs de l'ampleur et de la brutalité rencontrées sur catapulte.



#### ANALYSE FREQUENTIELLE DU CHOC

La mobilisation des équipes fut exemplaire et 4 mois plus tard, le RAFALE M01 avec un train avant tout neuf était à nouveau sur la catapulte

TC13-2. La progression put reprendre et on démontra rapidement 5.5g d'accélération ce qui permet :

- de qualifier tous les équipements de l'avion,
- de justifier la structure,
- de confirmer toutes les modélisations "commandes de vol",
- de se rassurer sur l'aptitude d'un pilote à supporter le profil particulier du catapultage de RAFALE : ce que nous confirmeraient plus tard des catapultages de nuit sur porte-avions, non seulement le pilote n'est pas désorienté mais l'installation en cabine, la clarté des figurations et la netteté avec laquelle l'avion est mis en l'air par les commandes de vol concourent à mettre le pilote dans des conditions de lucidité sans précédent.

L'appontage fut essayé avec moins de surprises : le vérin de crosse nécessita plusieurs évolutions pour que nous optimisions son fonctionnement vis à vis des efforts transmis au fuselage et de la garde crosse/fuselage (l'amélioration de l'un pouvant impliquer une détérioration de l'autre). Ce travail était néanmoins prévu et la nécessité d'itérer ne nous étonna pas.

A partir de cette 2ème campagne d'essais sur base à terre, le déroulement de la mise au point se fit donc conformément à l'enchaînement prévu et de cette façon, somme toute, assez exemplaire.

Le 19 avril 1993, le RAFALE M01, piloté par Y. KERHERVE, appontait sur le Foch. Cette 1ère campagne en mer dura 2 semaines et demi pendant lesquelles 31 vols furent réalisés depuis le porte-avions.

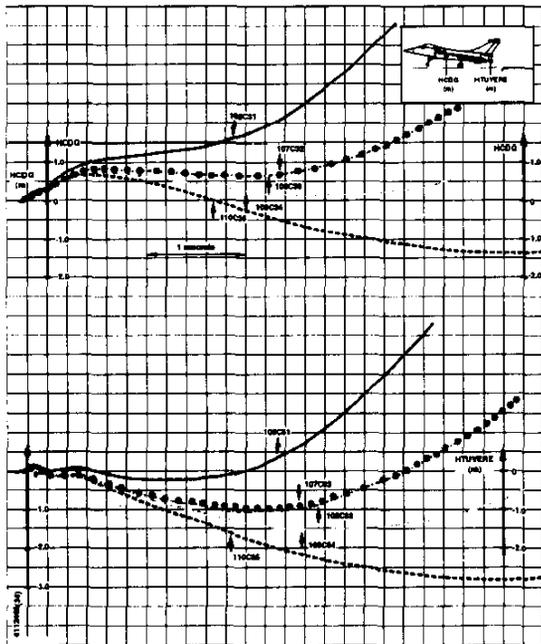
On catapulta plein complet à plus de 5g ; des appontages dans diverses conditions de masse, pente et réglage de frein porte-avions furent réalisés ; les premières opérations de mise en oeuvre et de maintenance sur porte-avions permirent de vérifier la compatibilité d'un RAFALE et d'un porte-avions.

Depuis, les campagnes suivantes - 2 aux USA et 3 sur porte-avions - se sont déroulées sans rencontrer de sérieuse difficulté et à un rythme élevé. Les méthodes mises en oeuvre, y compris celles développées rapidement suite à la 1ère campagne se sont avérées efficaces. Deux exemples me semblent significatifs de la maîtrise que nous avons acquise dans le domaine des essais Marine :

- la recherche de la VMS (vitesse minimale sûre de catapultage) est habituellement un exercice redouté qui impose une progression lente des essais en vol. Cette recherche fut menée durant la 3ème campagne sur porte-avions dans une configuration avec réservoirs et missiles (ce choix permet en cas de mauvaise surprise de larguer les réservoirs en sortie de catapulte et donc d'améliorer instantanément le bilan énergétique).

En préalable, les 3 pilotes impliqués réalisèrent près de 150 catapultages sur le simulateur pour passer en revue tous les cas de pannes, de dégradation catapulte, de vitesse vent ... dans les conditions où nous prévoyions de faire les essais.

Les essais sur avion quant à eux ne prirent qu'une journée : en 5 catapultages, on diminua la vitesse de catapultage de 10 kt ; la hauteur par rapport au pont du centre gravité avion 3 secondes après la sortie de catapulte passa de + 3 m à - 1.5 m ; l'objectif était atteint, le plus difficile - vu les conditions de vent du jour - avait assurément été de gouverner le bateau lors du dernier essai avec 1 kt d'aire (merci Commandant).

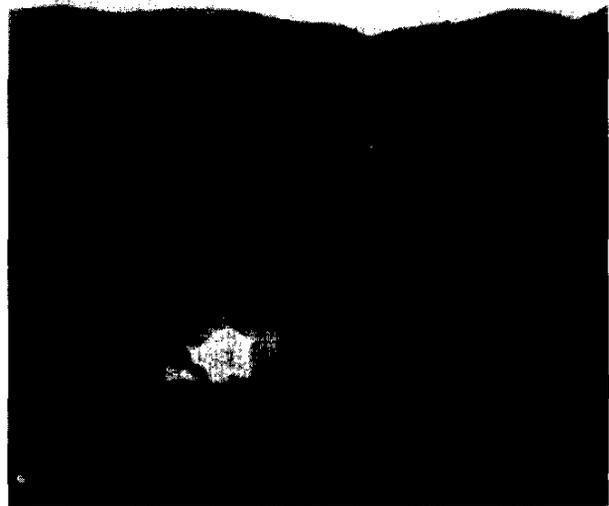


#### ENFONCEMENT EN SORTIE DE PONT

- Lors de la dernière campagne d'essais sur base à terre avec charges très lourdes, importantes dissymétries, centrages extrêmes, le rythme d'essai a battu des records : en 6 semaines nous avons réalisé 57 catapultages et 122 arrêts brin.

En synthèse, la 1ère campagne d'essais sur base à terre fut très différente de ce que nous avions prévu. En contrepartie, les problèmes rencontrés nous ont permis de renforcer notre capacité à modéliser des phénomènes dynamiques. Par la suite, on recolla à la logique de développement prévue avec des résultats satisfaisants et une efficacité meilleure qu'espérée, ce qui nous a permis d'économiser quelques mois d'essais.

Réussir des "premières" est toujours très gratifiant pour des ingénieurs : la démonstration de l'efficacité au catapultage de dispositifs tels que le dièdre et le train à restitution d'énergie sont à classer dans cette rubrique. Faire tomber des tabous n'est pas moins agréable : au début des essais de compatibilité à la mer, des spécialistes



nous affirmèrent qu'un avion à manche latéral était inapte au catapultage. La dizaine de pilote ayant été catapultés sur RAFALE peut heureusement infirmer aujourd'hui cet axiome. Loin d'ironiser, cela doit nous inciter à un certain recul vis à vis des idées toute faites.

#### Systèmes généraux

Par rapport au Mirage 2000, voire même au démonstrateur RAFALE A, les prototypes RAFALE possèdent de nombreuses nouveautés parmi lesquelles :

- des générations hydrauliques 350 bars,
- des générations électriques à fréquence variable,
- une génération d'oxygène autonome (OBOGS),

- un fonctionnement "tout numérique" avec une intégration des systèmes généraux au système global.

Afin de prendre en compte ces évolutions, les moyens de développement ont été adaptés :

- mise au point de l'OBOGS en vol sur avion de servitude avant d'équiper le RAFALE,
- intégration de tous les calculateurs des systèmes généraux sur banc global au même titre que le système d'armes,
- fabrication de stations mobiles couplables à l'avion pour observer et stimuler les systèmes généraux in situ.

En revanche, les impératifs économiques ont conduit à sacrifier sur l'autel des coûts certaines étapes du processus de mise au point avant intégration finale sur RAFALE. Ce choix fut délibéré et ne porta que sur des sujets qui apparaissaient sans risques sur la base de l'expérience Mirage 2000 et RAFALE A.

Aujourd'hui, la mise au point des systèmes généraux est terminée ; les logiciels "de série" des calculateurs sont en cours d'identification au banc d'intégration avant passage sur avion pour un contrôle final. Ces systèmes fonctionnent comme spécifiés et avec des performances conformes aux exigences des utilisateurs.

Il n'en reste pas moins que, pour certains systèmes, la mise au point sur avion s'est faite de façon optimale tandis que pour d'autres, la progression était laborieuse. Au tableau d'honneur des systèmes, je placerais volontiers l'OBOGS, la génération électrique et le système carburant dont la fiabilité ont été exemplaires tout au long des essais et qui n'ont nécessité que de minimes réglages. Ce n'est pas un hasard : le processus de spécification et de mise au point amont en ont été sans faille.

A contrario, nous avons eu des soucis sur avion avec les éléments sur lesquels nous avons procédé à des "impasses". Notre mauvaise surprise initiale sur la génération hydraulique en est caractéristique : les pompes hydrauliques 350 bars ont été développés chez l'équipementier et livrés directement sur le RAFALE C01 avant ses premiers points fixes. Aucun essai de pompe couplée à un circuit hydraulique représentatif de l'avion n'avait été réalisé.

Aussi, dès le 1er point fixe du C01, nous cassâmes une tuyauterie aval pompe en fatigue : la pompe, excellente à fort régime d'entraînement, générait en revanche un niveau de pulsation très élevé dès qu'elle fonctionnait à faible régime. Deux actions simultanées furent immédiatement entreprises :

- modifier la régulation de la pompe,
- développer un "banc d'intégration hydraulique haute pression" destiné à valider, y compris en endurance, la pompe modifiée et les tuyauteries aval.

Un mois plus tard, les essais sur avion pouvaient reprendre dans de bonnes conditions mais cet exemple doit être remémoré chaque fois qu'une étape d'un processus que l'on sait fiable est supprimée.

L'autre souvenir que l'on gardera de la mise au point des systèmes généraux de l'avion est le temps trop important que l'on met pour avoir un système bien fini. En effet, les essais au banc d'intégration puis sur avion mettent rapidement en évidence les évolutions que l'on désire. Mais dans le cas de systèmes totalement intégrés les uns aux autres, on s'interdit, à la fois pour des raisons d'analyse de sécurité et pour des motifs économiques, de les faire évoluer autrement que par étapes de développement. Il en résulte que des mois peuvent se passer entre le moment où une évolution simple est demandée et celui où le nouveau logiciel l'intègre. A ce rythme, certaines mises au point - le réglage d'une loi de Dirav par exemple - paraissent n'avancer qu'à trop faible allure. Une mise au point rapide me paraît exiger que, tout comme nous l'avons fait sur les commandes de vol, les logiciels de calculateurs des systèmes généraux incluent dès l'origine divers choix de logiques, divers choix de lois, divers choix de constante que le pilote peut activer pour optimiser le réglage.

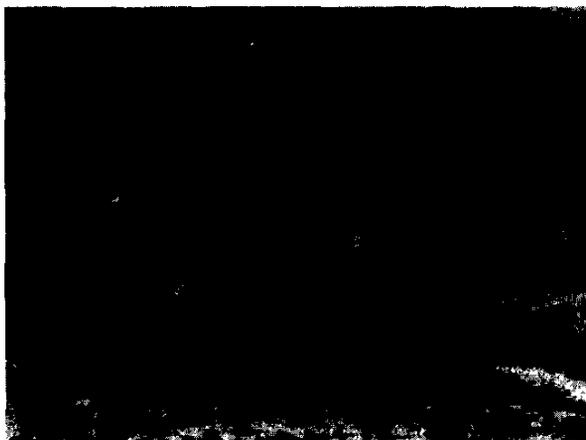
Cette capacité est en particulier essentielle pour tous les réglages sur lesquels le pilote a un avis et qui, suivant un processus itératif nécessitent un temps excessif de mise au point.

## **Emport - Séparations**

Dans nos prévisions initiales, 2 éléments ont concouru à nous faire minimiser le temps consacré aux essais d'emport et de séparation :

- sur Mirage 2000, nous avons atteint un excellent niveau de corrélation entre la modélisation et le comportement de l'avion sur tous les chapitres concernés par les essais

d'emport : flutter, efforts structuraux, qualités de vol, couplages structure/commandes de vol. En conséquence, les vols d'ouverture de domaine avec charges se font avec une progression rapide en vitesse et en Mach. De plus, pour une configuration de charges, peu de sous-configurations nécessitent d'être testées en vol,



- concernant l'ouverture des domaines de séparation, de nouvelles méthodes ont été élaborées, basées plus que par le passé sur la modélisation des interactions aérodynamiques et nécessitant moins d'essais en vraie grandeur.

Aujourd'hui, les domaines de vol des configurations et sous-configurations du 1er standard sont ouvertes. Pour les charges les plus lourdes (Apache, réservoirs de 2000 l), les domaines ont aussi été ouverts. Nous avons ainsi pû, avant le lancement en série, conforter la définition de l'avion, notamment de sa structure et ses commandes de vol.

Ce travail a toutefois nécessité plus d'essais que prévu et des actions ont été lancées pour améliorer la modélisation des modes souples de l'avion. Pour l'avenir, nous restons sur nos prévisions initiales de volume d'essais d'emport.

Les essais de séparation des charges du 1er standard sont soit terminés (Magic, réservoir pendulaire de fuselage) soit en cours (Mica, réservoirs pendulaires de voilure). Jusqu'ici les essais se sont déroulés selon la progression prévue et dans les temps impartis.

## Système de navigation et d'armements

Plus les systèmes sont complexes et ambitieux et moindre doit être le poids relatif des essais en vol d'intégration et de mise au point des fonctions dans le processus de développement. L'amélioration constante de la phase de spécification, l'utilisation de simulations pilotées de très grande représentativité et la mise au point amont des équipements majeurs ont pour but de :

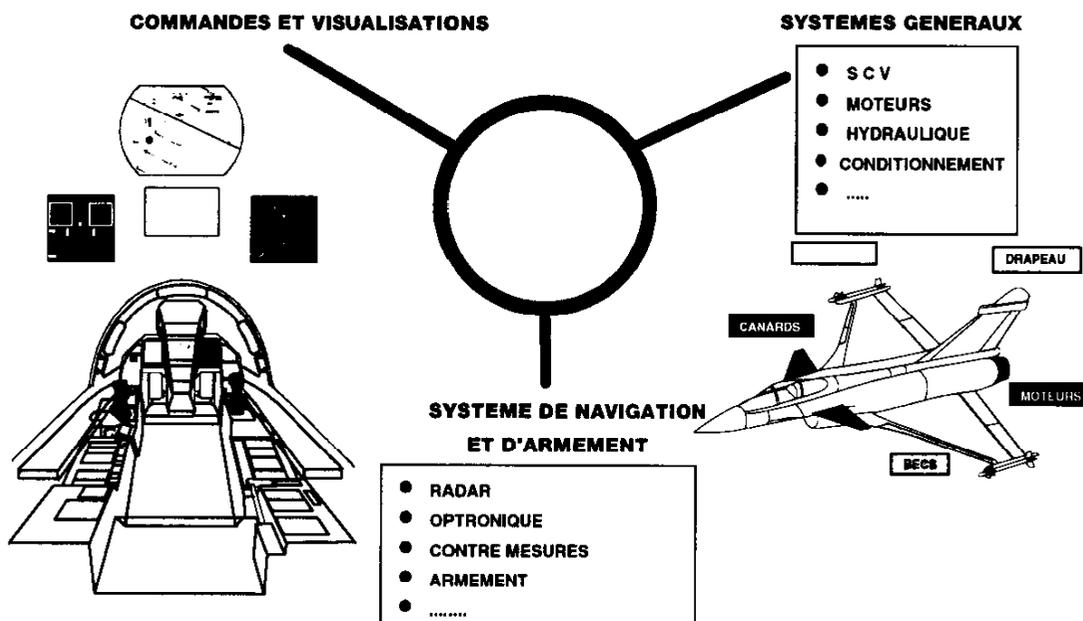
- limiter les vols sur prototypes,
- minimiser les risques de voir ces vols remettre en question les choix faits plus amont.

La "relégation" des équipes d'essais à ce rôle de contrôleur des travaux bien faits ou à un rôle encore plus ingrat de porteur de la mauvaise nouvelle ("le résultat est mauvais, veuillez reprendre votre copie") serait rapidement démotivante si un transfert ne s'était pas opéré : les pilotes et ingénieurs d'essais prennent une part active à la spécification initiale et à sa validation sur simulateur. L'expertise des équipes d'essais est donc mise à profit, en ingénierie concourante, tôt dans le programme avant que les remises en question n'aient des conséquences budgétaires notables.

Le processus de développement du RAFALE s'est établi sur ces règles dès le départ. En conséquence, le volume des vols prévu pour la mise au point système est resté modeste comparé à l'ambition du système développé.

Actuellement, vole un système comprenant toutes les fonctions du 1er standard. Dans quelques mois, ce système sera mis entre les mains de pilotes opérationnels pour une évaluation dont l'objectif est de figer un état de référence pour les avions produits dans le 1er standard. Dès aujourd'hui un nombre important d'éléments parait acquis :



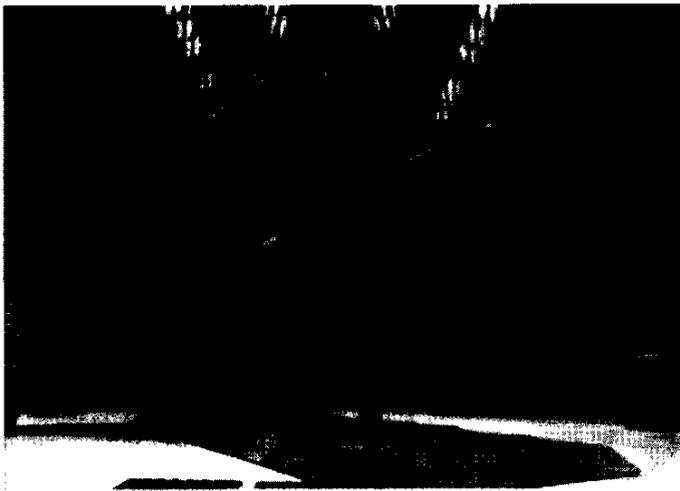


- la définition cabine est satisfaisante. Centrée sur un viseur tête haute holographique large champ, une visualisation tête moyenne synthétisant l'ensemble de la situation tactique, 2 visualisations latérales à écrans tactiles, des commandes sur manche et manette et une automatisation poussée d'un concept résolument anti "boutons poussoirs" (le pilote n'actionne qu'une commande pour mettre en route tous les systèmes de l'avion), la cabine n'a subi, entre le 1er vol et aujourd'hui, que des évolutions marginales. Ces dernières ont été motivées par le progrès de certaines technologies : les instruments secours à cristaux liquides noirs et blancs faisaient pâle figure comparés aux visualisations couleur ; devenu possible, le passage en couleur fut décidé,
- la gestion des échanges numériques entre tous les équipements se fait correctement,
- la localisation multi-capteurs avec hybridation, les modes navigation et approche sont au point,
- les communications ont été testées,
- les modes air-air d'auto-défense ont été essayés; le tir de qualification Magic sur cible a été réussi,
- l'interception multicible Mica a fait l'objet d'essais avec tir réussi d'un Mica sur cible. D'autres tirs sont prévus sur l'avion biplace dans les prochains mois,
- le vol automatique à Très Basse Altitude a été essayé en début d'année. Quoique seule l'option "TBA mer" fasse partie du 1er standard, les logiciels lors des essais permettaient d'activer le suivi de terrain automatique au dessus du relief. Les essais réalisés ont permis, non seulement de vérifier les concepts de suivi de terrain sur RAFALE (élaboration de trajectoires par un calculateur dédié et asservissement réalisé par les commandes de vol), mais aussi d'en vérifier la superposition à des modes air-air afin de valider des choix importants dans le domaine de l'Interface Homme Système,
- le radar est utilisé dans les modes air-air sur prototype RAFALE. Parallèlement des essais de mise au point du mode Très Basse Altitude (détection sol) sont menés sur avion banc d'essai pour l'utilisation qu'en sera faite dans le 2ème standard opérationnel,
- la mise au point contre-mesures est en cours sur le RAFALE M02. Le système SPECTRA qui est totalement intégré à l'avion réalise de la

détection (électro-magnétique, infra-rouge et laser), du brouillage et du leurrage. Dans l'année qui vient, plus de la moitié de l'activité du RAFALE M02 sera consacrée à la mise au point et à l'intégration de SPECTRA sur RAFALE en plus du travail mené sur les moyens spécifiques.

A ce niveau de la mise au point, trois constatations peuvent être faites :

- les essais en vol ont confirmé la majorité des grandes options autour desquelles s'architecture le système d'armes du RAFALE,
- le processus de développement est efficace ; les vols sur avion bancs d'essai, les essais en chambre sourde ou au banc d'intégration constituent des filtres adéquats ; nous ne rencontrons que très rarement en vol des anomalies qui auraient dû être détectées en amont,
- la mise au point du système se fait suivant des étapes de développement qui, pour chacune, ajoutent de nouvelles fonctions. Or, les critiques de définition qui sont faites en vol sont pour une très large majorité cohérentes avec les critiques qui ont été faites plus tôt dans le processus, au moment de l'évaluation sur simulateur et qui, pour des raisons calendaires se sont prises en compte qu'à l'étape de développement suivante.



L'ensemble de ces éléments est donc rassurant quant au processus de développement mis en

place. Il fait militer dans le sens de limiter le nombre d'étapes de développement au profit d'une phase de spécification plus longue et confortée par des simulations de plus en plus réalistes.

## Conclusion

Après 5 ans de vol, la comparaison entre nos prévisions de 1990 et l'activité réelle des 4 prototypes ne met pas en évidence de dissonance. A contrario, le développement apparaît souvent très conforme à nos espérances initiales. Seul un étalement budgétaire provoque depuis quelques mois, et provoquera dans les prochains, un décalage important des objectifs calendaires.

Un ralentissement du développement est nécessaire pour que ne se crée pas un trou d'activité. Nous nous employons donc actuellement à re-planifier l'activité d'essai en veillant à assurer la continuité des compétences. Depuis le début du programme, l'enthousiasme des équipes a été un important moteur contribuant à la qualité du travail effectué. "Haut les coeurs" était dès l'origine le mot d'ordre de notre Directeur Technique RAFALE lorsqu'une difficulté apparaissait.

Maintenir enthousiasme, mobilisation et motivation qui sont garants de réussite apparaît donc comme la principale priorité afin de donner au RAFALE l'avenir que ses premières années de vie lui font mériter.

## RAFALE

### Le rôle actif de l'Etat dans les essais en vol

*Marc TOURTOULON*

*Responsable de l'équipe intégrée des essais en vol RAFALE  
Centre d'Essais en Vol*

L'ambition technique et financière affichée par le programme de l'avion RAFALE, vue au travers des yeux des managers chargés de mettre en place les organisations capables de mener à terme ce projet, ne laissait guère d'espoir aux différentes chapelles qui pouvaient exister çà et là : dialogue et partage devaient être les deux maîtres mots du programme.

L'époque où l'industriel réalisait le produit que le client avait spécifié et que ce dernier évaluait après plusieurs années de développement était définitivement révolue. Les conséquences sur un programme de problèmes découverts seulement en fin de développement (i. e. lors de l'évaluation finale) sont telles qu'elles condamnaient à elles seules les méthodes précédentes. Tous les moyens permettant de raccourcir les délais entre la spécification et l'évaluation étaient recherchés et systématiquement mis en avant. Il fallait améliorer le dialogue entre les utilisateurs et les concepteurs afin d'adapter le plus rapidement possible le produit au besoin, tout en garantissant une parfaite maîtrise à long terme des objectifs techniques, calendaires et financiers du programme. Les difficultés majeures devaient être identifiées et traitées le plus en amont possible tout en évitant surtout de piétiner sur des détails de moindre importance.

Un autre axe d'économies substantielles consistait à éviter la duplication des essais et des moyens mis à disposition du programme. Certains essais sont en effet effectués une première fois par l'industriel dans le cadre normal du développement, une seconde fois par le client pour vérifier les clauses d'acceptation contractuelles, et éventuellement une troisième fois par les utilisateurs lors des évaluations opérationnelles. Indépendamment de la responsabilité des essais qui reste dans ses grandes lignes conforme à la répartition classique entre l'industrie et l'état, un partage de l'exécution des essais devait être recherché.

### EQUIPE INTEGREE

Découlant d'une réelle volonté d'application des principes précédents aux essais en vol du RAFALE, l'équipe intégrée Etat/Industrie a été mise en place dès le début du programme. Un des principaux objectifs chiffrés de cette organisation était de réduire environ de moitié par rapport aux programmes précédents les essais étatiques de vérification de conformité. Ainsi, seulement 5% de l'emploi du temps des prototypes Rafale devaient être consacrés aux tâches étatiques. En tenant compte des hypothèses retenues concernant les cadences de vol (7 à 10 vols par mois en développement et 1 vol par jour en évaluation), on obtenait un total de 15% des vols consacrés aux constats techniques et évaluations opérationnelles.

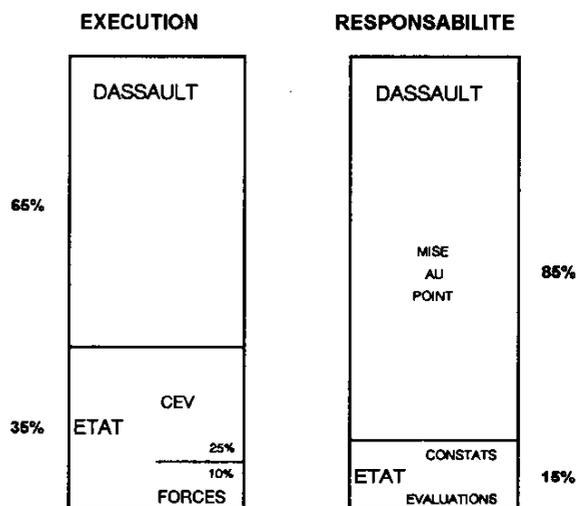


Fig. 1 : Répartition prévisionnelle des vols

Afin d'éviter la répétition des points d'essais en évaluation, une participation étatique aux essais en vol de développement placés sous la responsabilité de Dassault Aviation était convenue. Des équipes d'essais du Centre d'Essais en Vol

(CEV), mais également des pilotes d'essais et spécialistes de l'Armée de l'Air (CEAM) et de la Marine Nationale (CEPA) constituait l'Equipe Intégrée Partie Etat (EIPÉ) qui avait à charge d'exécuter 15% des vols d'essais des prototypes Rafale ; cette part s'élevait même à 30% pour l'exécution des vols de mise au point du système d'armes.

Evitant une duplication coûteuse des vols, cette participation importante de l'Etat aux essais industriels permettait également d'obtenir très tôt dans les développements des avis consolidés des utilisateurs opérationnels sur les différents sous-systèmes, laissant ainsi plus de temps pour la réalisation d'éventuelles adaptations. Les souhaits initiaux d'amélioration du dialogue étaient ainsi également promus par ce travail en équipe intégrée.

Dans le même but d'améliorer l'efficacité, les équipes de Dassault Aviation se voyaient offrir une participation aux essais en vol réalisés par le CEV. Ceux-ci permettaient au responsable du développement du système d'appréhender le fonctionnement réel des équipements, et ce bien plus tôt et surtout bien mieux que ce qu'il pouvait le faire auparavant où il ne connaissait le comportement des équipements qu'au travers de modèles informatiques prévisionnels sommaires.

**RETOUR D'EXPERIENCE**

Après cinq années de fonctionnement de l'équipe intégrée des essais en vol Rafale, les résultats obtenus sont plutôt flatteurs. Les participations réciproques Etat/Industrie aux essais ont été parfaitement respectées sans induire aucune ingérence qui aurait été préjudiciable à la bonne entente nécessaire.

La bonne application au cours du développement du partage des vols a été rapidement considérée comme un indicateur du bon fonctionnement de l'équipe intégrée. Le constat que l'on peut dresser à ce point du programme est tout à fait révélateur du bien fondé des répartitions initialement choisies.

Les équipes étatiques ont réalisé plus de 400 vols d'essais sur les prototypes Rafale et seulement une centaine de vols d'évaluation. Si on tient compte des évaluations au sol de la mise en oeuvre et de la maintenance, c'est environ 3.5% de

la durée calendaire d'utilisation des prototypes Rafale qui auront été consacrés aux épreuves de vérification. L'objectif initial de 5% est largement atteint.

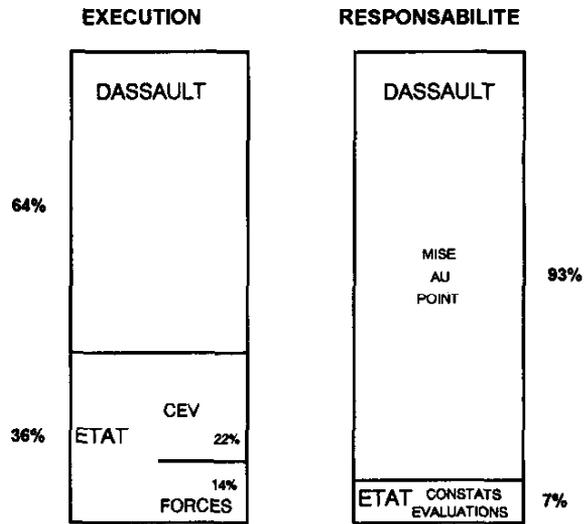


Fig. 2 : Répartition effective des vols

Dans le domaine restreint des vols dits de "spécificités marine" (catapultages, appontages et prises de brins) une répartition particulière des vols fut convenue. Etant jugé non raisonnable d'écarter à priori une des trois entités concernées par ces essais, le partage retenu a été de 45% pour Dassault Aviation, 35% pour le CEV et 20% pour la CEPA. Cette répartition des vols de spécificités marine assurait aux pilotes de maintenir l'entraînement leur permettant d'exécuter les essais avec toutes les garanties de sécurité souhaitées. On en arrivait ainsi au paradoxe suivant où les deux pilotes de l'Etat (CEV et CEPA) exécutaient plus de la moitié des vols sur des campagnes pourtant sous la responsabilité de Dassault Aviation ! Quelle meilleure preuve peut-on trouver de la bonne intelligence dans laquelle ces principes de partage ont été appliqués ?

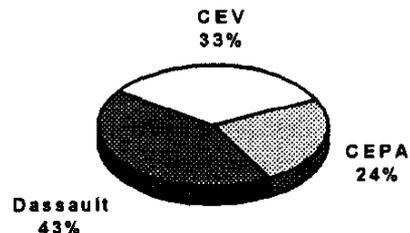


Fig. 3 : Partage des vols "spécificités marine"

## AVIONS DE SERVITUDE

La contribution des avions de servitude au développement du système d'armes du Rafale est multiple mais somme toute assez classique :

- ① mise au point initiale des équipements basiques (centrale à inertie, radioaltimètre, postes de radio, ...),
- ② développement des équipements majeurs tels que le radar RBE2, le système de contre-mesures SPECTRA ou encore l'optronique secteur frontal,
- ③ mise au point de fonctions mettant en jeu plusieurs équipements comme par exemple la fusion des pistes issues des différents capteurs,
- ④ étude et développement de nouveaux équipements pouvant équiper le Rafale dans ses standards ultérieurs (viseur de casque, commande vocale, ...).

En France, c'est le CEV qui est chargé d'exécuter tous ces essais en vol au profit des équipementiers (seuls les avionneurs et motoristes réalisent eux-mêmes leurs essais en vol). Au titre de l'équipe intégrée, Dassault Aviation participe à ces vols (hormis pour les équipements basiques qui sont sans réel risque vis à vis du développement du SNA). Cette participation permet ainsi une anticipation évidente sur la réalisation des tâches d'intégration de ces équipements au SNA.

Pour les essais de types 1 et 4, les vols sont réalisés sur des avions de servitude non dédiés au programme (Mirage III, Alpha-Jet, CASA 212). Les essais de type 2 nécessitent, en plus d'une installation d'essais conséquente, une parfaite représentativité des interfaces entre l'équipement et le SNA (bus numériques et messages transmis sont identiques à ceux du Rafale). Les avions utilisés pour ces essais (Mystère XX et Mirage 2000) ont été spécifiquement transformés après d'importants chantiers d'adaptation ; ce sont eux que l'on appelle les avions bancs d'essais Rafale (ABE) car ils sont dédiés au programme. Les essais du type 3 sont les plus conséquents vis à vis des avions de servitude car ils nécessitent l'emport de plusieurs gros équipements (radar et OSF par exemple), avec bien sûr toujours la même représentativité au niveau des interfaces, mais avec cette fois-ci également une partie des logiciels de traitement du Rafale. Des compléments de chantier sont alors réalisés sur les ABE et une partie conséquente du SNA du Rafale est implantée à bord de ces avions.

Que ce soit pour les études avec des maquettes fonctionnelles ou plus en aval pour la mise au point initiale des prototypes des équipements Rafale, ces essais sur avion de servitude représentent actuellement environ 1500 vols. Ces vols ont permis une mise au point initiale des équipements très satisfaisante puisque les opérations d'intégration au système et les vols sur les prototypes Rafale qui ont suivi se sont déroulés sans aucun problème pouvant être dû à une immaturité des équipements.

On peut citer quelques uns de ces essais en vol sur les avions de servitude :

- mise au point du radar RBE2 (fonctions Air/Air multicible, combat multicible et vol à très basse altitude) sur Mystère XX et Mirage 2000 et du système de contre-mesures SPECTRA sur Mystère XX,
- qualification de la radiosonde, des postes de radio ou du système OBOGS (on board oxygen generating system),
- essais initiaux du viseur de casque TOPSIGHT,
- ...

Certains de ces essais en vol sont également complétés par des essais au sol en centrifugeuse pour les essais des équipements de protection physiologique du pilote (surpression respiratoire sous facteur de charge) ou encore sur le simulateur Rafale par exemple pour la mise au point des symbologies du TOPSIGHT. Le simulateur piloté du Rafale est par ailleurs fréquemment utilisé en support des essais en vol menés sur les prototypes (préparation/répétition des vols, études de modifications, ...).

## PROLONGEMENTS

Au delà de ce succès déjà exemplaire de l'équipe intégrée, ces années passées à partager au quotidien les problèmes de chacun ont promu une véritable symbiose entre les différents partenaires. Petit à petit, les méthodes de travail et les échanges d'information se sont formalisés et ce bien au delà du strict domaine des essais en vol, en particulier pour tous les sujets touchant à l'utilisation du Rafale par les pilotes.

La participation des pilotes étatiques aux travaux de définition du SNA n'a cessé de grandir

et d'avancer dans le processus de développement, jusqu'à participer à l'élaboration des spécifications avant même leur programmation en simulation. La mise au point des simulations pilotées du système d'armes est également une phase importante du développement du SNA à laquelle Dassault Aviation a associé les pilotes opérationnels. De leur côté, les pilotes Dassault Aviation sont systématiquement invités à participer aux évaluations sur les simulateurs pilotés du CEV, bien évidemment lorsqu'il s'agit de simulations du SNA Rafale, mais également pour toutes les simulations d'étude concernant des équipements ou des fonctions pouvant intéresser ultérieurement le Rafale. Très souvent ces études en simulations sont poursuivies par des essais en vol auxquels participent également les pilotes Dassault Aviation. Ce fut le cas par exemple pour les essais du viseur de casque TOPSIGHT ou du système de commande vocale.

Enfin, un autre aspect du travail en équipe intégrée est illustré par les groupes pilotes. Cette structure consultative a été mise en place pour étudier tous les sujets relevant directement de l'utilisation du Rafale par les pilotes. Chaque fois qu'une question se pose, des pilotes Rafale étatiques et industriels sont choisis pour constituer un groupe chargé d'instruire ce dossier. A l'initiative de l'ingénieur rapporteur du groupe, les pilotes se réunissent et débattent entre eux jusqu'à l'obtention d'un compromis que les instances décisionnelles n'ont généralement plus qu'à entériner. En quelques années, ce sont plusieurs dizaines de sujets, et non des moindres, qui ont été traités par cette méthode. On peut citer par exemple la définition des principes du combat multi-cibles multi-capteurs, du vol à très basse altitude ou de nombreux points d'ergonomie (commandes temps réel, alertes, ...).



Mystère XX n° 252 - Avion Banc d'Essais de SPECTRA