

# Planification de la Maintenance des Mirage 2000-N sous ms Project



Base Aérienne 116  
Luxeuil

Gilles Poirey

Aéro Spé A  
Promotion 2006



Stage effectué du 21 Juillet au 14 Août 2003  
Base Aérienne 116 de Luxeuil

# Sommaire

<b>Remerciements</b>	3
<b>Introduction</b>	
<a href="#">Présentation de la Base Aérienne 116</a>	4
<a href="#">L'Escadron de Soutien Technique Spécialisé</a>	7
<a href="#">Norme Air Transport Association</a>	10
<a href="#">Maintenance du Mirage 2000-N</a>	11
<b>Démarche de planification</b>	
<a href="#">Planification et buts</a>	13
<a href="#">Première modélisation</a>	14
<a href="#">Modélisation croisée</a>	19
<b>Techniques et technologies du système</b>	
<a href="#">L'atelier « Contrôles non destructifs »</a>	26
<a href="#">Architecture du Mirage 2000</a>	29
<a href="#">Propulsion du Mirage 2000</a>	30
<a href="#">Système de contre-mesures du Mirage 2000</a>	44
<b>Conclusion</b>	
<a href="#">Dans les étoiles ?</a>	47
<b>Bibliographie</b>	48
<b>Lexique</b>	49
<b>Annexes</b>	
<a href="#">Guide d'utilisation</a>	52

# Remerciements

Première aventure dans le monde de l'aéronautique, ce stage, et son bon déroulement, n'auraient pu être possibles sans la rencontre de personnalités que je ne saurais oublier.

Merci au Colonel Hendel, commandant de la BA 116, qui aura validé ma demande,

Merci aux Colonels Vivion et Capou, Chef et Adjoint de l'Escadron de Soutien Technique Spécialisé où se déroula le stage, pour leur accueil et leur grande disponibilité, leurs orientations et leurs encouragements dans mon travail,

Merci aux Capitaines Lovichi et Fournier, Chef et Adjoint de la division Avion, pour leur amabilité, leur compétence sans faille, leurs conseils et leurs réponses claires à des questions qui ne l'étaient pas toujours,

Merci aux responsables des différents ateliers Avion, Commandes de vol, Contrôles non destructifs, Armement, Systèmes de navigation et d'armement, Structure, Division Moteur, Banc d'essai moteur, pour leur enthousiasme à partager leur passion, et qui s'est faite leur quotidien, pour leur pédagogie exemplaire,

Merci aux Capitaines Giraud, Prost et Chenail, pour leur sympathie, pour toutes les visites qu'ils me permirent et nos rencontres,

Merci au Docteur Olivier Kalis, pour ses conseils et sa confiance,

Merci à l'administration de l'IPSA, pour l'organisation des stages,

Et merci à tous, qui aurez participé au bon déroulement de ces quatre semaines remarquables.





# Introduction



## Présentation de la BA 116

La Base Aérienne (BA) Militaire de Luxeuil (70) assure la mise en œuvre de trois unités aériennes. Il s'agit des escadrons de chasses :

- EC 01.004 « Dauphiné »
- EC 02.004 « La Fayette »
- EC 03.004 « Limousin » basé à Istres.

Ces escadrons sont équipés du système d'armes « Mirage 2000N - Missiles Air-sol moyenne portée » (ASMP). Leur mission prioritaire est l'intervention nucléaire stratégique. La BA assure le soutien technique et logistique des unités qui y sont stationnées. Elle effectue en outre l'administration des personnels et matériels affectés.

Engagés depuis la Première Guerre mondiale (1916) les escadrons La Fayette et Dauphiné, et l'escadron Limousin (à partir de 1939), se sont toujours distingués, sur des appareils aussi mythiques tels que :

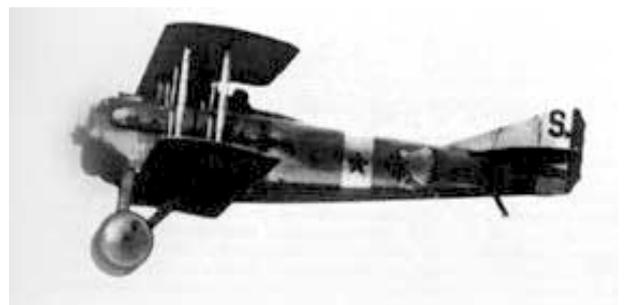


Le Morane Saulnier 406 (1916)

Curtiss H75(1939)



Nieuport XI (1916)



Curtiss P-40F (1943)



Spitfire en Indochine (1949)



MD 450 Ouragan



North American T-6G



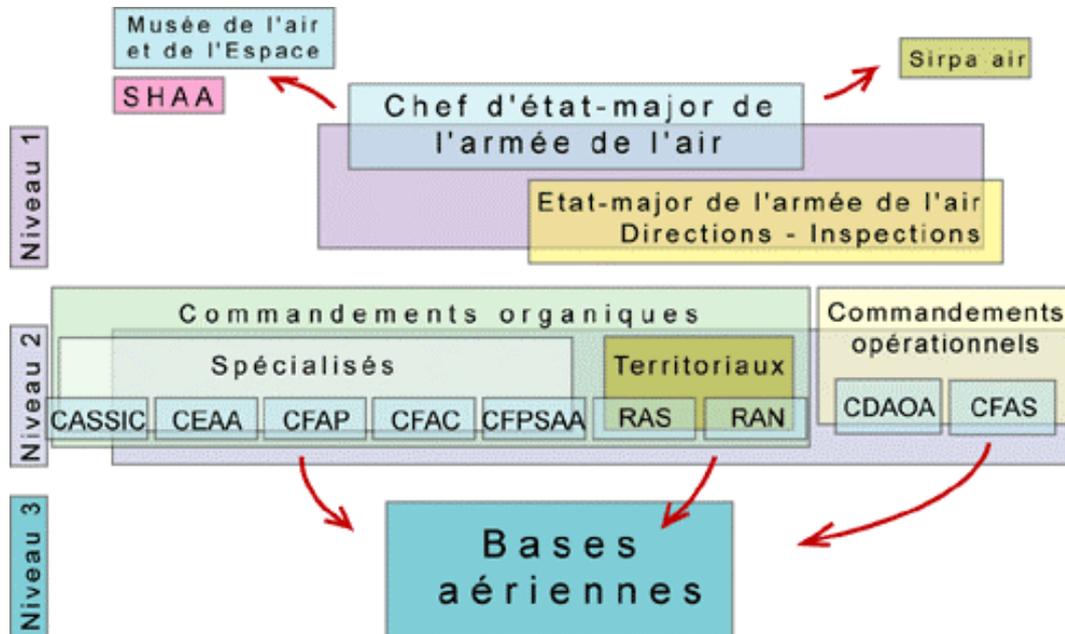
Mirage 2000 dès 1988



Mirage III en 1966



Stationnés sur la Base aérienne 116 de Luxeuil et 125 d'Istres, les escadrons de chasse 01.004, 02.004 et 03.004 sont directement subordonnés au commandant des Forces aériennes stratégiques.



Compte tenu de l'importance de la mission de dissuasion nucléaire dans le concept national, tous les moyens nécessaires à cette mission fondamentale de l'Armée de l'air sont regroupés au sein du Commandement des forces aériennes stratégiques (CFAS). Celui-ci est chargé de veiller au respect du contrat gouvernemental, de la mise en condition opérationnelle des moyens dont il dispose et de l'élaboration du suivi de l'exécution des missions. Les forces aériennes stratégiques constituent l'un des deux piliers sur lesquels repose désormais la dissuasion nucléaire française. Le CFAS met en œuvre la composante « air » aéroportée de la force de dissuasion. Elle comprend les trois escadrons de Mirage 2000N de Luxeuil et Istres, porteurs du missile air sol moyenne portée (ASMP).

Responsable de la préparation et de l'exécution de la mission nucléaire qui lui est définie par le Chef d'état-major des armées, le commandant des Forces aériennes stratégiques doit garantir également devant le Chef d'état-major de l'armée de l'air le niveau de mise en condition et d'entraînement du personnel ainsi que l'aptitude de ses moyens aux missions conventionnelles<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Source Ministère de la Défense

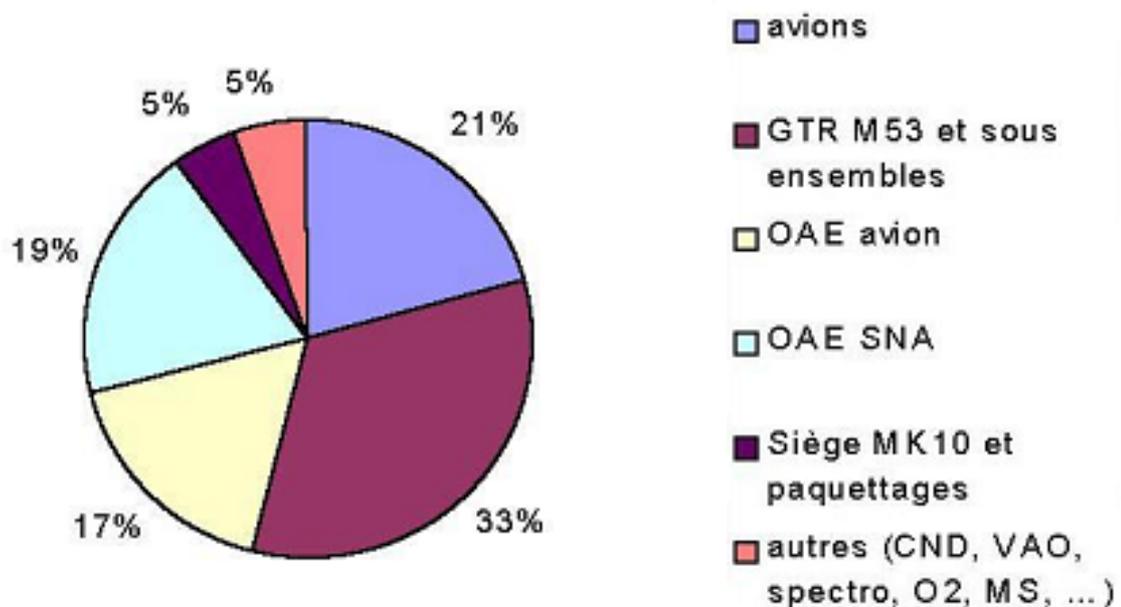
## Organisation et missions de l'ESTS

L'Escadron de Soutien Technique Spécialisé de la Base de Luxeuil est en charge de :

- l'entretien programmé du 2<sup>ème</sup> niveau technique d'intervention ([NTI2](#), voir aussi les définitions des [NTI1](#) et [NTI3](#)) des cellules des 60 Mirage 2000-N de l'Armée de l'Air, des moteurs M 53-P2 les équipant, et de leurs organes accessoires équipements,
- l'entretien curatif de ces mêmes matériels,
- l'application et du suivi des modifications sur les matériels.

L'activité des 200 officiers et sous-officiers de l'ESTS se divise ainsi :

**répartition de l'activité technique  
(année 2002)**



Une part importante de l'activité de l'escadron concerne donc la division moteur. Chaque réacteur y est démodulé pour y être ensuite traité module par module. Les aubes des différentes pièces tournantes et fixes (turbines, étages des compresseurs) sont alors contrôlées. Les variations de température (1200°C à la sortie des chambres à combustion), de pression entraînent inévitablement une fatigue des pièces et l'apparition de criques. Classées selon leur taille et leur profondeur, elles pourront être ou non traitées par l'ESTS (à défaut, traitées au niveau du NTI3).



↑  
Division moteur  
↓



Banc d'essai après intervention à la division moteur



L'atelier « cellule » est le lieu d'entrepôt des avions (moteur déposé). On y réalise la vérification de pièces et revêtements du fuselage, de la voilure, des trains et empennages, les contrôles des commandes hydrauliques (becs, dérives et ailevons), les poses et déposes moteur.

M 2000 sous le hangar de l'atelier « cellule »



### La norme ATA 100

Toutes les opérations réalisées dans ces différents ateliers répondent à une codification spécifique. Il s'agit de la norme Air Transport Association 100 (ATA 100) qui définit les règles de présentation de la documentation technique relative à un avion, qu'il soit militaire ou civil. Commune aux avionneurs, motoristes, équipementiers, utilisateurs finaux, l'ATA 100 permet l'uniformisation des communications entre professionnels de l'aéronautique, en corollaire une plus grande efficacité de travail, et une meilleure adaptation aux nouveaux appareils, leur documentation se calquant aux standards précédents.

Sa numérotation, définie en trois groupes de deux chiffres, est établie suivant une hiérarchie de type système – sous système – sous sous système ...

Un élément d'avion devant être contrôlé codifié 26 – 22 – 03 est alors ainsi facilement localisé :

26 : système « protection incendie »

2\* : sous système « extinction »

\*2 : sous sous système « extinction incendie moteur »

03 : équipement « extincteur »

## Maintenance du M 2000-N

Le cycle de vie de chaque Mirage 2000N se rythme ainsi :

Opérations de mise en œuvre, dépendant du NTI1

- Visite journalière (VJ)  
Visite accomplie une fois par période de 24 heures, uniquement sur les avions disponibles.
- Visite après vol (APV)  
Visite technique et de reconditionnement allant de l'arrêt de l'avion au parking jusqu'à sa remise en œuvre complète.
- Visite avant vol (AVV)  
Visite d'inspection extérieure de l'avion. Le « tour de l'avion » est effectué par le pilote accompagné du mécanicien et se termine par l'installation du ou des membres de l'équipage en cabine.
- Visite hebdomadaire (VH)  
Visite effectuée une fois par semaine conjointement et en complément de la visite journalière ( Procédures et contrôles complémentaires ).

Opérations de maintenance programmée

- Visite de graissage NTI1
- Visite intermédiaire NTI1
- Visite périodique NTI2
- Grande visite NTI3

Chaque visite d'entretien comporte diverses opérations de maintenance, classées par spécialité. Interviennent alors les ateliers

« Cellule »	Interventions sur l'avion
« Structure »	Réfection de pièces de l'avion
« EECV »	Electronique embarquée et commandes de vol
« Armement »	Tests des emports missiles, canons et sièges éjectables
« SNA »	Systèmes de navigation et d'armement
« CND »	Contrôles non destructifs de l'intégrité de pièces et revêtements

L'échelon de ces visites constitue le cycle d'entretien. Il comprend les opérations effectuées sur avion et sur les équipements déposés.

Ci-dessous, diagramme des opérations de maintenance sur M 2000

G : Visite de graissage

I : Visite intermédiaire

P : Visite Périodique

GV : Grande visite

6 mois		6 mois		6 mois
-----12 mois----		-----12 mois----		-----12 mois----
-----900 heures ou 3 ans ( + 4mois )-----		-----900 heures ou 3 ans ( + 4mois )-----		-----900 heures ou 3 ans ( + 4mois )-----
-----2700 heures ou 9 ans ( + 1 an )-----				
<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>
	<b>I</b>	<b>I</b>	<b>P1</b>	<b>I</b>
			<b>I</b>	<b>I</b>
			<b>P2</b>	<b>I</b>
				<b>I</b>
				<b>GV1</b>

6 mois		6 mois		6 mois
-----12 mois----		-----12 mois----		-----12 mois----
-----900 heures ou 3 ans ( + 4mois )-----		-----900 heures ou 3 ans ( + 4mois )-----		-----900 heures ou 3 ans ( + 4mois )-----
-----2700 heures ou 9 ans ( + 1 an )-----				
<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>
	<b>I</b>	<b>I</b>	<b>P5</b>	<b>I</b>
			<b>I</b>	<b>I</b>
			<b>P6</b>	<b>I</b>
				<b>I</b>
				<b>GV2</b>

6 mois		6 mois
-----12 mois----		-----12 mois----
-----900 heures ou 3 ans ( + 4mois )-----		-----900 heures ou 3 ans ( + 4mois )-----
-----1800 heures ou 6 ans ( + 8 mois )-----		
<b>G</b>	<b>G</b>	<b>G</b>
	<b>I</b>	<b>I</b>
		<b>P8</b>
		<b>I</b>
		<b>I</b>
		<b>GV3</b>

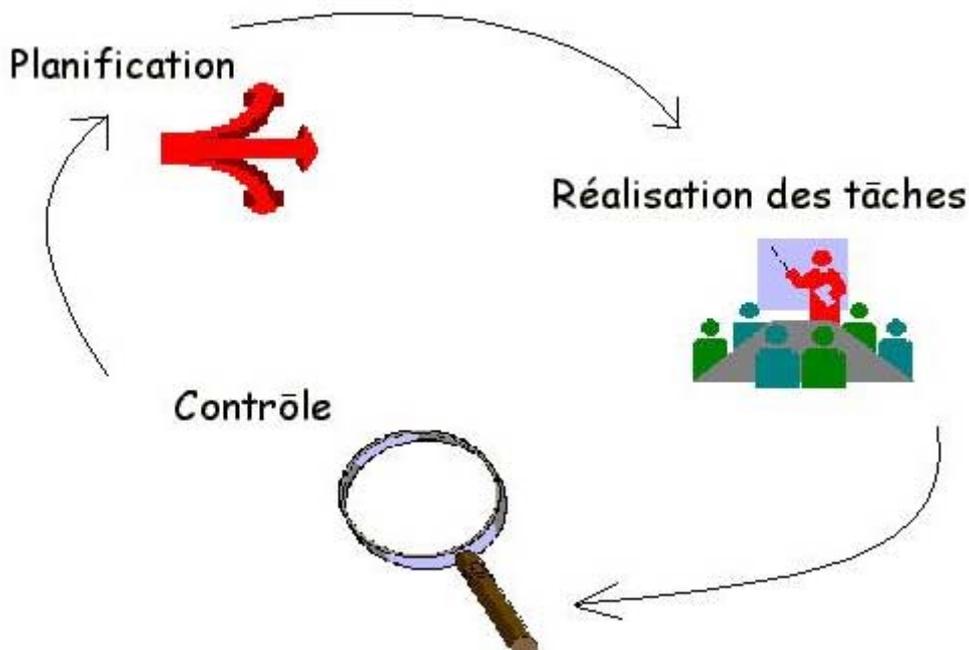
# Démarche de planification

## 🌀 Les enjeux de la planification

Le processus de toute conception, ou de toute maintenance s'organise en une multitude de tâches méthodiquement menées. Il s'agit d'atteindre un objectif précisément défini à l'avance tout en respectant l'équilibre du [quadriptyque](#) 'performance / coût / délais / risques'. Dès lors, la planification a pour but d'orchestrer au plus juste l'agencement des tâches selon leur degré de priorité pour tendre vers cet équilibre.

Mais il faut le préciser, « la tâche, c'est le but à atteindre et les conditions dans lesquelles il doit être atteint. L'activité, c'est ce qui est mis en œuvre par le sujet pour exécuter la tâche ». L'activité est propre à l'expérience individuelle et ne peut être explicitée comme l'est la tâche. Celle-là même qui reste abstraite tant qu'elle n'est pas réalisée. De même, un plan composé d'un ensemble de tâches liées entre elles n'est concret qu'après sa mise en application.

C'est pourquoi toute planification est en perpétuel remaniement. A tout instant, certaines tâches peuvent être repoussées, modifiées, ceci amenant une nouvelle réflexion sur le projet et sa portée. « Un plan est donc bâti à un moment précis, à partir d'une connaissance qui porte sur les buts à atteindre, sur le contexte et les potentialités du projet. Mais ce qui est valable à un moment donné ne l'est pas toujours quelques temps après. »<sup>2</sup> On dit que tout processus de planification est itératif ; C'est-à-dire d'une boucle qui ne cesse que lorsque le dernier élément est achevé.



<sup>2</sup> La conception de systèmes spatiaux – Tome 2 – Serge Potteck 07/2001

C'est cette dernière étape de la boucle de planification, le contrôle, qui peut entraîner une révision du plan de réalisation, dans le respect du quadriptyque dont le projet à la responsabilité. L'activité de planification est en effet l'occasion de « prendre des décisions sur un paramètre en pesant les conséquences sur les autres »<sup>3</sup>. Le « [formalisme PERT](#) » (en anglais « program evaluation and review technic ») est à cette fin un outil très efficace. L'ensemble du projet est considéré comme la somme des tâches répertoriées qui le compose ; une fois estimée la durée, le coût propres des tâches et défini les enchaînements logiques entre elles, il devient possible de connaître le temps et les moyens nécessaires pour achever le projet dans les temps impartis. L'on peut également faire ressortir le [chemin critique](#), et les astuces à mettre en place pour le limiter.

**« Un projet, c'est d'abord une volonté relative au futur »<sup>4</sup>**

L'activité de planification se résume alors en de permanents aller-retour entre la définition du projet et son plan de réalisation. « La planification est une richesse essentielle de l'activité cognitive, qui lui permet de faire face à la variabilité et à la complexité des situations. Par les anticipations, elle permet de guider les choix actuels en tenant compte des événements futurs possibles et/ou probables. Par la hiérarchisation qu'elle introduit dans les structures de représentations, la planification permet de réduire la complexité »<sup>5</sup>. Cet investissement, aussi bien en travail qu'en ressources financières, est une force considérable.

### **Modélisation d'une Visite Périodique**

« L'art du management impose de savoir maintenir quelques caps stratégiques, tout en composant judicieusement avec les singularités des moments et des situations »<sup>6</sup>. Le contrôle de l'avancée des chantiers de maintenance et la gestion des dérives sont sous la responsabilité du chef de la division avion. Avec cinq Mirage sous hangar, renouvelés en permanence, devant subir des interventions de quelques jours à plus d'un mois, il est indispensable de pouvoir projeter à long terme l'arrivée en maintenance des prochains avions. Jusqu'alors, tous les plannings étaient réalisés sous ms Excel. Un plan de charges annuel, c'est-à-dire un planning sur lequel tous les avions devant être contrôlés se succédaient par ordre de priorité, était réalisé et remis à jour si l'un des chantiers prenait du retard. L'outil n'intégrant pas le [formalisme PERT](#), toute modification faisait appel à l'expérience en tenant compte au mieux des disponibilités des personnels, des moyens de servitudes et des priorités données par la hiérarchie. L'outil ms Project donnait la possibilité d'intégrer la gestion des personnels et des équipements (calendriers variables selon les périodes, détection des pics et des creux d'activités des équipes, disponibilité des équipements en cas de chantiers croisés, ...) et permettrait, a posteriori, d'optimiser les liaisons (les interactions entre électriciens, mécaniciens cellule, ...) entre les différentes tâches.

Un premier travail avait été fourni en ce sens par le Capitaine Lovichi par la modélisation sous ms Excel d'une Visite Périodique 6 précisant le déroulement habituel des tâches et l'ordre d'intervention des équipes. Ce document a constitué ma première approche de la maintenance d'un Mirage 2000. Il était alors nécessaire, dans un premier temps, de transcrire cette modélisation sous le nouveau logiciel.

---

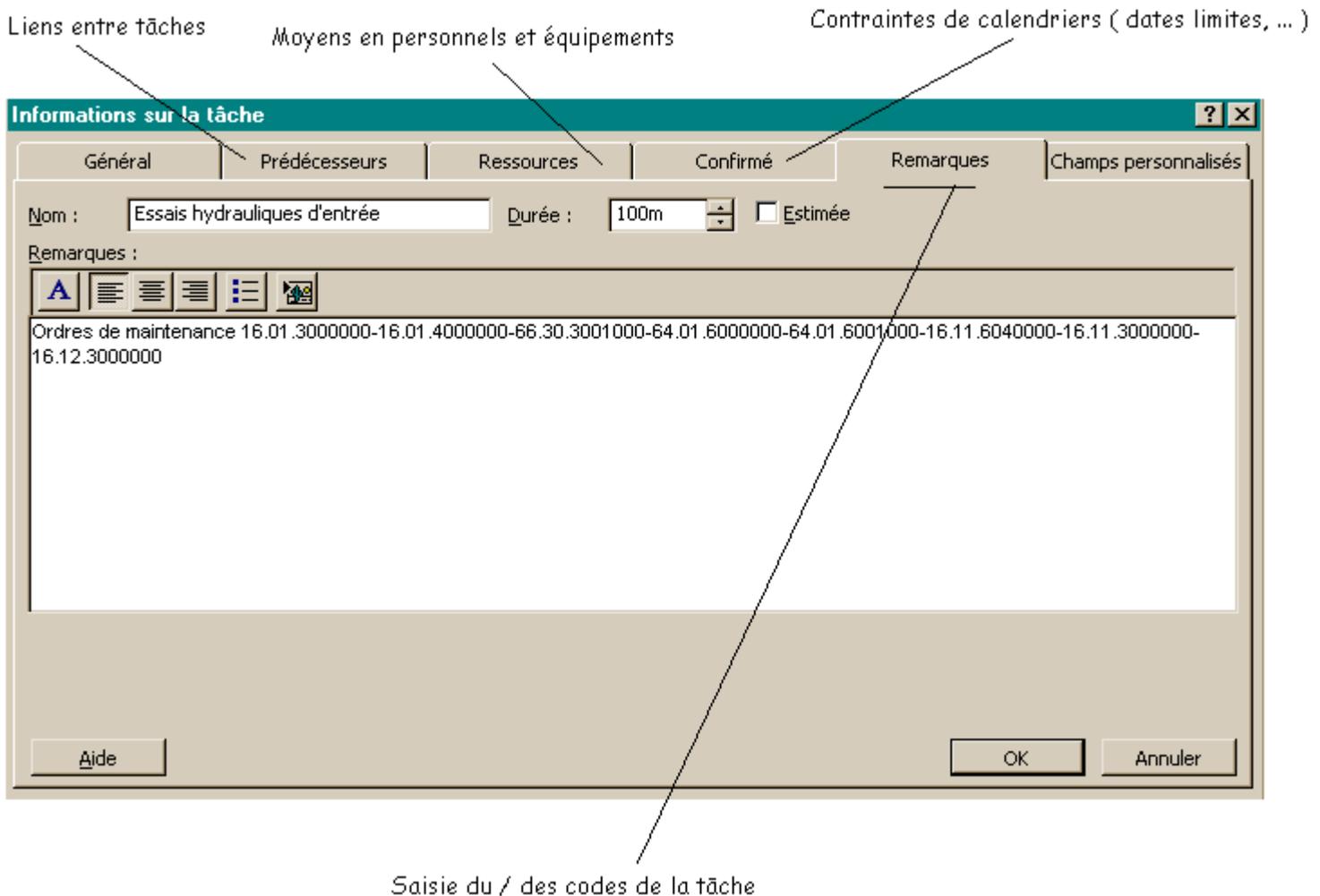
<sup>3</sup> Conduite et gestion de projets - Jean Chevalier et Ivan Chvidenko – Cepadues éd. 1994

<sup>4</sup> [Ingénierie concourante](#) – extrait de la postface de F. Daniellou – Ed. Economica 1997

<sup>5</sup> [Psychologie cognitive de la planification](#) – JM Hoc – Presses universitaires de Grenoble 1987

<sup>6</sup> [L'auto qui n'existait pas](#) – Christophe Midler – InterEditions 1995

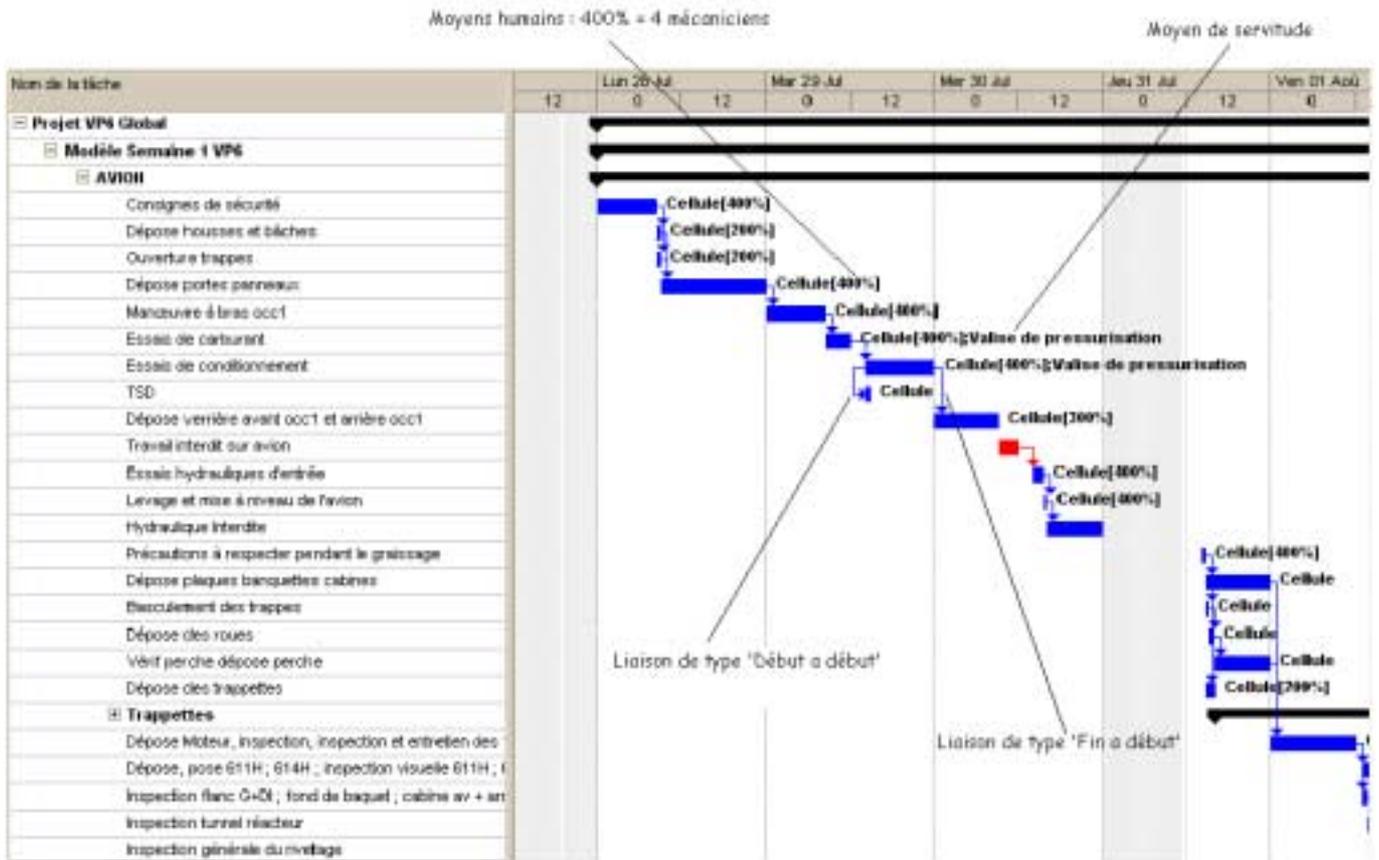
Plus de 300 tâches, codifiées selon la norme ATA 100, composent une Visite Périodique 6. Chacune est détaillée en temps, équipements, compétences, personnels et méthodologie, sur une carte de travail qui lui est propre. C'est sur ces informations qu'est basée la modélisation : la tâche, le code qui lui est attribué, permettant de situer rapidement le lieu d'intervention sur l'avion, de même que la quantité de travail estimée nécessaire (durée x nombre de mécaniciens affectés) sont entrées en premier lieu.



Le renseignement de ces fiches nous amène à la visualisation du diagramme de Gantt (représentation graphique des activités sur une échelle de temps). Du nom de l'ingénieur américain Henri L. Gantt qui développa le premier ce type de représentation à la fin des années 1910.

La Visite Périodique est découpée en 21 jours ouvrés, soit quatre semaines plus un jour. Chaque semaine est divisée selon les différents ateliers intervenant, puis selon les tâches qui leurs sont affectées. Le champ durée correspond au temps travaillé effectivement.

# Diagramme de Gantt



Si cette première étape de saisie restait simple puisque répétée d'une tâche à l'autre, l'étape d'optimisation du réseau requérait une bonne connaissance de l'avion et une large expérience de sa maintenance. En effet, s'il paraît évident qu'il faille « déposer » le moteur avant de pratiquer les tests sur banc, ou bien qu'il faille déposer les verrières avant d'intervenir sur les sièges éjectables, la majorité des actions à mener n'ont pas d'ordre établis a priori et c'est le chef de chantier qui définit, toujours selon son expérience propre et selon les besoins et moyens du moment, le squelette de la VP. La modélisation ne prétend alors aucunement être en plein accord avec la réalité mais se veut le moyen le plus pertinent pour connaître l'échéance des chantiers en cours. De la même façon, on ne peut envisager une modélisation qui dirigerait d'un bout à l'autre de la VP, les faits et gestes des mécaniciens, tant l'implication de l'homme est ancrée au programme Mirage. Ici, c'est le mécanicien qui modèle sa propre intervention ; dans l'aviation civile, et dans l'Armée avec Rafale, aucune intervention ne supporte l'initiative individuelle.

C'est, à terme, une certaine image de l'aéronautique - ses premières grandes années, et ses premiers passionnés - qui disparaît. Tout contrôler, tout sécuriser, sont les nouvelles priorités.

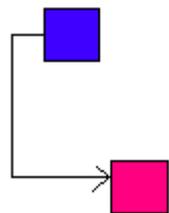
Le logiciel, et la méthode PERT, nous laissent quatre types de liaisons entre tâches afin de rendre au mieux leur enchaînement :

### Fin à début



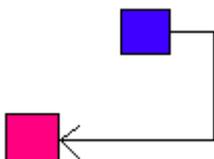
La tâche rouge ne peut commencer avant la fin de la bleue.

### Début à Début



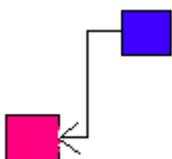
La tâche rouge ne peut commencer avant le début de la bleue.

### Fin à Fin



La tâche rouge ne peut pas finir avant la fin de la bleue.

### Début à fin



La tâche rouge ne peut pas finir avant le début de la bleue.

Outre les chaînes « logiques », comme énoncé plus haut, et afin d'obtenir un réseau dynamique - c'est-à-dire réagissant aux modifications de tâches antérieures - les tâches se succédant seront modélisées par la liaison de type « fin à début ». Les liaisons « Début à début » seront utilisées pour modéliser les interdépendances entre ateliers - ainsi, l'interdiction de travail sur avion ne peut débiter que lorsque débute l'intervention sur les accessoires pyrotechniques. De même pour les liaisons « Fin à fin » - La fin des tests hydrauliques entraîne la fin d'interdiction d'approcher l'appareil.

Il apparaît vite cependant que la multiplication des tâches entraîne celle des liaisons, et la clarté recherchée - puisqu'il s'agit bien de la première qualité de cette méthode, se perd. C'est donc tout ce travail qu'il reste à réaliser afin de rendre l'outil performant :

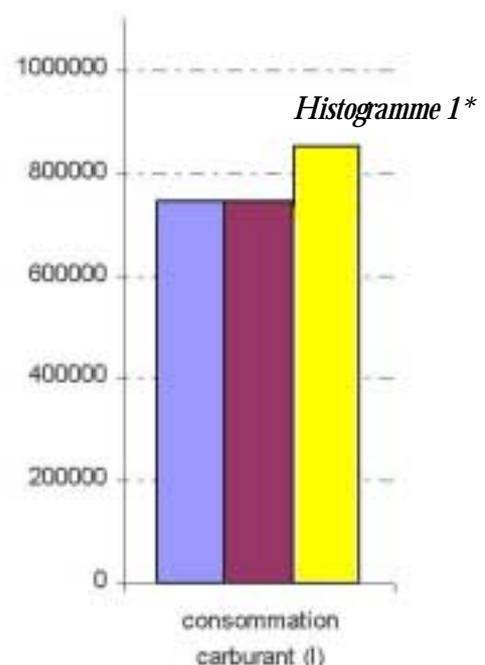
**Réaliser des chemins logiques** : le manque de connaissances de l'avion m'a conduit à respecter l'enchaînement type quand il aurait été préférable de ne lier entre elles que les tâches logiquement interdépendantes. Ainsi, l'ensemble serait plus cohérent - retarder la dépose du moteur retarde les essais carburants, mais pas nécessairement la vérification des trains...

**Simplifier le réseau** : en réduisant les successeurs et prédécesseurs des tâches. Là encore, c'est la connaissance de l'avion qui permettrait de cibler le plus précisément les interdépendances.

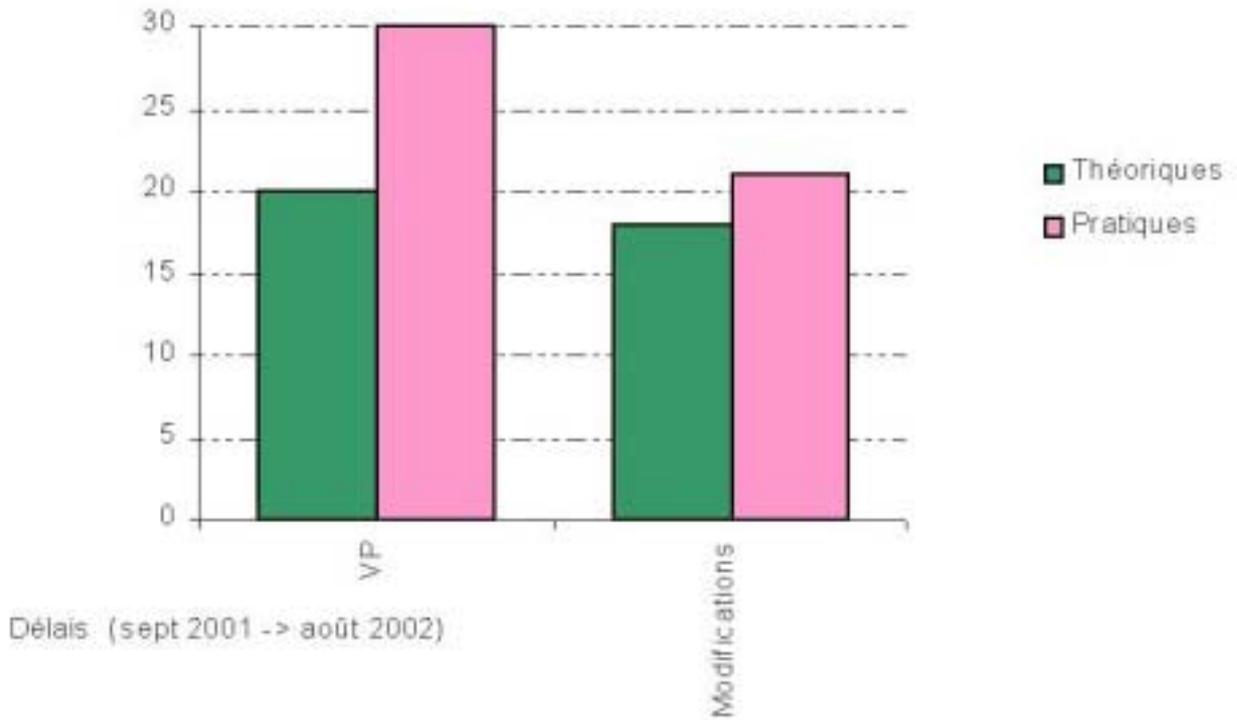
### **Modélisation du plan de charges**

Cette optimisation ne rendrait que plus ergonomique un outil devenu indispensable. La planification n'est, et à tout niveau, nullement fantaisiste. On sait les budgets réduits, les chaînes de production des pièces de rechange très lentes à relancer pour des raisons elles aussi budgétaires, les personnels et moyens opérationnels moins nombreux... c'est toute une réorganisation des méthodes de travail qui s'impose face à une situation qui se veut durable. On observe à tous les niveaux d'intervention une baisse d'efficacité, une hausse des coûts de maintenance et des temps d'immobilisation. Et pourtant le système doit se poursuivre ; c'est une nécessité. Et l'ensemble des 60 Mirage 2000-N de l'Armée de l'Air arrive progressivement en Visite Périodique numéro 5 ou 6, auxquelles s'ajoutent des [chantiers de modifications](#).

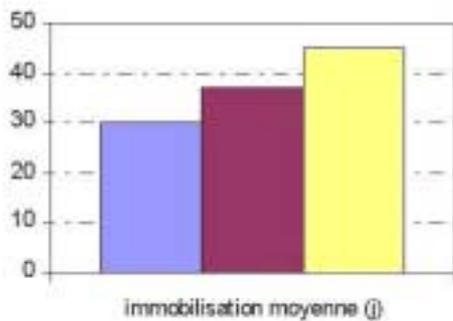
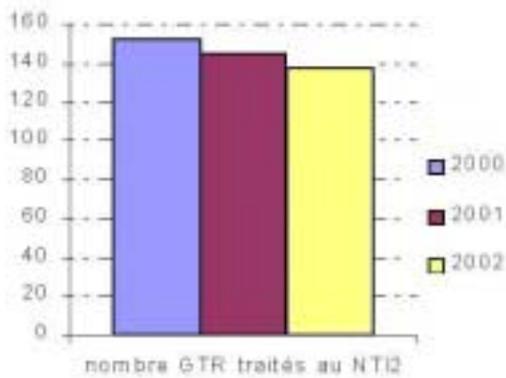
Ici, en jaune, la hausse de la consommation de carburant en banc d'essai due à l'arrivée d'appareils en VP 5 et 6 lourdes en opérations de maintenance.



*Histogramme 2\**

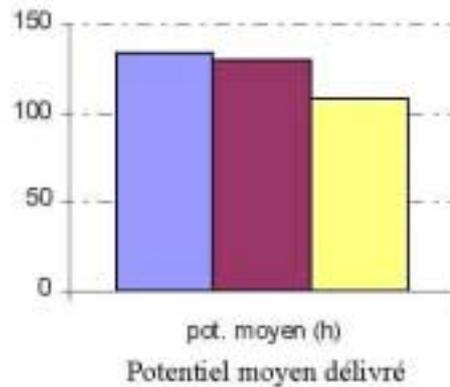


De l'atelier cellule à la division moteur, la tendance est à la hausse des délais de traitement\*



### Chiffres clés du moteur

*Histogramme 3\**



\* Source ESTS

Ms Project permet dans ces circonstances de gérer au mieux les différentes ressources à long terme et ainsi aviser la hiérarchie des possibilités d'accueil et de travail des ateliers. On peut déterminer avec précision le nombre d'appareils pouvant être traités selon les opérations de maintenance à effectuer, selon les priorités de chacun, prévoir à l'avance la non tenue des délais et réorienter les travaux, connaître les retards d'un chantier en cas de personnels absents ou de matériels défectueux, ou partis en étalonnage chez l'industriel, intégrer au mieux les [chantiers de modifications](#) selon les disponibilités du moment...

Différents rapports nous permettent alors de visualiser les heures travaillées pour chaque atelier, les heures restantes disponibles par atelier, les sollicitations excessives de personnels ou d'équipements ainsi que les moments où se réunissent ces conditions.

Ici, l'un des moyens de contrôle : le tableau des ressources

Equipement, matériel de servitude

Type de ressource : travail ou consommable

Affectation de la ressource

Indication en rouge d'une pointe supérieure aux capacités

Personnels

Nom de la ressource	Type	Etiquette Matériel	Initiales	Groupe	Capacité max.	Pointe	Calendrier de base
Valise de pressurisation	Travail		V	CEL	200%	200%	Standard
Banc capteur	Travail		B	EEC	200%	200%	Standard
<b>Mallette génération</b>	<b>Travail</b>		<b>M</b>	<b>EEC</b>	<b>100%</b>	<b>200%</b>	<b>Standard</b>
<b>Générateur de pression</b>	<b>Travail</b>		<b>G</b>	<b>EEC</b>	<b>100%</b>	<b>200%</b>	<b>Standard</b>
<b>Valise LABEM</b>	<b>Travail</b>		<b>V</b>	<b>EEC</b>	<b>100%</b>	<b>200%</b>	<b>Standard</b>
<b>Banc SIMU-AHEMO</b>	<b>Travail</b>		<b>B</b>	<b>EEC</b>	<b>200%</b>	<b>300%</b>	<b>Standard</b>
<b>Banc BBS</b>	<b>Travail</b>		<b>B</b>	<b>EEC</b>	<b>100%</b>	<b>300%</b>	<b>Standard</b>
Mallette jaugeur/Débit	Travail		M	EEC	200%	200%	Standard
Banc de contrôle pressurisation	Travail		B	ARM	200%	200%	Standard
Valise paramètres	Travail		V	SNA	300%	300%	Standard
Valise contrôle en piste	Travail		V	SNA	500%	200%	Standard
Boîtier de décodage	Travail		B	SNA	6 000%	200%	Standard
Panneau d'harmonisation, lunette d'alignement	Travail		P	SNA	300%	200%	Standard
<b>Poste contrôle par courants de Foucault</b>	<b>Travail</b>		<b>P</b>	<b>CND</b>	<b>100%</b>	<b>200%</b>	<b>Standard</b>
<b>Poste contrôle par magnétoscopie</b>	<b>Travail</b>		<b>P</b>	<b>CND</b>	<b>100%</b>	<b>200%</b>	<b>Standard</b>
Cellule	Travail		C	CEL	2 000%	1 400%	Standard
EECV	Travail		E	EEC	1 300%	800%	Standard
Structure	Travail		S	STR	800%	400%	Standard
Armement	Travail		A	ARM	1 700%	400%	Standard
<b>SHIA</b>	<b>Travail</b>		<b>S</b>	<b>SHIA</b>	<b>600%</b>	<b>900%</b>	<b>Standard</b>
CND	Travail		C	CND	500%	400%	Standard
<b>Valise GTR Moteur</b>	<b>Travail</b>		<b>V</b>	<b>EEC</b>	<b>100%</b>	<b>200%</b>	<b>Standard</b>
Mallette SPAD	Travail		M	EEC	100%	0%	Standard
Exports d'armement	Travail		E	ARM	100%	0%	Standard

On a alors détecté l'atelier où les premières prévisions ne pourront être tenues, pour diverses raisons (période de creux de personnels telle que vacances, mécanicien indisponible, équipement partagé entre divers ateliers au même moment).

Un autre écran nous permet de détecter la ou les tâches en causes. Il s'agit du tableau d'utilisation des ressources :

Seuil dépassé : la ressource est en rouge

Dates et heures de début/fin

Liste des tâches affectées à la ressource

Nom de la ressource	Début	Fin	Travail	Détails	29 Déc 03				
					L	M	M	J	V
Valise de pressurisation	Mar 02/12/03 08:30	Mar 06/01/04 17:00	26 hr	Trav.					
Banc capteur	Ven 05/12/03 09:00	Ven 09/01/04 13:30	14 hr	Trav.					
<b>Mallette génération</b>	<b>Jeu 04/12/03 14:00</b>	<b>Jeu 22/01/04 14:30</b>	<b>63 hr</b>	Trav.	3h				2h
<b>Générateur de pression</b>	<b>Lun 01/12/03 15:00</b>	<b>Lun 26/01/04 16:00</b>	<b>29 hr</b>	Trav.	4h		3h		
Utilisation générateur de pression type LPO 5r	Lun 01/12/03 15:00	Lun 01/12/03 15:30	0,5 hr	Trav.					
Essais d'étanchéité circuit anémo	Lun 01/12/03 15:30	Lun 01/12/03 16:00	0,5 hr	Trav.					
Soiffage et purge du circuit anémométrique	Ven 12/12/03 09:30	Ven 12/12/03 12:00	2,5 hr	Trav.					
Essai d'étanchéité circuit anémo	Lun 22/12/03 17:00	Lun 22/12/03 17:30	0,5 hr	Trav.					
Contrôle de l'installation anémo	Lun 22/12/03 14:00	Lun 22/12/03 15:30	1,5 hr	Trav.					
Test déclenché ST4	Mer 24/12/03 17:40	Mer 24/12/03 14:40	1 hr	Trav.					
Utilisation générateur de pression type LPO 5r	Lun 08/12/03 15:00	Lun 08/12/03 15:30	0,5 hr	Trav.					
Essais d'étanchéité circuit anémo	Lun 08/12/03 15:30	Lun 08/12/03 16:00	0,5 hr	Trav.					
Soiffage et purge du circuit anémométrique	Ven 19/12/03 09:30	Ven 19/12/03 12:00	2,5 hr	Trav.					
Essai d'étanchéité circuit anémo	Lun 29/12/03 17:00	Lun 29/12/03 17:30	0,5 hr	Trav.	0,5h				
Contrôle de l'installation anémo	Lun 29/12/03 14:00	Lun 29/12/03 15:30	1,5 hr	Trav.	1,5h				
Test déclenché ST4	Mer 30/12/03 17:40	Mer 31/12/03 14:40	1 hr	Trav.			1h		
Utilisation générateur de pression type LPO 5r	Lun 05/01/04 15:00	Lun 05/01/04 15:30	0,5 hr	Trav.					
Essais d'étanchéité circuit anémo	Lun 05/01/04 15:30	Lun 05/01/04 16:00	0,5 hr	Trav.					
Soiffage et purge du circuit anémométrique	Jeu 15/01/04 14:30	Jeu 15/01/04 17:00	2,5 hr	Trav.					
Essai d'étanchéité circuit anémo	Mer 20/01/04 16:00	Mer 21/01/04 15:30	0,5 hr	Trav.					
Contrôle de l'installation anémo	Mer 20/01/04 16:00	Jeu 22/01/04 14:30	1,5 hr	Trav.					
Test déclenché ST4	Lun 26/01/04 15:00	Lun 26/01/04 16:00	1 hr	Trav.					
Utilisation générateur de pression type LPO 5r	Lun 08/12/03 15:00	Lun 08/12/03 15:30	0,5 hr	Trav.					
Essais d'étanchéité circuit anémo	Lun 08/12/03 15:30	Lun 08/12/03 16:00	0,5 hr	Trav.					
Soiffage et purge du circuit anémométrique	Ven 19/12/03 09:30	Ven 19/12/03 12:00	2,5 hr	Trav.					
Essai d'étanchéité circuit anémo	Lun 29/12/03 17:00	Lun 29/12/03 17:30	0,5 hr	Trav.	0,5h				
Contrôle de l'installation anémo	Lun 29/12/03 14:00	Lun 29/12/03 15:30	1,5 hr	Trav.	1,5h				
Test déclenché ST4	Mer 30/12/03 17:40	Mer 31/12/03 14:40	1 hr	Trav.			1h		
<b>Valise LABEM</b>	<b>Lun 01/12/03 14:00</b>	<b>Mar 27/01/04 16:10</b>	<b>19 hr</b>	Trav.	7h				2h

Travail excessif ou mal réparti

En effet, aux mêmes moments, la même ressource est affectée à deux tâches

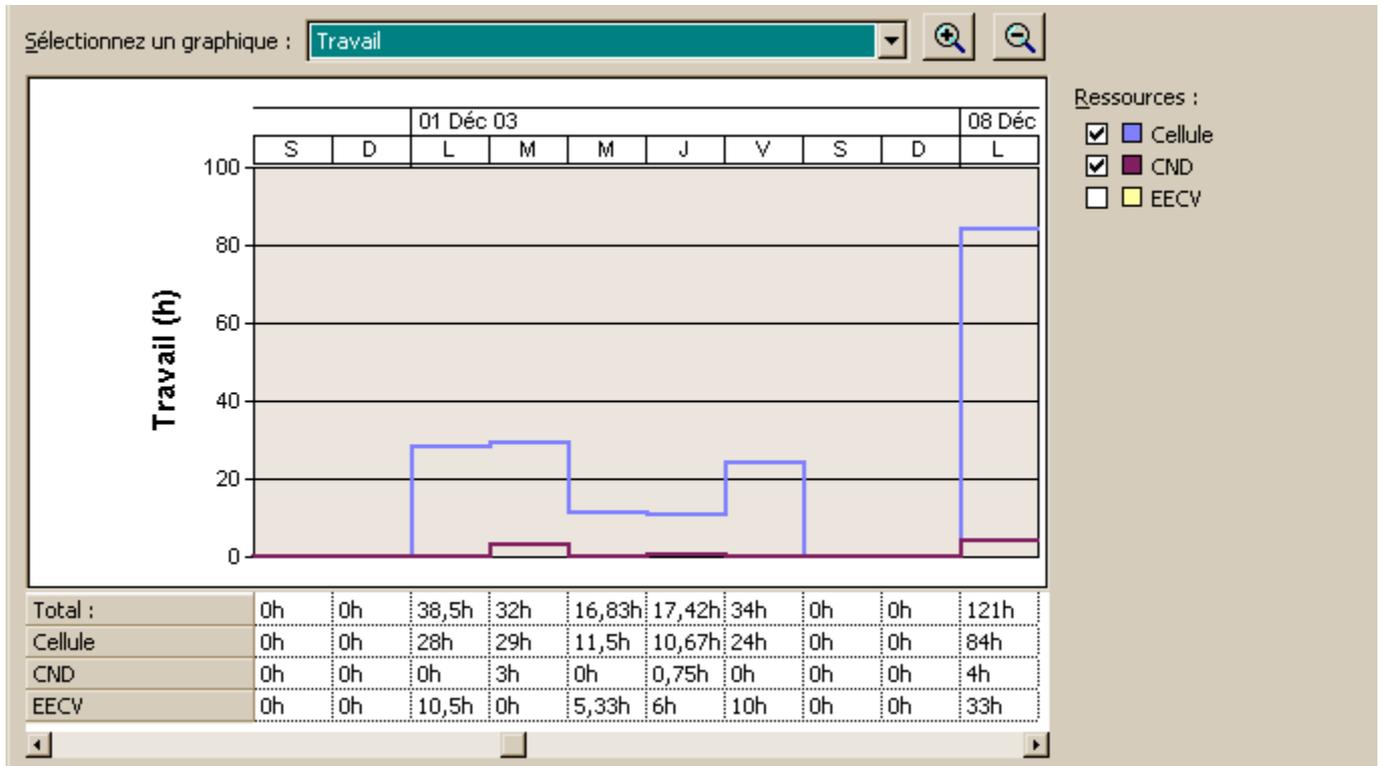
On peut alors agir directement sur le planning en déplaçant les tâches prévues. Il apparaît (cf. page 21 - [Diagramme plan de charge](#)) que deux Visites Périodiques avaient commencé simultanément alors que certains équipements ne se trouvent qu'en un exemplaire. Il faut alors déterminer lequel des deux appareils est le plus proche de sa limite de tolérance (cf. page 8 - [Diagramme des opérations de maintenance](#)) ou lequel est attendu le plus rapidement pour mission. La visite périodique complète, ou juste la chaîne critique, est alors repoussée.

Il est évident que cette manipulation est faite bien avant l'intervention des mécaniciens. Il ne s'agit pas de se trouver face à des tâches irréalisables, avec un avion immobilisé sur lequel on ne pourrait intervenir. Il s'agit bien d'un outil de gestion des hangars et des ateliers à long terme avec les éléments connus alors, puis un outil de réaction et d'estimation face à un imprévu. Le cas ici présenté ayant été forcé pour faire apparaître une lourde incompatibilité.

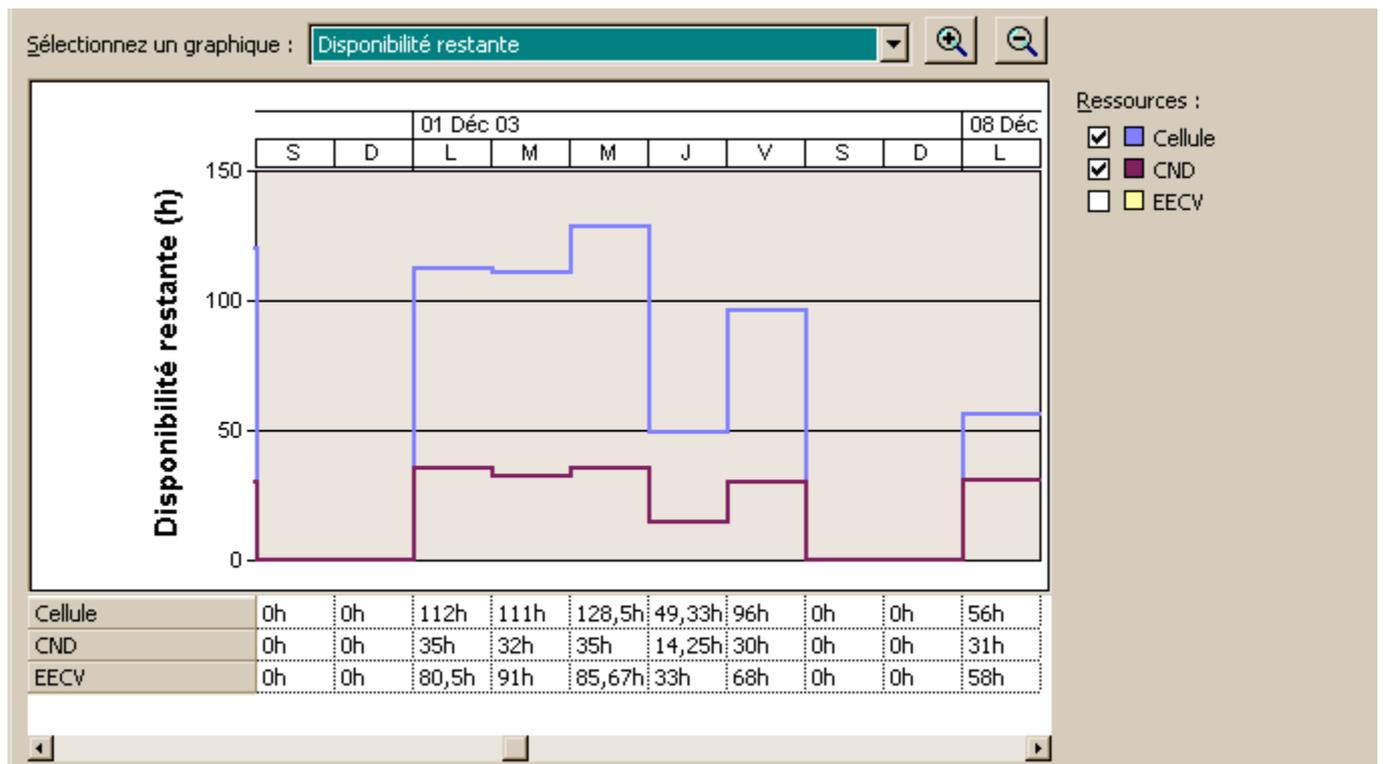
Il peut être également très utile de connaître les capacités d'accueil des ateliers afin d'éviter des conflits de ce genre. Cette possibilité est donnée par les graphiques des ressources. Sur chaque

semaine apparaît la quantité de travail disponible, la quantité de travail effective et la sur utilisation comme précédemment :

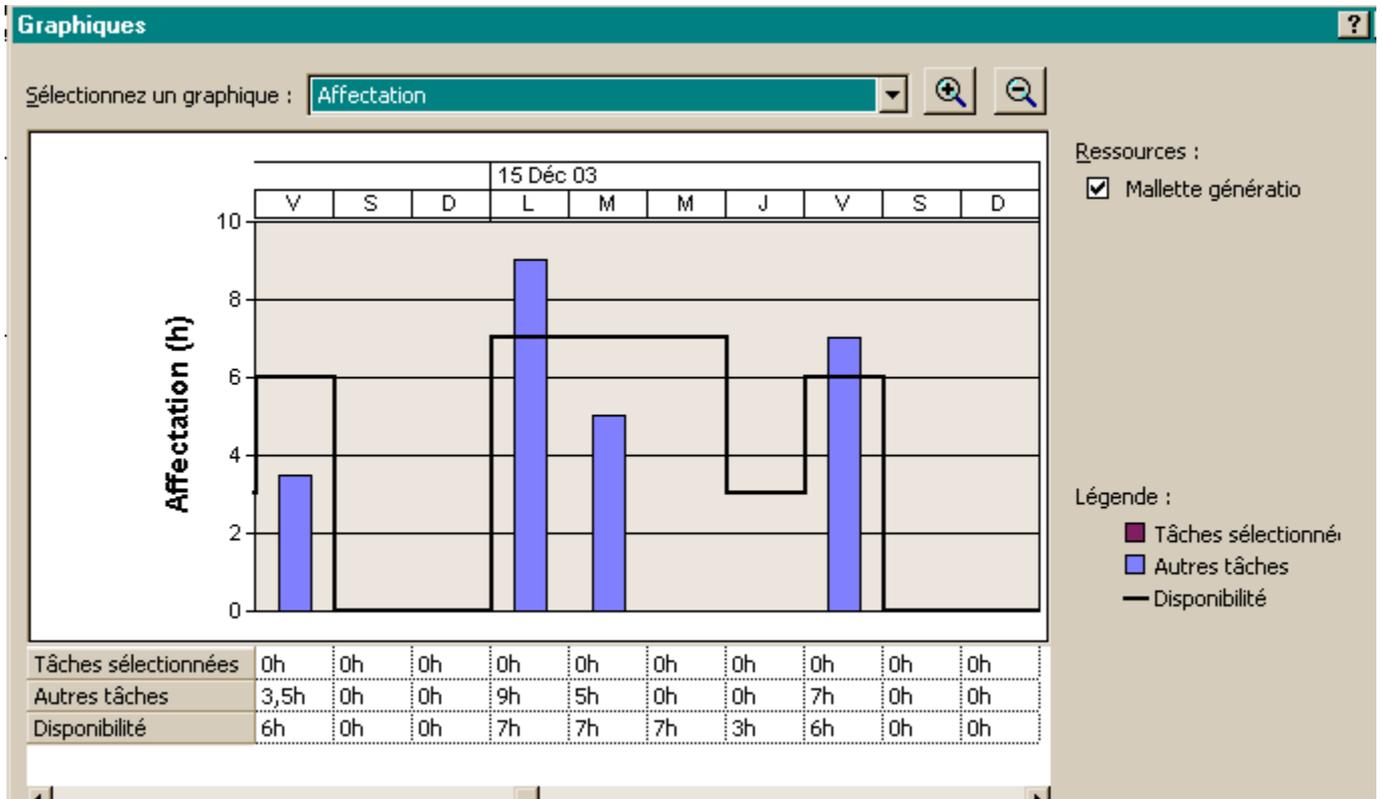
Travail effectué par les ateliers « cellule » et « EECV » sur une semaine :



Disponibilité restante pour la même période des deux ateliers :



## Cas de sur utilisation d'une mallette de test : affectation supérieure à la disponibilité

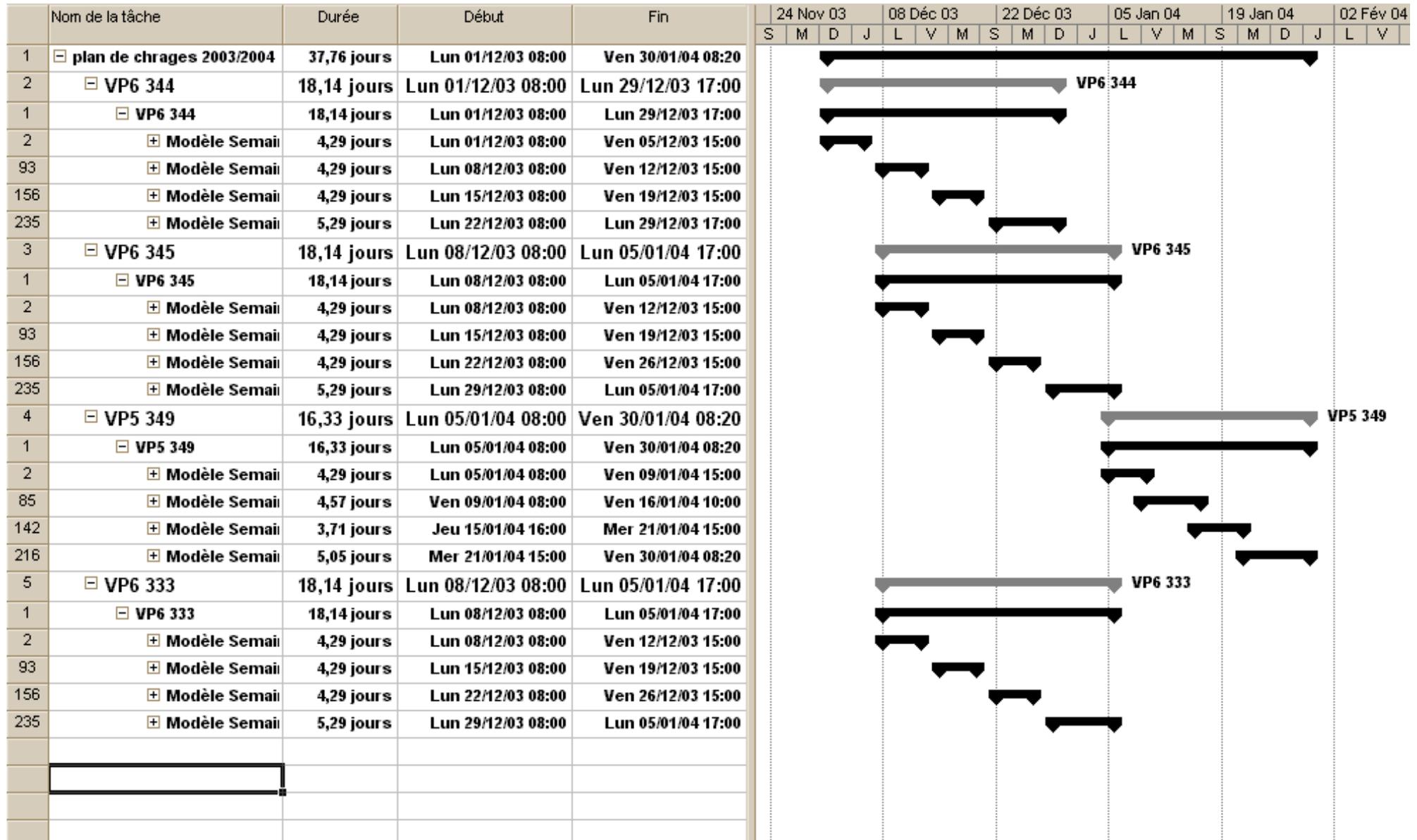


La modification du plan de charges concerne ici plusieurs spécialités. Tout d'abord l'atelier des CND, puis divers équipements tels que la mallette génération (EECV), la valise LABEM (EECV : tests des sondes de température), et le générateur de pression (valise en commun entre les ateliers EECV et cellule pour tester les commandes hydrauliques et les instruments de vol en simulant des conditions de pression types). Certaines manipulations peuvent alors être simplement déplacées. La tâche apparaît plus difficile lorsqu'il s'agit de personnels comme les CND. On pourrait croire que leur emploi du temps est très souple : en effet, leurs tests se pratiquent assez indépendamment des autres ateliers mais leurs interventions sont très nombreuses (au sein des NTI1 et NTI2) et la plupart ne sont programmées que peu avant. La connaissance du métier est alors indissociable de l'outil informatique. Il nous informe, avec l'appui de ses outils statistiques, de ce qui pourra ou non se faire ; l'officier, quant à lui, se doit de trancher sur ce qui devra effectivement être traité, et comment résoudre au cas par cas les quelques dissonances du planning en cohésion avec les équipes sous ses ordres.

**« Contrairement à la tendance dominante qui est de rechercher plus d'efficacité par l'emploi d'outils de plus en plus sophistiqués, il a été établi que les variables les plus actives sont liées pour l'essentiel à des facteurs d'organisation et de communication »<sup>7</sup>**

<sup>7</sup> Quels sont les facteurs de succès des projets ? – J. Couillard et C. Navarre – Gestion 2000, 1993

## Plan de charge avec 4 avions en maintenance



# Techniques et technologies du système

## ⊕ Principes techniques des postes CND

L'atelier « Contrôles non destructifs » a pour mission le contrôle de pièces et la détection de criques ou fissures, débouchant ou non, dues à une fatigue par frottements, chocs thermiques, traction, flexion... Différentes méthodes sont utilisées à cette fin :

### 1 Contrôles par courants de Foucault

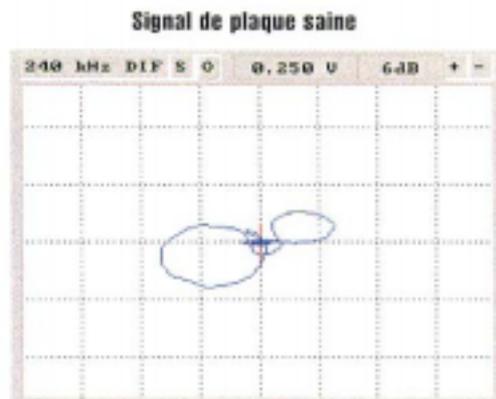
#### 1.1 Non automatisé

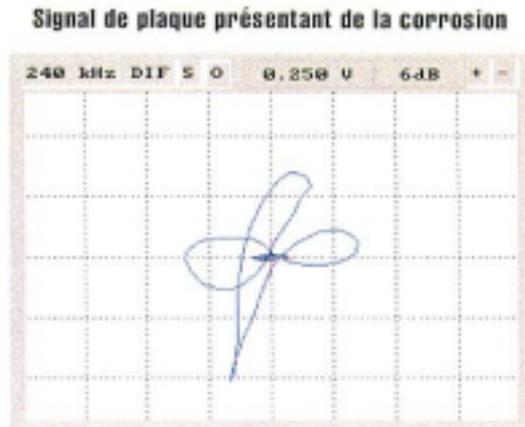
Il s'agit d'un contrôle de défauts débouchant, c'est à dire de surface. Un défaut en profondeur ne pourra être détecté. Une bobine est alimentée en courant, créant ainsi un champ magnétique. Cette bobine, la sonde, est mise en contact avec le matériau - qui doit être conducteur ! - ce qui entraînera soit

- une variation du champ de la bobine par champ induit par le phénomène des courants de Foucault, si présence de crrique au point de contact sonde-matériau,
- une continuité du champ, dans le cas d'un matériau sans crrique.

« l'aimant et le corps conducteur tendent par une influence mutuelle à un repos relatif »

La méthode consiste à créer des courants induits par l'intermédiaire d'un champ magnétique alternatif (généralisé par un solénoïde) et variable dans le temps (basse ou haute fréquence) dans les matériaux conducteurs de l'électricité. Ces courants induits et créés localement sont appelés Courants de Foucault. Leur distribution et leur répartition dépendent du champ magnétique d'excitation, de la géométrie et des caractéristiques de conductivité électrique et de perméabilité magnétique de la structure examinée. La présence d'un défaut dans la pièce perturbe la circulation des Courants de Foucault, entraînant une variation de l'impédance apparente du solénoïde dont l'importance dépend de la dimension volumique et de la nature du défaut. Le contrôle s'effectue par l'observation (cadran de galvanomètre, écran d'oscilloscope) des variations de l'impédance du solénoïde.





### 1.2 Automatisé : cas des aubes

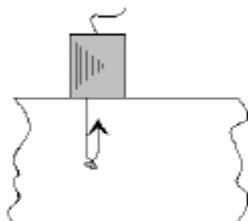
Dans un compartiment étanche, l'aube est fixée à un axe en rotation. La sonde est fixée à un support se déplaçant longitudinalement par rapport à l'aube. Les variations de champ sont interprétées par ordinateur et symbolisées, permettant un traitement direct.

## 2 Contrôles par ultrasons

Il s'agit d'une méthode pour les cas d'usure de surface et de défauts internes (contrôle en sortie d'usine, bulles à la fabrication, ...). Le contrôle par ultrasons intervient également dans le cas des matériaux composites (ailevons). Un choc détecté en surface par courants de Foucault ne révèle pas les décollements des couches inférieures. Chaque zone d'air renverra le signal et indiquera par un pic sur oscilloscope la profondeur et l'emplacement du décollement.

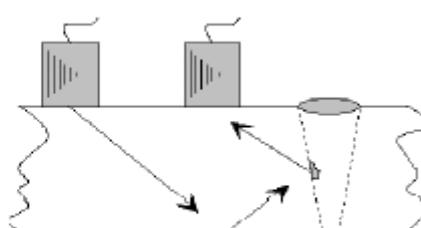
Les ultrasons sont des ondes sonores qui se propagent dans les milieux élastiques. Des modifications locales du milieu parcouru (fissures, défaut de compacité, ...) engendrent des perturbations dans la propagation de l'onde. Le contrôle par ultrasons a donc pour principe d'analyser, à l'aide d'instruments de mesure appropriés, les modifications apportées à la progression des ondes sonores. Les ultrasons sont des ondes sonores qui se propagent dans les milieux élastiques. Des modifications locales du milieu parcouru (fissures, défaut de compacité, ...) engendrent des perturbations dans la propagation de l'onde. Le contrôle par ultrasons a donc pour principe d'analyser, à l'aide d'instruments de mesure appropriés, les modifications apportées à la progression des ondes sonores.

Transducteur émetteur / récepteur



Contrôle en émission / réception

émetteur récepteur



Contrôle en émission / réception séparée

### 3 Ressuage

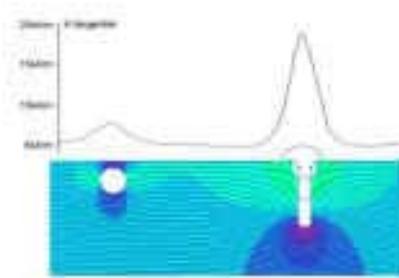
Méthode de détection de criques de surface : un liquide à très haut pouvoir mouilleur (dérivé pétrolier) est répandu sur la surface à contrôler. Les criques, si elles existent, vont être remplies par ce liquide. Puis la surface va être lavée (eau ou eau+savon). Eau et pétrole étant des phases non miscibles, le liquide restera dans les criques. Un film de talc est alors déposé, laissant apparaître par capillarité le liquide.

### 4 VAO, Visualisation Assistée par Ordinateur

Le liquide à tester (liquide hydraulique) est filtré. Ne restent que les particules comptées et triées automatiquement par grosseur. Les paramètres de tailles et de quantité des particules sont significatifs de l'usure d'une pièce précise, qu'il suffit alors de remplacer (pompe, ...).

### 5 Magnétoscopie

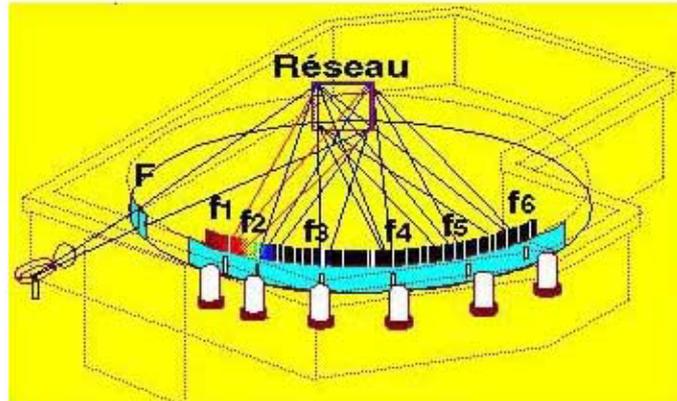
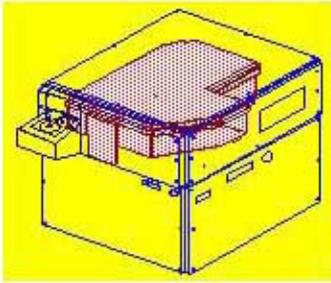
La magnétoscopie est une technique de contrôle non destructif qui consiste à créer un flux magnétique intense à l'intérieur d'un matériau ferromagnétique. Lors de la présence d'un défaut sur son chemin, le flux magnétique est dévié et crée une fuite qui, en attirant les particules (colorés ou fluorescentes) d'un produit révélateur, fournit une signature particulière caractéristique du défaut.



### 6 Analyse Spectrométrique des huiles

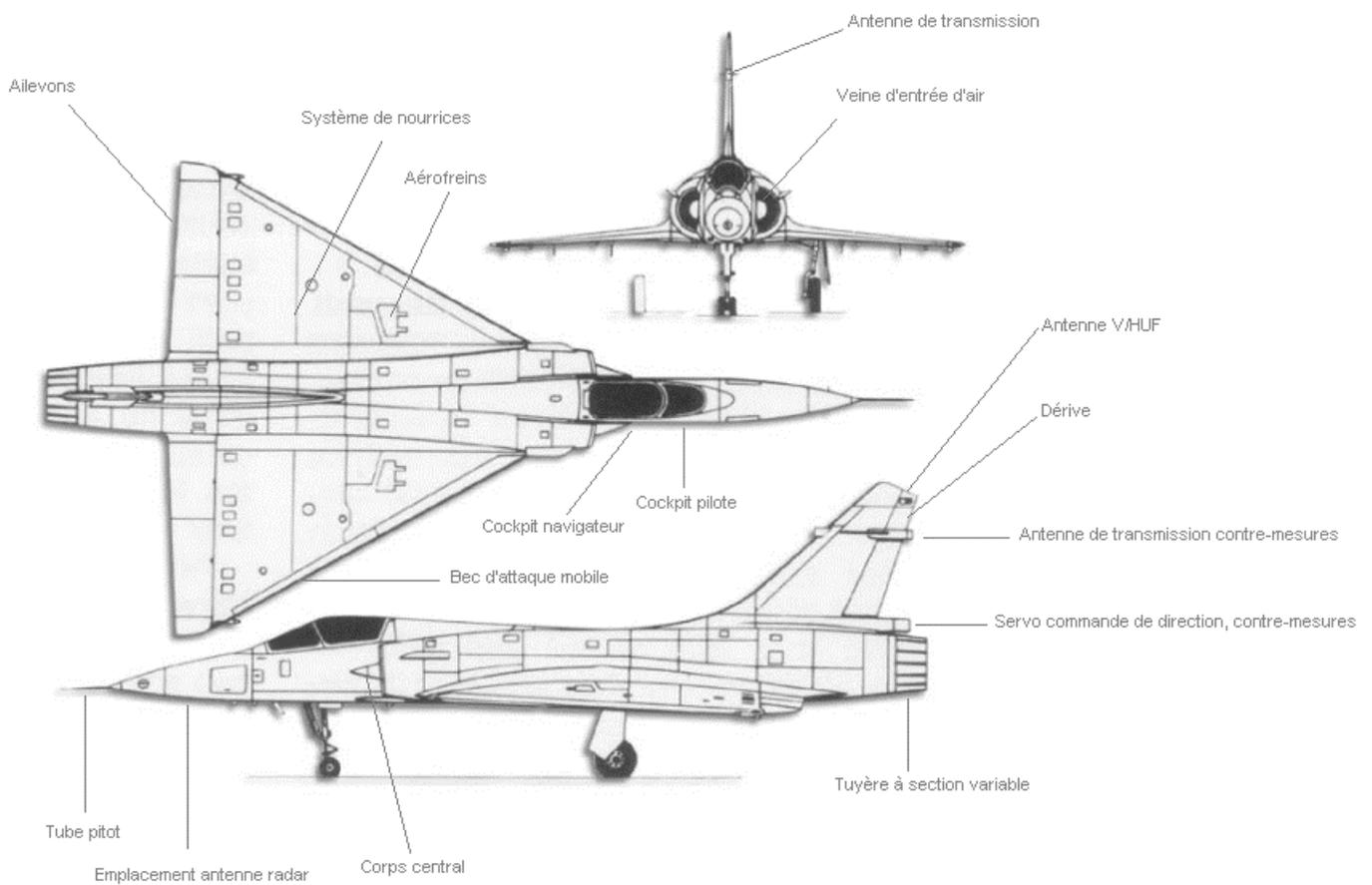
Les huiles sont brûlées. La lumière émise sera qualitativement et quantitativement le résultat des puissances et longueurs d'ondes émises par les composants de l'huile, dont les dépôts métalliques d'usure du réacteur (aluminium, manganèse, titane, ...). Le système optique du spectromètre d'étincelle est constitué d'un polychromateur qui disperse le spectre et isole les raies analytiques des éléments à doser. Cette méthode nécessite donc un étalonnage : un échantillons d'huiles pures et d'huiles sales sont donc analysées, constituant ainsi les bornes de références sur lesquelles le spectromètre hiérarchisera les signaux électriques des éléments présents dans une huile à tester.

## LE SYSTÈME OPTIQUE



*Système optique Jobin Yvon*

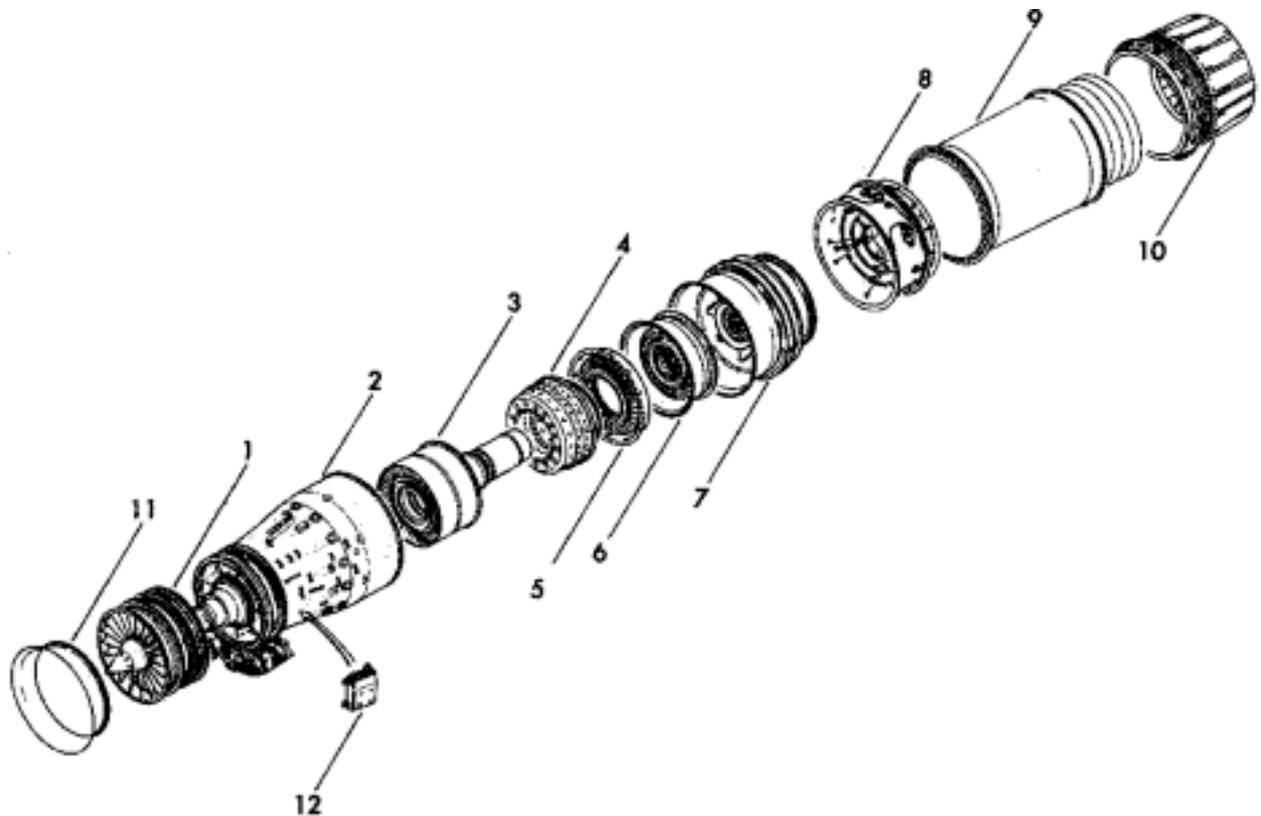
## Architecture du M 2000



*Plan 3 vues du Mirage 2000*

## Le M53-P2 Snecma

### Présentation



Le turboréacteur M53-P2 est le résultat de la grande expérience en moteurs d'avions de la société SNECMA et s'inscrit dans la longue lignée de turboréacteurs ayant équipés de célèbres avions de combat qui ont fait leurs preuves tel que le Mirage III. Il y a actuellement 535 M53-P2 en service, équipant les Dassault Mirage 2000 de huit nations et totalisant au 31 décembre 1996 quelques 545000 heures d'activité aérienne.

Le M53-P2 est la réponse de la SNECMA à une demande de l'Armée de l'air souhaitant un moteur plus simple, facile à piloter, à maintenir, économique et pouvant effectuer des missions polyvalentes. En effet, ce turboréacteur a été conçu pour effectuer deux types de missions différentes :

- Missions d'interception qui nécessitent une poussée spécifique élevée et une capacité de vol à Mach élevé.
- Missions de pénétration qui nécessitent une faible consommation spécifique.

C'est pour cela que le M53-P2 a un plafond pratique d'utilisation de 18000 m, a une vitesse maximale de Mach 2,2 ou 2340 km/h à 11000 m et permet au Mirage 2000 d'atteindre une vitesse ascensionnelle initiale de 17000 m/mn et de franchir une distance de 1800 km. Outre ses bonnes performances, il offre une maintenance aisée car il est constitué de douze modules qui sont :

1. [Le compresseur basse pression](#)
2. [Le carter principal](#)
3. [Le compresseur haute pression](#)

4. [La chambre de combustion](#)
5. [Le distributeur de turbine haute pression](#)
6. [Les turbines haute et basse pression](#)
7. [Le carter d'échappement](#)
8. [Le diffuseur de postcombustion](#)
9. [Le canal de postcombustion](#)
10. [La tuyère d'éjection](#)
11. [La virole d'entrée d'air](#)
12. [Le calculateur électronique](#)

## Principes de fonctionnement du turboréacteur

Un réacteur peut se diviser en cinq sections principales : l'entrée d'air, le compresseur, la chambre de combustion, la turbine et le canal d'éjection. A celles-là, s'ajoutent le compartiment des accessoires entraînés par la turbine, le circuit carburant, le circuit de démarrage, le circuit de refroidissement, le circuit de lubrification et le circuit d'allumage. L'entrée d'air permet à l'air extérieur de pénétrer à l'avant du moteur. Le compresseur comprime cet air frais avant de la livrer à la chambre de combustion. Là, le carburant est finement pulvérisé (à une pression de 56 bars) et mélangé à l'air du compresseur. Ce mélange est enflammé par un dispositif semblable à celui des bougies d'allumage d'automobiles. Le système d'allumage n'intervient – dans le meilleur des cas – qu'une seule fois par vol la combustion étant auto entretenue. Près des  $\frac{3}{4}$  de l'air ne participe pas à la combustion mais au refroidissement des gaz avant leur arrivée sur la turbine qui ne pourrait supporter des températures proches de  $1800^{\circ}\text{C}$ . La plus grande partie de l'énergie du flux de gaz est absorbée par la turbine qui utilise cette énergie pour entraîner les accessoires et le compresseur. En la quittant, les gaz chauds sont encore suffisamment énergétiques (nous verrons plus tard de quelle énergie il s'agit) pour être projetés à très haute vitesse par le canal d'éjection à l'arrière du moteur. On peut alors faire appel à l'analogie du ballon : le moteur produit une poussée en absorbant une grande masse d'air à l'avant et en la rejetant vers l'arrière à une plus grande vitesse qu'à son entrée dans le compresseur. Il s'agit de la troisième loi de Newton : à toute action correspond une réaction de même amplitude et de sens opposé. Ce qui démontre que ce n'est pas l'air éjecté prenant appui sur l'air extérieur qui provoque le déplacement du ballon.

## Variations de pression au cours du cycle thermodynamique

La forte aspiration au niveau de l'entrée d'air du moteur indique une dépression à ce niveau, imprimée par la rotation du compresseur. Toutefois, et à mesure que la vitesse de l'avion augmente, cette dépression est contrebalancée par la pression dynamique du flux d'air. La pression augmente très fortement au passage des étages successifs du compresseur. Une dernière augmentation de pression a lieu au sein du [diffuseur](#). L'équation de Bernoulli nous permet de conclure en ce sens :

$$\frac{1}{2} \rho_1 V_1^2 + P_1 + \rho_1 G Z_1 = \frac{1}{2} \rho_2 V_2^2 + P_2 + \rho_2 G Z_2$$

En effet la forme du [diffuseur](#) est convergente, la vitesse de l'écoulement va donc diminuer de  $1 \Rightarrow 2$ . L'égalité ne sera donc conservée que si  $\rho$  augmente de  $1 \Rightarrow 2$ . Or  $\rho$  (masse volumique) est le rapport de la masse sur le volume : si  $\rho$  augmente, à masse constante, alors le volume diminue. Le flux est donc comprimé et pénètre ensuite dans la chambre de combustion où il subit une légère diminution de pression. Diminution nécessaire pour entretenir l'écoulement de l'avant vers l'arrière du moteur. La combustion entraîne une très importante dilatation des gaz, d'où une chute brutale de pression et une forte accélération. Le flux de gaz communique à la turbine une

large part de son énergie de pression : en y passant les gaz sont détendus. La chute de pression est alors progressive jusqu'à la pression ambiante.

### Variations de température au cours du cycle thermodynamique

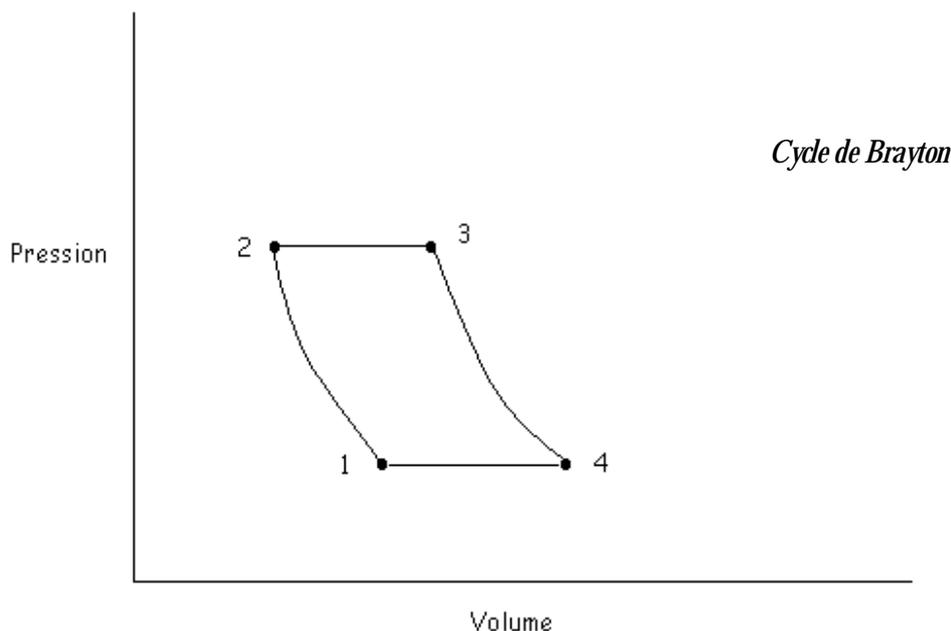
Avec un graphique, il serait aisé d'observer que la courbe de la température suit celle de la pression. L'agitation moléculaire, dont découle la mesure de la température d'un corps, croît en cas de compression, décroît sinon. La variation de température dépend donc totalement de la performance du moteur et des étages de compression. A la sortie de la chambre de combustion, les gaz atteignant une température proche des 1800°C, il faut nécessairement protéger les structures métalliques. C'est l'air non utilisé lors de la combustion qui assure ce rôle en formant un isolation entre la flamme et la peau du réacteur. L'accélération du flux y contribue également. En cas de [postcombustion](#) la température monte en flèche dans le canal d'éjection.

### Variations de vitesse au cours du cycle thermodynamique

Température et pression ne sont en fait qu'au service d'un gain de vitesse puisque l'effet recherché est l'accélération d'un flux d'air circulant au travers du moteur. Constante au travers du compresseur, la vitesse de l'écoulement chute dans le diffuseur selon la même relation que précédemment (cf. page 24 – [équation de Bernoulli](#)). La vitesse augmente dans la chambre de combustion puis au passage de la roue de la turbine (cf. paragraphe [turbine](#)). Cet accroissement se fait au détriment de l'énergie de pression absorbée par les aubes de la turbine pour entraîner le compresseur et les accessoires. La tuyère variable du canal d'éjection apporte également un gain à la vitesse du flux.

### Le cycle du réacteur

Un cycle est une série de transformations qui se suivent et se répètent dans un ordre déterminé. Les moteurs à piston et à réaction fonctionnent selon ces cycles. Les deux moteurs fonctionnent par ailleurs de la même façon : admission, compression, détente, échappement. A la différence que dans le réacteur ces quatre étapes sont simultanées. Chaque phase du cycle se produit donc continuellement, et en outre, elle se produit dans un élément particulier du moteur conçu à cet effet.

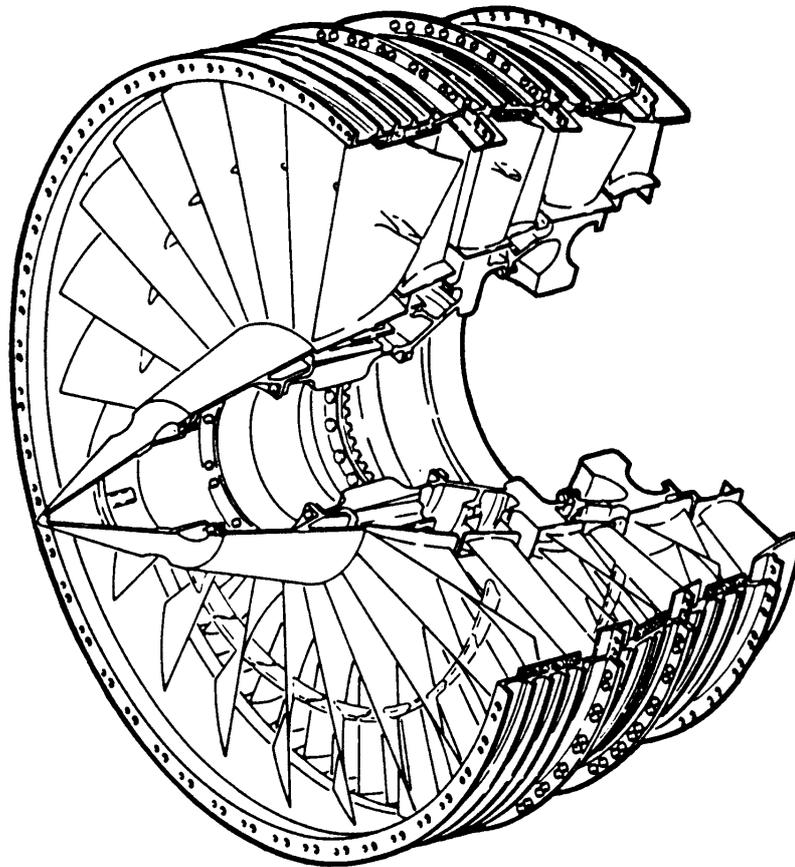


En 1 l'air à pression atmosphérique et à volume constant pénètre dans la manche d'entrée d'air. De 1  $\Rightarrow$  2 l'air entre dans le compresseur : sa pression augmente et son volume diminue. La combustion à pression constante de 2  $\Rightarrow$  3 se traduit par un accroissement brutal de volume. Les gaz ayant un volume accru, mais conservant une pression constante, pénètrent dans la turbine où ils se dilatent ; en conséquence, leur volume augmente et leur pression chute de 3  $\Rightarrow$  4. Les gaz sont alors éjectés par la tuyère : leur volume décroît et leur pression reste constante de 4  $\Rightarrow$  1. Le cycle reprend.

### **La virole d'entrée d'air**

Le canal d'entrée d'air doit être sans détour et sa surface interne rigoureusement lisse afin d'amener la quantité d'air requise au moteur pour une pression maximale. Sa forme est très étudiée afin d'en limiter la [couche limite](#). Le plus souvent, c'est l'emplacement du moteur sur l'aéronef qui détermine la longueur, la forme et la disposition de l'entrée d'air (ce qui explique que ce soit l'avionneur et non le motoriste qui la dessine et construit). L'un des principaux rôles de l'entrée d'air est de convertir l'énergie cinétique de l'écoulement en un champ de pression équilibré à l'avant du compresseur et ainsi éviter le phénomène de pompage. Une entrée d'air supersonique, telle que celle du M 2000, doit fonctionner efficacement dans trois régimes de vitesse : subsonique, transsonique et supersonique. Les difficultés concernent essentiellement les vitesses transsoniques : à ces valeurs, des ondes de chocs anarchiques apparaissent entraînant des pertes de pression et de débit au niveau de l'entrée d'air. Apparaît également un phénomène vibratoire dû à l'ingestion et au rejet à de hautes fréquences de l'onde de choc à l'entrée d'air. Et comme la vitesse de l'air pénétrant dans le compresseur ne peut être – pour des raisons structurelles évidentes – supersoniques, il s'agit de la ralentir dès que l'on approche du Mach. Ce ralentissement ne doit pas cependant entraîner une trop forte perte d'énergie. La configuration habituelle opte alors pour l'ajout d'un corps central ou pointe juste en avant de l'entrée d'air, ce qui maintient l'onde de choc à l'extérieur de la veine et assure une pression dynamique optimale.

## Le compresseur basse pression



Le compresseur d'un réacteur sert à fournir la quantité maximale d'air sous pression qui puisse être chauffée dans l'espace limité de la chambre de combustion. On sait que l'énergie dégagée par la dilatation des gaz est proportionnelle à la quantité d'air consommé. Il apparaît donc que le compresseur est une pièce maîtresse du réacteur. Le M53 est à compresseur axial – par opposition aux compresseurs centrifuges où l'air est accéléré puis comprimé au travers d'un rotor canalisant le flux perpendiculairement à l'axe du moteur. Un compresseur axial est composé de :

1. Un rotor formé par empilage de disques à la périphérie desquels sont fixées des ailettes ou aubes.
2. Un stator, formant le carter du compresseur, à l'intérieur duquel sont implantés des anneaux recevant des aubes.

Un étage du compresseur axial est ainsi constitué d'une grille d'aubes rotor suivie d'une grille d'aubes stator. Le M53 est un réacteur monocorps : c'est-à-dire que compresseurs haute et basse pression tournent à même vitesse (par là même, synchronisation des turbines hp et bp). Le compresseur axial a l'avantage de fournir un taux de compression très élevé tout en assurant un assez bon rendement, il convient mieux pour les avions conçus pour la haute vitesse parce que son maître-couple est petit. Son aubage complexe et très fragile en font un réacteur coûteux où les considérations de rendement et de poussée prennent le pas sur les questions de coût, de simplicité, de souplesse d'utilisation et de maintenance.

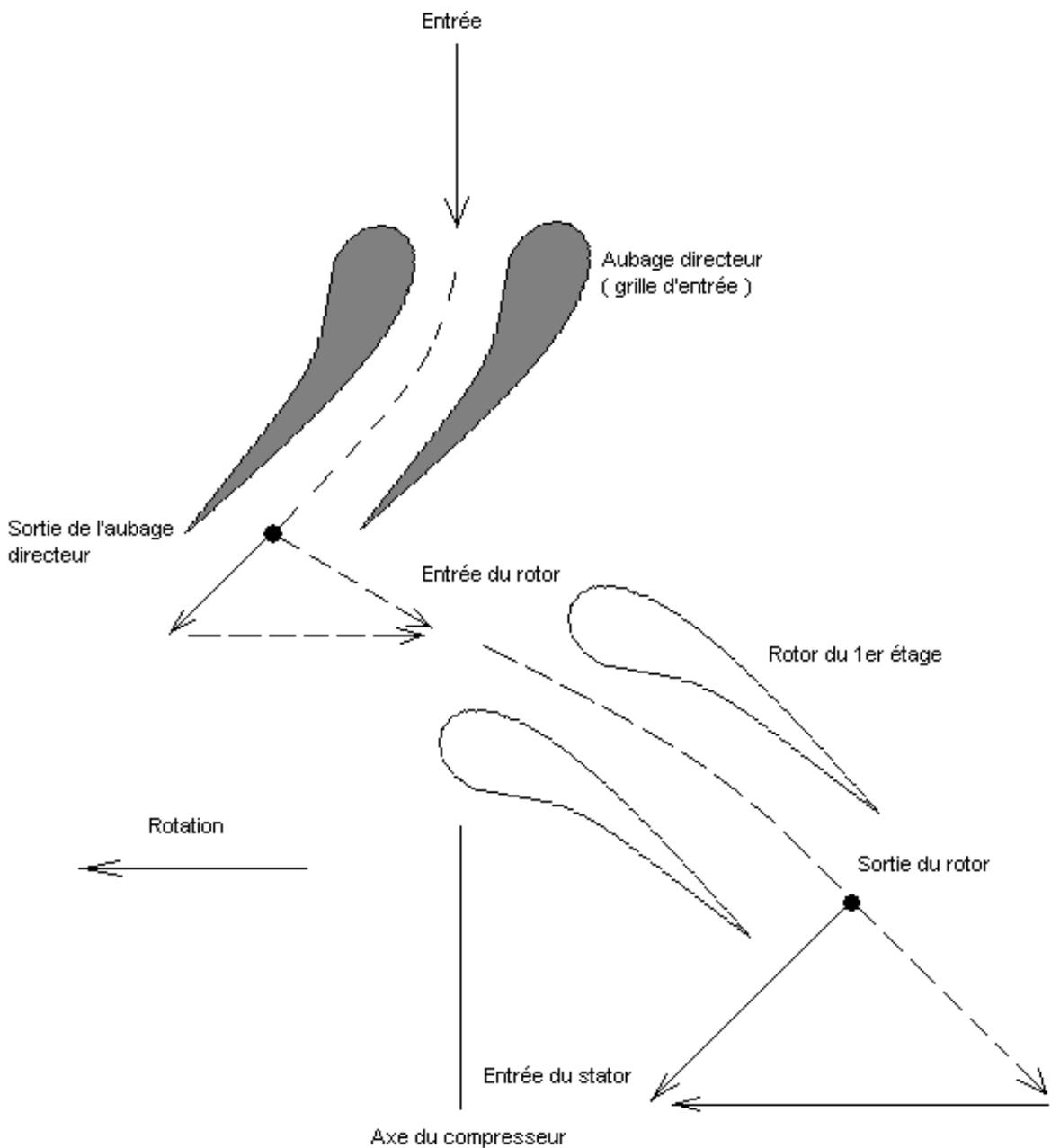
## Etude aérodynamique du compresseur

Le passage entre les aubes – qu'il s'agisse du rotor ou du stator – ont une section qui va en augmentant de l'entrée à la sortie. Elle est dite divergente. Dans un canal de ce type, l'air ralentit et sa pression augmente. Par expérience, on sait que l'écoulement devient instable et que le rendement, par voie de conséquence, est considérablement réduit passé une certaine valeur de la divergence des passages. Le M53 intègre au mieux ces considérations, faisant partie de la première génération de réacteur dont l'aubage ait été modélisé mathématiquement. Afin d'accroître le taux de compression, il faudra alors augmenter le nombre d'étages du compresseur. Le M53 est dit à double flux : l'air du compresseur n'est pas totalement conduit aux chambres de combustion, des vannes de dérivation permettant d'en canaliser une partie – le flux secondaire ou flux froid. Le générateur de gaz chauds est contourné et le bruit est étouffé. Ainsi, à plein gaz sec (sans postcombustion) la température de la couche extérieure du canal d'éjection n'excède pas 50°C, la consommation et le bruit diminue également. Le flux secondaire, qui est encore riche en oxygène peut brûler un supplément de carburant dans les gaz d'échappement de la turbine, qui se trouve à l'arrière du turboréacteur : c'est la postcombustion. Cette postcombustion a la propriété d'augmenter la poussée du turboréacteur double flux.

Composé d'un ensemble d'ailettes, les principes aérodynamiques s'imposent tout naturellement au compresseur. La situation reste malgré tout plus complexe que dans le cas d'un profil isolé, puisque l'écoulement qui rencontre une aube est modifié par la précédente. L'un des principaux problèmes rencontrés par le compresseur est le décrochage. Si l'angle d'attaque, c'est-à-dire l'angle entre l'écoulement et l'aube, devient trop faible, le débit et la compression chute, entraînant de fortes détonations dommageables pour le réacteur : c'est le phénomène de pompage. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour y remédier, la plus courante étant la réduction des angles d'attaque sur les premiers étages pour qu'aux grands angles des faibles régimes ne soient pas des angles de décrochage. Pour cela, les deux premiers étages du compresseur bp sont munis d'ailettes à nageoires.

Les moteurs de générations précédentes connaissaient également de lourdes pertes de charge par phénomène d'usure entre les aubes et le carter (entre rotor et stator). Par l'effet de la force centrifuge, les aubes se dilatant venaient s'user contre le carter entraînant l'apparition d'un entrefer. La [couche limite](#) augmentait alors de même. Désormais le carter (stator) est revêtu d'une surface de dureté faible appelée abradable, s'usant progressivement par abrasion sans dommage pour les aubes rotatives.

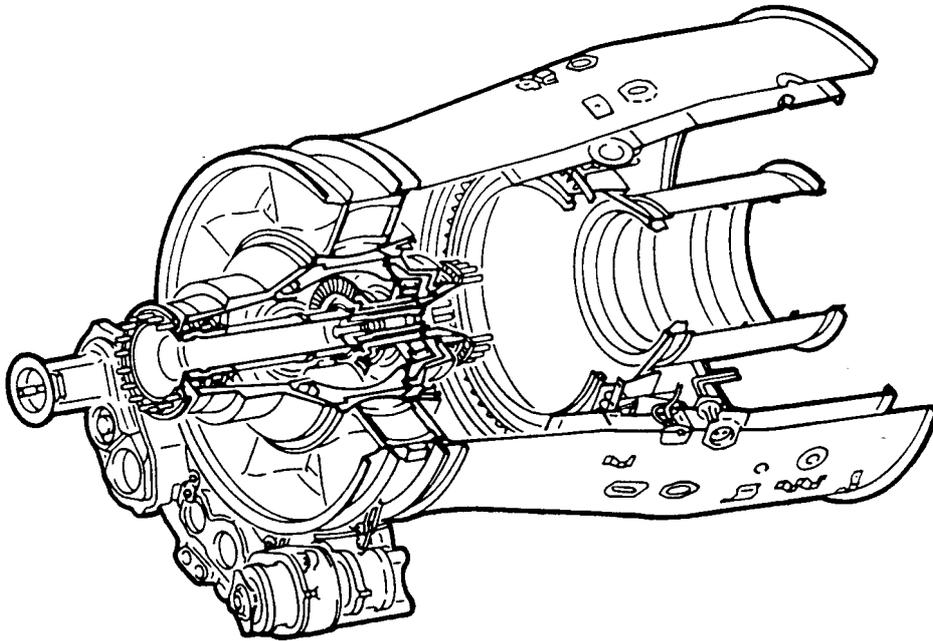
## Analyse vectorielle de l'écoulement à travers un compresseur axial



L'aube directeur de la grille d'entrée ne fait qu'infléchir l'air dans le sens de rotation du rotor, pas de changement en module du vecteur vitesse. Un travail est effectué entre l'entrée et la sortie du rotor : il y a perte de vitesse et augmentation de la pression. En effet l'espace entre les deux aubes du rotor 1<sup>er</sup> étage va en augmentant. Puis la rotation permet de réorienter l'écoulement vers l'entrée du stator.

Ainsi, le passage de chacune des grilles produit une augmentation de pression aux dépens d'une diminution de vitesse, mais le mouvement rotatif redonne à l'air de l'énergie cinétique qui est, à son tour, convertie en énergie de pression.

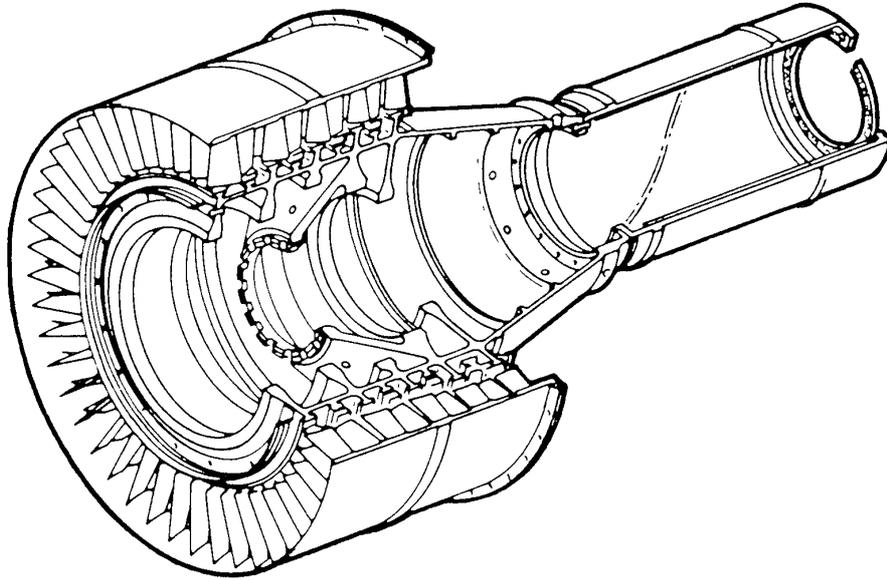
## Le carter principal



Il se décompose en trois carters :

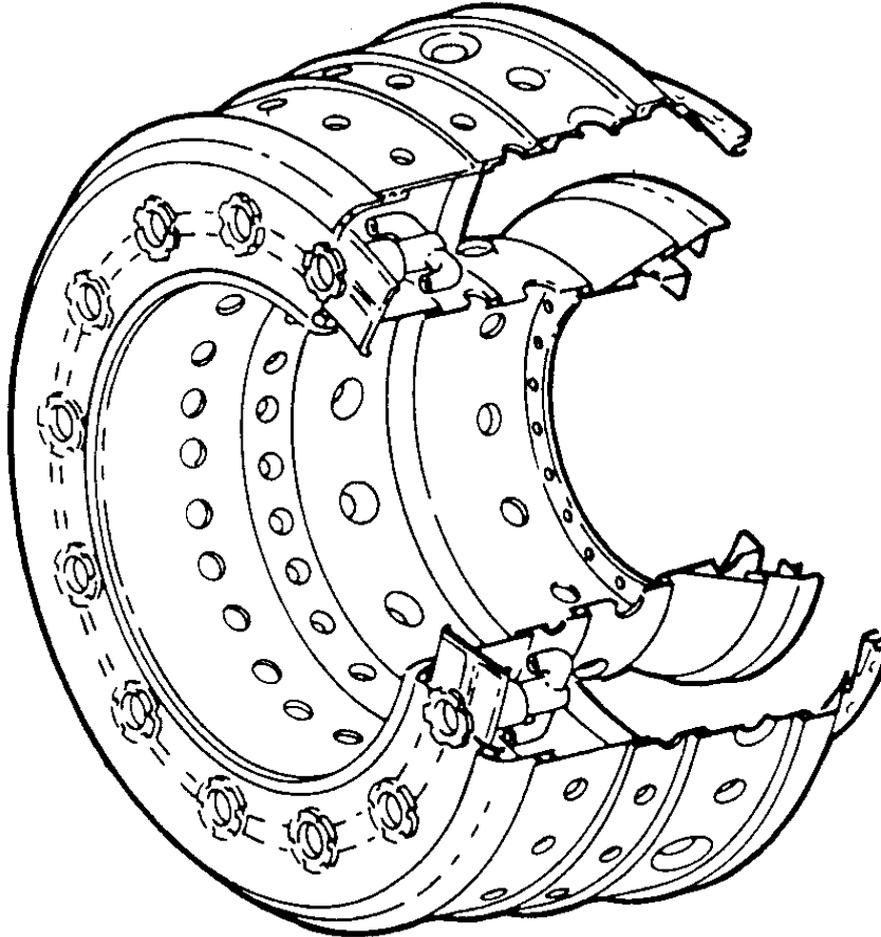
Le **carter intermédiaire** sur lequel viennent se fixer les accessoires avions entraînés par la turbine ; le **carter flux froid** utilisé pour alimenter en kérosène les quatorze injecteurs de chambre de combustion, carter sur lequel est fixé le module 12 : le calculateur. Il dispose également d'orifices pour examens endoscopiques ; le **carter de chambre** composé d'un carter intérieur et d'un carter extérieur de chambre. Ce carter principal contient les conduits de lubrification.

## Le compresseur haute pression



Le rotor est composé de cinq disques supportant cinq étages d'aubes. Un dispositif amortisseur entre les disques 7 et 8 améliore la résistance aux vibrations. Le stator est quant à lui composé d'une enveloppe cylindrique séparant le flux primaire et le flux secondaire et de quatre grilles de redresseurs avec revêtement abrasable. Le stator du compresseur hp mais aussi celui du compresseur bp sont également équipés d'anneaux abrasables afin d'installer un jeu minimum entre les aubes et le stator et ainsi de perdre le minimum de compression. Lorsque le turboréacteur est à l'arrêt, la distance entre l'extrémité des aubes et les stators est de l'ordre du millimètre, alors qu'en fonctionnement les aubes s'allongent à cause de la force centrifuge et creusent un sillon dans les anneaux abrasables. Un temps de rodage est bien évidemment nécessaire. Les aubes des compresseurs hp et bp sont en liaison complète démontable avec les disques des rotors. Ces aubes sont en liaison glissière avec les disques au moyen de queues d'arondes. Elles sont immobilisées d'un côté par une couronne et des vis et de l'autre par un frein que l'on rabat.

## La chambre de combustion



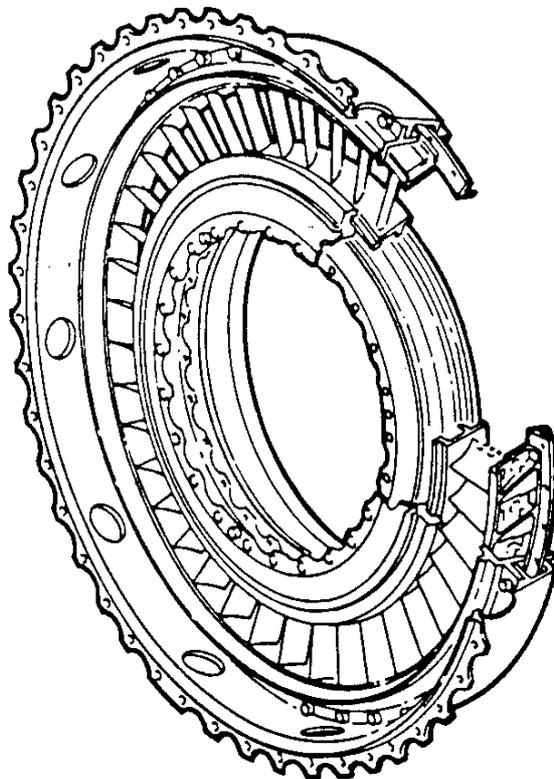
L'un des principaux inconvénients des chambres individuelles est de mal exploiter l'espace disponible dans le moteur. La chambre annulaire du M53, que l'on retrouve sur le M88 de Rafale, semble le meilleur compromis espace – performance. Elle se présente sous la forme de cylindres concentriques dont les axes sont confondus avec celui du moteur. Le carburant finement pulvérisé y est injecté sous pression, l'air sortant du compresseur hp s'écoule autour de l'injecteur et pénètre dans le tube à flamme en traversant la première rangée de trous prévue à cet effet. L'air entrant se trouve projeté vers l'injecteur par des phénomènes tourbillonnaires ce qui plaque la flamme, évitant qu'elle ne décroche. La flamme est donc auto-entretenue. L'air alimentant en oxygène la combustion est appelé air primaire. A l'extrémité de la flamme, la température se situe entre 1800°C et 2000°C. Avant de pénétrer dans la turbine, les gaz doivent être refroidis de moitié, sans quoi les matériaux constituant la turbine ne pourraient résister. Le refroidissement s'obtient par la dilution des gaz chauds dans l'air secondaire, appelé air de refroidissement, qui pénètre dans le tube à flamme en traversant des orifices situés dans la partie arrière. Les parois du tube à flamme doivent aussi être protégées contre les températures élevées de la combustion. A cet effet, d'autres orifices sont percés en différents endroits le long du tube à flamme pour faire pénétrer

de l'air de refroidissement qui crée une séparation fluide entre les gaz chauds et les parois métalliques.

On retiendra qu'une chambre de combustion doit présenter les caractéristiques suivantes :

- un rendement élevé de combustion,
- un fonctionnement stable : continuité de la flamme,
- de faibles pertes de pression : à forte pression correspond une forte dilatation des gaz,
- une répartition uniforme des températures : perte d'énergie en cas de points chauds dans le flux,
- un démarrage facile,
- une petite taille : un maître-couple élevé induit une forte traînée ce qui réduit les performances,
- une faible émission de fumée et de chaleur : pour une meilleure furtivité,
- une formation minimale de carbone : évite l'obstruction des passages d'air.

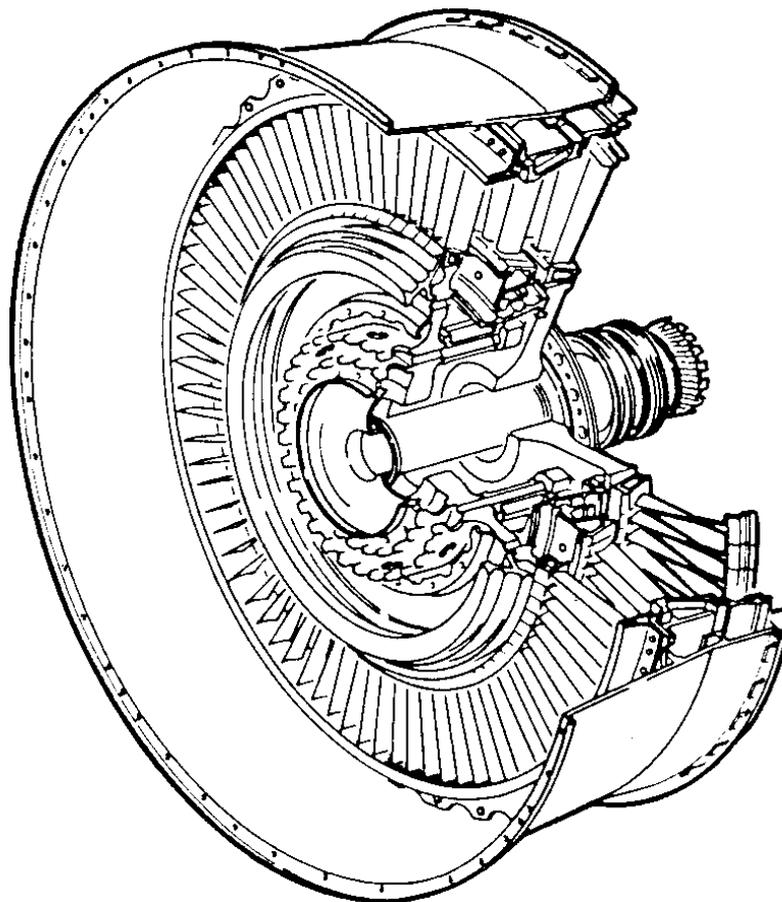
### **Le distributeur de turbine haute pression**



Ce distributeur est supporté par deux viroles coniques, en alliage réfractaire. Ses aubes forgées sont creuses, fixes, refroidies par de l'air secondaire prélevé autour de la chambre de combustion. Le distributeur hp a deux fonctions principales. Il doit tout d'abord convertir une partie de l'énergie thermique et de pression contenue dans les gaz en énergie cinétique de façon que ces gaz attaquent les aubes du rotor avec la force voulue. En second lieu, les aubes distributrices doivent dévier l'écoulement gazeux pour que son impact sur les aubes du rotor se fasse dans la bonne direction. L'angle entre l'écoulement et les aubes (angle d'attaque) doit être celui qui produit la plus grande composante de force dans le plan de rotation. La première opération, la conservation d'énergie, est une application du principe de [Bernoulli](#). Comme dans tout canal convergent, les gaz sont accélérés et une grande partie de leur pression statique se transforme en

pression dynamique. Le rapport de cette transformation dépend du rapport de convergence du passage. La conception des aubes distributrices est délicate. Si le passage est trop petit, l'écoulement s'en trouve réduit, la pression de sortie compresseur augmente et apparaît le phénomène de pompage. L'augmentation de l'espace entre les aubes en atténue les risques mais augmente la consommation spécifique. La seconde opération n'est réalisée que partiellement. En effet, afin de dévier les gaz pour qu'ils attaquent les aubes de la roue dans le bon angle, idéalement, les aubes devraient avoir un calage variable fonction du régime moteur. En pratique leur calage usine est fixe.

### **Les turbines haute et basse pression**



La turbine est de type axial, à deux étages refroidis, elle se compose d'un rotor commun aux aubes hp et bp et d'un distributeur bp. Les deux disques montés sur le rotor sont en alliage réfractaire supportant les aubes hp et bp. La liaison entre le rotor de turbine et l'arbre du compresseur est assurée par un dispositif " curvic coupling ", d'où un turboréacteur à arbre unique. Creuses, toutes les pièces de cette turbine sont refroidies par le flux secondaire.

La turbine a pour rôle essentiel d'entraîner le compresseur et les accessoires en prélevant sur les gaz de combustion à très haute température une partie de leur énergie cinétique et de pression. Ceci entraînant une brusque détente des gaz.

## Le carter d'échappement

Il supporte la partie arrière de l'ensemble mobile et assure la fixation arrière du moteur dans la cellule. Ce carter comprend un anneau de suspension en titane, ainsi que deux carters solidarisés par neuf bras creux, profilés et refroidis, permettant le passage de biellettes de suspension et des servitudes. Et enfin, un détendeur à section variable qui, actionné par un moteur hydraulique permet d'adapter la section du flux secondaire aux conditions de vol conciliant :

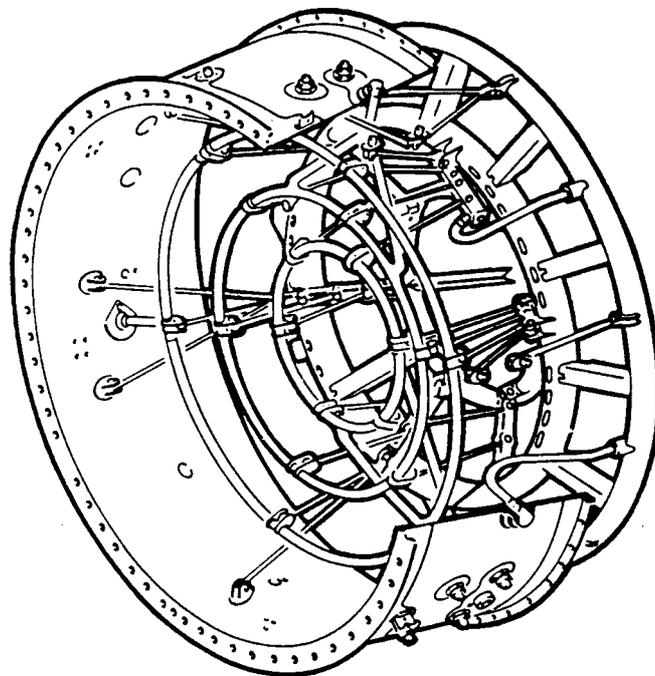
- Marge au pompage (haute altitude, basse vitesse).
- Amélioration de la consommation spécifique à basse altitude et en supersonique.

En ce qui concerne le pompage il en existe deux types :

- Un pompage qui se produit souvent au démarrage, lié aux difficultés de lancement du moteur au sol.
- Un pompage classique qui se manifeste par une diminution du débit de masse instantanée d'air ainsi que l'écoulement qui s'inverse.

Ce détendeur est composé de huit portes qui agissent sur le taux de dilution, c'est-à-dire sur la quantité d'air passant dans le flux secondaire. Le taux de dilution étant la quantité d'air passant dans le flux d'air secondaire divisé par la quantité d'air passant dans le flux primaire. Ce taux de dilution est de 0,36 pour le M53-P2. Le détendeur est fermé lorsque les performances stables sont obtenues : mission de pénétration à vitesse élevée, fort Mach à haute altitude. Il s'ouvre à faible Mach et est « plein ouvert » à forte incidence avion, ce qui augmente la marge au décrochage.

## Le diffuseur de postcombustion



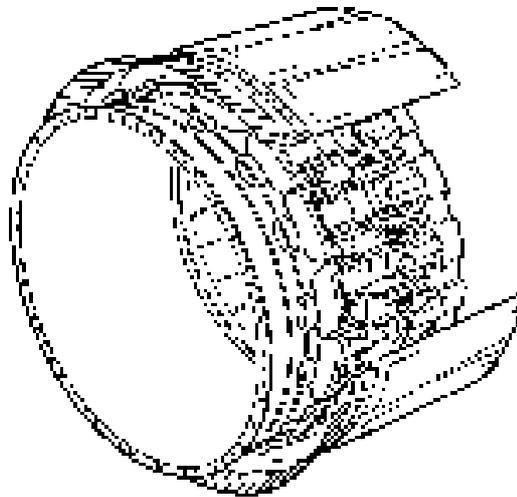
Ce diffuseur est composé d'un ensemble de rampes et d'anneaux brûleurs en alliage réfractaire qui assure l'injection de carburant de postcombustion dans les deux flux. L'air permettant d'alimenter cette deuxième combustion provient du flux secondaire qui n'a pas encore subi de

combustion. Cette postcombustion permet à l'avion d'accroître sa vitesse par une nouvelle dilatation du mélange flux secondaire / carburant.

### **Le canal de postcombustion**

Il est formé d'une enveloppe extérieure en titane et d'une chemise de protection thermique, en alliage réfractaire, ondulée et multiperforée. Les perforations pratiquées dans la chemise de protection sont faites au moyen d'un jet d'eau sous haute pression. L'ondulation a pour rôle d'empêcher la résonance des ondes sonores dues à la PC. Le refroidissement du canal PC se fait par ces multiperforations qui sont alimentées en air par de l'air provenant encore du flux secondaire et qui passe entre l'enveloppe extérieure et la chemise de protection. Le canal est incliné par rapport à l'axe du turboréacteur de façon à avoir un axe de poussée aligné avec l'axe avion. L'inclinaison de l'axe du canal PC avec celui du turboréacteur est de l'ordre d'1°.

### **La tuyère d'éjection**



C'est une tuyère convergente à section variable, constituée de volets chauds et de volets froids. La variation de section se fait au moyen de seize vérins alimentés en carburant et commandés par le calculateur électronique. Le carburant a été choisi à la place de l'huile car il a une vitesse supérieure à l'huile. Sa signature infrarouge est faible grâce aux volets chauds qui ne peuvent être vus de l'arrière et au flux froid entre les volets chauds et les volets froids. Ce flux froid est créé par le vent relatif généré par l'avion en mouvement et pénètre entre les deux types de volets, ce qui a pour effet de mélanger les gaz d'éjection chauds avec de l'air froid.

Dans le canal d'éjection, l'écoulement gazeux à haute pression et à basse vitesse (relativement à la pression et vitesse en sortie de tuyère) provenant de la turbine est accéléré à des vitesses soniques ou supersoniques. L'objectif dans un turboréacteur est de convertir un maximum d'énergie de pression en énergie cinétique pour augmenter la quantité de mouvement des gaz et augmenter, par conséquent, la poussée induite. Mais le rôle du canal est aussi de réduire les tourbillons présents dans les gaz sortant de la turbine de façon à produire la plus grande composante de force axiale possible.

Aux nombres de Mach élevés, on observe que le rapport des pressions des gaz d'une extrémité à l'autre du canal d'éjection devient supérieur à 2 et il se produit une perte de rendement, à moins que la pression puisse être convertie en vitesse avant que les gaz ne quittent la tuyère. Pour y parvenir et puisque la vitesse maximale des gaz dans la partie convergente d'une tuyère est limitée à la vitesse du son, il faut utiliser une tuyère convergente-divergente. Dans la partie divergente, la

vitesse des gaz augmente et dépasse celle du son. En effet, les molécules ne peuvent être poussées par la pression derrière elles ; la seule façon de les accélérer ne peut provenir que de l'augmentation du volume des gaz vers l'arrière et dans le sens radial. La partie divergente d'une tuyère convergente-divergente permet la dilatation radiale, mais elle la contient de façon que celle-ci s'effectue vers l'arrière à partir des parois latérales de la tuyère divergente. En d'autres termes, la partie divergente accélère l'écoulement jusqu'à des vitesses supersoniques en contenant la dilatation des gaz de sorte qu'elle s'effectue vers l'arrière et non radialement où elle serait perdue.

A cela peut être faite l'analogie d'une balle dans un cône divergent : une balle enduite de graisse et introduite dans un cône divergent produit une poussée de sorte que la balle tend à sortir. L'écoulement supersonique, ou compressible, dans un canal divergent subit une augmentation de vitesse dans la plage des vitesses supersoniques, une diminution de pression et de masse volumique.

En plus de former une forme aérodynamique adéquate pour l'écoulement supersonique, la tuyère à section variable peut aussi améliorer les performances du moteur, et assurer une plus grande souplesse d'utilisation pour le pilote. Elle est également le lieu où le bruit produit par le mélange des gaz très chauds et de l'air ambiant peut être atténué. Certains atténuateurs tels que ceux rencontrés dans le M53 sont conçus pour admettre à travers les ondulation du métal un écoulement d'air secondaire qui se mélange aux gaz éjectés. Avec ce dispositif, le mélange s'effectue plus rapidement et amoindrit les turbulences.

### **Le calculateur électronique**

Le boîtier du calculateur est calorifugé, refroidi par air, il est fixé sur le carter principal au moyen d'amortisseurs. La régulation du turboréacteur par le calculateur est dite " pleine autorité ", c'est-à-dire que le pilote, forçant une commande incohérente ou incompatible avec les conditions actuelles de vol, n'obtiendra aucune réaction de l'appareil. Il n'y a donc pas de restrictions de manette.

Le calculateur assure les fonctions de :

- Régulation principale.
- Régulation de la tuyère et du détendeur à section variable.
- Régulation de la postcombustion.

Il est également équipé d'un circuit autotest intégré, chargé de contrôler le fonctionnement des circuits et de faciliter les opérations de maintenance.

### **Système de contre-mesures du M 2000**

Pour tout avion militaire, la furtivité est vitale. Qu'elle soit radar, thermique ou sonore elle est constamment remise à jour. Le Mirage 2000 est doté du système de brouillage et de contre-mesures le plus élaboré après le Rafale :

- Un radar SERVAL (THOMSON CSF)
- Un détecteur brouilleur SABRE (ESD)
- Un système de leurres type SPIRALE (MATRA BAE)

Un radar (RADio Detection And Ranging) est un système qui envoie une onde électromagnétique et reçoit les ondes réfléchies par les objets qui s'y trouvent, permettant ainsi de détecter leur existence et de déterminer certaines caractéristiques de ces objets, par exemple : la position horizontale des objets, leur altitude, leur vitesse, leur forme.

Un radar "classique" est constitué d'un émetteur, d'une antenne et d'un récepteur muni d'un système de visualisation. L'émetteur lance à intervalles réguliers (par exemple, toutes les millisecondes) des signaux très brefs (par exemple, de 1 microseconde), à une fréquence donnée correspondant à une longueur d'onde variant, selon les applications, entre quelques mètres et quelques millimètres. Le signal n'est pas omnidirectionnel : l'antenne du radar, qui agit comme un projecteur, concentre l'émission dans une zone très étroite de l'espace, soit dans un cône de faible ouverture au sommet (de l'ordre de 1 degré), soit dans un dièdre de faible ouverture (également de l'ordre de 1 degré). C'est ainsi que sont illuminés, d'autant plus faiblement qu'ils sont plus loin, les objectifs situés dans le champ de l'antenne. Ces objectifs réfléchissent les signaux reçus, et l'antenne capte les échos avec un retard par rapport à l'émission, retard d'autant plus grand que les objectifs sont plus lointains. C'est ainsi que l'écho reçu d'un objectif distant de 75 kilomètres sera décalé de 0,5 milliseconde par rapport à l'émission.

### ***Radar de veille.***

Un radar de veille utilise une antenne qui tourne régulièrement autour d'un axe vertical et illumine à un instant donné un dièdre d'arête verticale, c'est-à-dire une faible zone en azimuth autour de l'antenne, ce qui permet de mesurer l'azimut des objectifs détectés. La distance (radiale) des objectifs étant également mesurée, on en déduit la position horizontale d'un objectif, c'est-à-dire la position géographique du point à la verticale duquel il se trouve. Les objectifs sont alors « visualisés » sur un écran circulaire de télévision, sous forme de points lumineux dont l'emplacement correspond à la position horizontale des objectifs (le radar étant situé au centre de l'écran, par exemple). Certains de ces radars sont assez perfectionnés pour mesurer également l'altitude des objectifs : on les désigne alors sous le nom de radars de veille tridimensionnels.

### ***Radar de poursuite.***

Un radar de poursuite utilise une antenne qui illumine à un instant donné une très faible zone de l'espace autour d'un axe qui peut, par des mouvements appropriés de l'antenne (au moyen d'une mécanique d'autant plus complexe qu'elle est plus précise), être dirigé vers n'importe quel point de l'espace. Cet appareil est équipé de servomécanismes qui lui permettent de maintenir l'axe de l'antenne dans la direction d'un objectif donné et donc de suivre (de « poursuivre ») cet objectif quels que soient les mouvements de celui-ci. On connaît ainsi en permanence, à la sortie du radar, la position de l'objectif. De tels systèmes sont utilisés pour poursuivre les missiles lancés des champs de tirs et, dans les applications militaires, pour « s'accrocher » à un avion hostile et guider les canons de défense antiaérienne ou les missiles envoyés pour le détruire.

### ***Radars à " balayage électronique ".***

Pour choisir la zone éclairée par l'antenne d'un radar classique, il faut la faire tourner de la direction déjà analysée à la nouvelle direction choisie. À cause de l'inertie de l'antenne, ce ne peut être qu'un mouvement continu et lent ne permettant pas facilement de s'arrêter dans les zones intéressantes. Avec un radar équipé d'une antenne illuminant un dièdre de 0,360 degré d'ouverture, tournant à six tours par minute, on connaît la position géographique des cibles toutes les 10 secondes. Le temps passé sur une cible est de 10 ms, avec dix ou cent cibles. Si, en présence de dix cibles, l'antenne radar était capable de passer immédiatement d'une direction à

une autre, on disposerait d'une seconde par cible avec la même cadence de renouvellement des informations. Chaque cible pourrait donc recevoir la puissance du radar pendant cent fois plus de temps (elle recevrait donc 100 fois plus d'énergie), ce qui permettrait soit de réduire par 100 la puissance de l'appareil, soit de multiplier par plus de 3 la portée du radar. Le problème est donc de s'affranchir de l'inertie mécanique de l'antenne : il faut pouvoir, l'antenne restant fixe, modifier quasi instantanément la direction du rayonnement. Or l'onde électromagnétique émise par le radar est cohérente, comme l'est la lumière fournie par un laser, ce qui implique que la direction du rayonnement est celle pour laquelle toutes les vibrations émanant de l'antenne sont en phase. En d'autres termes, un observateur A, situé dans cette direction et assez loin de l'antenne, « voit » toutes les vibrations qui lui arrivent des différents points de l'antenne augmenter et décroître rigoureusement en même temps, alors qu'un observateur B, situé dans une autre direction, reçoit des différents points de l'antenne des vibrations déphasées, certaines vibrations étant dans un sens quand d'autres sont dans un autre, l'ensemble s'annulant pratiquement. Si l'on veut que l'antenne rayonne vers B, il suffit de modifier au départ les phases relatives des vibrations électromagnétiques émises par les différents points de l'antenne, de façon qu'elles soient en phase lorsqu'elles arrivent à l'observateur B. Pour cela, on tapisse l'antenne projecteur de dispositifs modificateurs de phase, dits déphaseurs, dont on peut commander à volonté et instantanément le déphasage qu'ils introduisent, pour modifier instantanément la direction du rayonnement de l'antenne. On sait réaliser de tels déphaseurs réagissant en des temps de l'ordre de la microseconde, par exemple en utilisant des aimants artificiels particuliers dits « ferrites » ou des dispositifs spécifiques à semi-conducteurs. Une antenne ainsi équipée de déphaseurs et de leur système de commande, est appelée « à balayage électronique ». Avec une telle antenne, on est capable de modifier la forme du diagramme de rayonnement (et non seulement sa direction), pour passer par exemple d'un rayonnement à dièdre d'arête verticale à un rayonnement conique autour d'une direction quelconque, transformant ainsi instantanément un radar de veille en radar de poursuite.

Avec un tel dispositif, il est nécessaire de piloter les diagrammes de rayonnement de l'antenne par un ordinateur qui, en plus, pourra facilement mettre en œuvre des fonctions de corrélation, de filtre à compression d'impulsion, d'émissions en polarisation circulaire, de gestion des effets Doppler-Fizeau, de manière à pouvoir, en fonction des résultats escomptés, éliminer les parasites et faire le tri des échos.

Un exemple d'utilisation de ordinateur dans les systèmes de détection par radar peut être donné par le contrôle de la navigation aérienne qui nécessite de volumineux logiciels opérant en « temps réel ». On détecte jusqu'à cinq cents avions dont les trois coordonnées peuvent être mesurées avec précision; d'autres informations sont parfois fournies (indicatif d'identification, puissance de l'écho, etc.). Aucun opérateur humain ne serait à même d'exploiter cette énorme quantité d'informations ; seul un système informatique le peut, en stockant les informations obtenues par le radar et en faisant les calculs (cap et vitesse des cibles par exemple) utiles pour présenter à l'utilisateur les renseignements dont il a besoin à un instant donné, et dont la nature change au cours du temps.





# Conclusion

## Dans les étoiles ?

Depuis plusieurs mois, il était projeté de modéliser les Visites Périodiques des Mirage 2000-N sous Ms Project afin, à terme, de réorganiser les ressources des ateliers, sujettes à de multiples incertitudes (matériels et personnels). On assiste, à l'échelle nationale, à un allongement des durées de maintenance, ceci venant perturber les ordres de missions. Les crédits n'étant pas infinis, c'est sur le paramètre de la gestion et de l'organisation que le projet devait intervenir. L'ambition peut paraître énorme, surtout menée sans expérience a priori. Connaître le matériel, le Mirage 2000 en l'occurrence, connaître le personnel et le comprendre, devancer ses appréhensions face à un tel outil en précisant ces buts et applications (il ne s'agissait pas d'un moyen de contrôle), puis concrétiser les attentes de chacun par un outil crédible et cohérent ; ceci aurait pu être le déroulement idéal, mais le temps n'y était pas favorable. En entamant la modélisation, je ne prétendais pas maîtriser tous ces facteurs humains et techniques et ai ainsi axé ce travail sur la manipulation du logiciel et la connaissance relative de l'avion, résumée en seconde partie. Il en résulte un outil nécessitant l'implication des personnels compétents à le faire évoluer, afin d'atteindre pleinement le but recherché par le commandement de la base. Outre une modification fastidieuse pour les raisons énoncées, sa dernière version permettait néanmoins une projection à long terme efficace. Elle saurait être, sinon un complément, du moins un successeur aux plans de charges actuellement utilisés sous Ms Excel.

Une première expérience dans cet environnement est une chance. Toutes les images me resteront. J'espère avoir satisfait l'ensemble des personnes qui m'ont accompagné de leur bienveillance, et ainsi justifié la faveur dont j'avais fait l'objet. Chacun aura été pour moi une raison de devenir meilleur dans cette réalisation ; j'entends saluer longtemps les professionnels de l'Armée de l'Air pour leur sens du partage et leur fraternité.

# Bibliographie

## **Pour les photographies d'époques et l'historique de la BA 116 :**

Le site internet du Ministère de la Défense [www.defense.gouv.fr](http://www.defense.gouv.fr), ainsi que le site <http://commandosdelair.free.fr> consacré à l'histoire de l'aviation française.

## **Pour l'organisation de l'Armée de l'Air et de l'ESTS :**

Le site internet du Ministère de la Défense [www.defense.gouv.fr](http://www.defense.gouv.fr), sans oublier les explications du Capitaine Fournier. Présentation de l'ESTS aux visiteurs civils.

## **Pour les photographies et graphiques des activités de l'ESTS :**

Source interne de l'atelier avion.

## **Pour les définitions et réflexions sur l'activité de planification :**

« La conception de systèmes spatiaux » (tomes 1 & 2)  
par Serge Potteck aux éditions du Schémectif.

## **Pour la réalisation des tableaux « ressources », « tâches »... du plan de charge :**

« Ms Project 2002 » aux éditions ENI.

## **Pour l'étude des postes CND :**

Cahiers de formation aux CND (1<sup>ère</sup> et 2<sup>e</sup> année).  
Le site [www.mat.ensmp.fr](http://www.mat.ensmp.fr).  
Le site [www.jobinyvon.fr](http://www.jobinyvon.fr) pour le contrôle spectrométrique des huiles.

## **Pour l'étude et les graphiques du réacteur M53-P2 :**

« Les réacteurs » aux éditions Modulo.  
L'excellent site [www.aviation-fr.info](http://www.aviation-fr.info) réalisé par un petit groupe de passionnés.  
La rubrique moteur du site [www.snecma.com](http://www.snecma.com).  
Pour les graphiques des modules [http://membres.lycos.fr/ba103/moteur\\_moteur.htm](http://membres.lycos.fr/ba103/moteur_moteur.htm).

## **Pour l'étude du radar :**

Toujours [www.aviation-fr.info](http://www.aviation-fr.info).  
Le site de l'équipementier [www.thales.com](http://www.thales.com).  
Source SNA.

# Lexique

**Chantier de modifications :** Ordre de maintenance concernant une pièce ou un matériel embarqué, jugé obsolète ou dont le renouvellement sur l'ensemble des appareils s'est révélé nécessaire.

**Chemin critique :** cf. ' Réseau PERT '.

**Couche limite :** Couche d'air ralentie comprise entre la surface du corps et la limite de l'écoulement non ralenti.

**Diffuseur :** Zone en divergence canalisant le flux d'air du compresseur à la chambre de combustion.

**Maître-couple :** projection du réacteur sur un plan perpendiculaire à son axe longitudinal. Plus il est grand plus la traînée induite est importante, avec des phénomènes amplifiée en cas de prise d'incidence.

**NTI1 :** Niveau technique d'intervention 1

Il a pour but la mise en œuvre des avions disponibles ( prêts à voler ). Chaque escadron de chasse est chargé de ces interventions.

**NTI2 :** Niveau technique d'intervention 2

Il s'agit de la maintenance bisannuelle des avions. Elle incombe à l'Escadron de Soutien Technique Spécialisé de la BA 116.

**NTI3 :** Niveau technique d'intervention 3

Intervient tous les 9 ans, chez l'industriel.

**Postcombustion :** Combustion supplémentaire réalisée directement dans le canal d'éjection en mélangeant aux gaz du carburant pour augmenter la poussée du réacteur. Dans cette configuration, la consommation en carburant passe de 2000 à 22 000 L/H.

**Quadriptyque :** Un projet qui prend en charge le développement d'un produit est responsable du quadriptyque composé : 1) des performances du produit en fonctionnement opérationnel ; 2) de son coût de développement ; 3) De son délai de réalisation ; 4) Des risques inhérents au projet et à l'utilisation du produit.

**Rendement :** Rapport entre l'énergie mécanique produite et l'énergie thermique fournie au système.

**Réseau PERT :** Le sigle PERT provient de l'anglais « program evaluation and review technic ». L'ensemble des tâches d'un projet peut être structuré selon un graphe faisant apparaître la filiation des tâches. Ce graphe est sans cycle, c'est-à-dire qu'il n'existe aucun chemin permettant de revenir à une tâche. Moyennant la connaissance de la durée de chaque tâche, on peut calculer la durée minimum du projet, puis ajuster en conséquence les dates de début et de fin de chaque tâche. Il existe alors au moins un chemin dans ce graphe, traversant de bout en bout de projet, tel qu'un retard de l'une quelconque des tâches situées sur ce chemin entraînerait nécessairement un retard de l'ensemble du projet. C'est le chemin critique.

# Annexes

## Guide d'utilisation

### Modélisation des Visites Périodiques 5 et 6 Mirages 2K-N

#### 1 – Dans le cas d'une utilisation non croisée ( type plan de charges )

Utiliser dans ce cas les fichiers 'Projet VP5\_global' et 'Projet VP6\_global', afin de procéder à une évolution des liaisons entre les tâches ou de leur durée, de leurs affectations, ou des tâches elles-mêmes. On peut envisager l'intégration des chantiers de modifications '13xx' dans le but d'obtenir un retour sur expérience des délais réels nécessaires aux opérations.

#### 2 – Dans le cas d'une utilisation croisée

Une petite manipulation est alors nécessaire :

- ➔ Pour le premier avion à intégrer au plan de charges, ouvrir 'Projet VP5\_global' ou 'Projet VP6\_global'. Dans la barre de tâches, cliquer sur 'Tâches', puis 'Définir le projet' et entrer la date de début souhaité du chantier de VP. Modifier dans le diagramme le nom ( 'VP avion xxx' au lieu de 'Projet VP5\_global' ). Enregistrer le fichier ainsi modifié sous un nouveau nom ( VP\_av\_349... ). Fermer 'Projet VP5\_global'.
- ➔ Pour les avions suivants, ouvrir le fichier du premier avion ( ici 'VP\_av\_349' ). Rouvrir 'Projet VP5\_global' ou 'Projet VP6\_global'. Indiquer les dates de début ( 'Tâches' puis 'Définir le projet' ), modifier le nom, puis dans la barre d'outil cliquez sur 'Outils' puis 'Partage des ressources' et cocher 'utiliser les ressources de Projet VP5/6\_global'. Enregistrer le fichier ainsi modifié sous un nouveau nom.
- ➔ Toujours agir ainsi, avec fichier du 1er avion ouvert pour pouvoir partager les ressources entre les différentes VP.
- ➔ Création du planning - plan de charges : Une fois tous les avions modélisés, fermer tous les fichiers. Créer un nouveau document, puis cliquez sur 'insérer' dans la barre des tâches, 'projet', sélectionnez alors le projet ( l'avion ) à insérer dans le plan de charges. Répéter pour chaque avion. On obtient alors un planning où chaque OM se situe dans le temps que vous avez fixé en (2). Vous pouvez voir si les ressources ainsi partagées sont sur utilisées ou non. Enregistrer. Pour relancer le fichier du planning, il vous faudra ouvrir en premier lieu le fichier VP du 1er avion saisi qui constitue la base où les ressources sont puisées. Dès lors, dès chaque modification, il vous sera demandé si les modifications du fichier 'plan de charges' et des fichiers de VP des avions doivent être enregistrées : cliquez oui pour tout. En effet, l'agencement entre les VP induira nécessairement des modifications sur l'OM de tel ou tel avion.