



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE LA DÉFENSE

BEAD-air

Bureau enquêtes accidents défense air

RAPPORT

D'ENQUÊTE DE SÉCURITÉ



BEAD-air-A-2014-010-A

Date de l'événement	12 mai 2014
Lieu	Ozerailles (Meurthe et Moselle)
Type d'appareil	Mirage 2000-5F
Immatriculation	n°70 F-UGAD
Organisme	Armée de l'air
Unité	Escadron de chasse 01.002 « Cigognes »

AVERTISSEMENT

COMPOSITION DU RAPPORT

Les faits, utiles à la compréhension de l'événement, sont exposés dans le premier chapitre du rapport. L'analyse des causes possibles de l'événement fait l'objet du deuxième chapitre. Le troisième chapitre tire les conclusions de cette analyse et présente les causes retenues. Enfin, des recommandations de sécurité sont proposées dans le dernier chapitre. Sauf précision contraire, les heures figurant dans ce rapport sont exprimées en heures locales.

UTILISATION DU RAPPORT

L'unique objectif de l'enquête de sécurité est la prévention des accidents et incidents sans détermination des fautes ou des responsabilités. L'établissement des causes n'implique pas la détermination d'une responsabilité administrative civile ou pénale. Dès lors toute utilisation totale ou partielle du présent rapport à d'autres fins que son but de sécurité est contraire à l'esprit des règlements et relève de la responsabilité de son utilisateur.

CREDIT PHOTOS ET ILLUSTRATIONS

Page de garde : Sirpa-air

Photos :

- BEAD-air : pages 13 à 15, 28, 29, 30, 33, 35, 49.
- SIAé / AIA Bordeaux : pages 29, 50 à 71.

Illustrations :

- BEAD-air : pages 7, 14, 16, 22 à 26, 28, 30 à 33, 44, 45, 49, 73.
- SIAé / AIA Bordeaux : pages 45, 49, 51, 54, 58, 63, 65.
- DGA-EP : page 74.

TABLE DES MATIERES

AVERTISSEMENT	2
CREDIT PHOTOS ET ILLUSTRATIONS	2
TABLE DES MATIERES	3
1. Renseignements de base	7
1.1. Déroulement du vol	7
1.2. Tués et blessés	9
1.3. Dommages à l'aéronef	9
1.4. Autres dommages	9
1.5. Renseignements sur le personnel	10
1.6. Renseignements sur l'aéronef	10
1.7. Conditions météorologiques	12
1.8. Aides à la navigation	12
1.9. Télécommunications	12
1.10. Renseignements sur l'aérodrome	12
1.11. Enregistreurs de bord	12
1.12. Renseignements sur l'épave et sur la zone de l'impact	13
1.13. Renseignements médicaux et pathologiques	17
1.14. Incendie	17
1.15. Questions relatives à la survie des occupants	17
1.16. Essais et recherches	18
1.17. Renseignements sur les organismes	18
1.18. Renseignements supplémentaires	18
1.19. Techniques spécifiques d'enquête	18
2. Analyse	19
2.1. Séquence chronologique de l'événement et exploitation des données enregistrées	19
2.2. Résultats des expertises	22
2.3. Hypothèses liées à l'apparition des contraintes vibratoires anormales sur le système de transmission	25
2.4. Scénario possible de l'événement	34
2.5. Causes possibles d'un desserrage des différentes liaisons de l'arbre de transmission flexible	34
3. Conclusion	39
3.1. Éléments établis utiles à la compréhension de l'événement	39
3.2. Scénario et causes possibles de l'événement	40
4. Recommandations de sécurité	41
4.1. Mesures de prévention ayant trait directement à l'événement	41
4.2. Mesures de prévention n'ayant pas trait directement à l'événement	42
ANNEXES	43
ANNEXE 1 RESTITUTION DES PARAMETRES SIGNIFICATIFS	44
ANNEXE 2 ANALYSE CHRONOLOGIQUE DES ALARMES ET DES ANOMALIES	46
ANNEXE 3 EXAMENS DETAILLES EFFECTUES SUR LE GTR ET LES ELEMENTS PERIPHERIQUES	49
ANNEXE 4 EXAMEN DE LA TRANSMISSION PMA-RELAIS D'ACCESSOIRES	56
ANNEXE 5 APPARITION D'UN PHENOMENE « WHIRL »	73
ANNEXE 6 MECANISME DU FEU DANS LE TUNNEL REACTEUR	74

GLOSSAIRE

AIA	atelier industriel de l'aéronautique
CCS	centre de coordination et de sauvetage
CDC	centre de détection et de contrôle
CT	carte de travail
EC	escadron de chasse
EM	électro magnétique
FDR	<i>flight data recorder</i> – enregistreur de vol
GTR	groupe turboréacteur
NSI	niveau de soutien industriel
NSO	niveau de soutien opérationnel
PMA	prise de mouvement avion
PC	postcombustion
RM	roue mobile
RPL	réservoir pendulaire largable
SDIS	service départemental d'incendie et de secours
VH	visite hebdomadaire

SYNOPSIS

Date et heure de l'événement : 12 mai 2014 à 16h10.
Lieu de l'événement : commune d'Ozerailles (Meurthe et Moselle)
Organisme : armée de l'air
Commandement organique : commandement des forces aériennes (CFA)
Unité : escadron de chasse (EC) 01.002 « Cigognes »
Aéronef : Mirage 2000-5F n°70
Nature du vol : entraînement à la mission de défense aérienne
Nombre de personnes à bord : 1

Résumé de l'événement selon les premiers éléments recueillis

Une patrouille de deux Mirage 2000-5F décolle de la base de Luxeuil le 12 mai 2014 dans l'après-midi pour une mission d'entraînement à la défense aérienne en zone TSA 200. Après vingt minutes de vol, le pilote de l'avion leader est confronté à une avarie majeure en haute altitude conduisant à la perte de contrôle de son appareil et le contraignant à l'éjection.

Composition du groupe d'enquête de sécurité

- Un directeur d'enquête de sécurité du bureau enquêtes accidents défense air (BEAD-air).
- Un enquêteur adjoint au directeur d'enquête de sécurité (BEAD-air).
- Un sous-officier épaviste (BEAD-air).
- Un enquêteur de première information (EPI).
- Un officier pilote ayant une expertise sur Mirage 2000.
- Un officier mécanicien ayant une expertise Mirage 2000.
- Un médecin du personnel navigant.
- Un officier parachutiste d'essai.

Autres experts consultés

- Direction générale de l'armement – essais propulseurs / Division analyse et investigations (DGA-EP/DAI).
- Service industriel de l'aéronautique (SIAé), atelier industriel de l'aéronautique de Bordeaux (AIA BX).
- SNECMA (groupe SAFRAN), constructeur du groupe turbo réacteur (GTR) M53-P2.
- Dassault Aviation, avionneur du Mirage 2000-5F.

Déclenchement de l'enquête de sécurité

Le BEAD-air a été prévenu par le bureau maîtrise des risques de l'armée de l'air le 12 mai 2014 vers 16h40.

Un EPI a été désigné et s'est rendu sur le site de l'accident le 13 mai dans la matinée. Le groupe d'enquête s'est rendu sur le site le même jour et a été scindé en deux équipes : l'une est restée sur le site, l'autre a procédé à l'interview du pilote à l'hôpital des armées de Metz puis s'est rendue sur la base de Luxeuil.

PAS DE TEXTE

1. RENSEIGNEMENTS DE BASE

1.1. Déroulement du vol

1.1.1. Mission

Indicatif mission : Maraud Tango

Type de vol : circulation aérienne militaire tactique (CAM T)

Type de mission : entraînement à la mission de défense aérienne en patrouille sur plastron¹

Point de départ : Luxeuil

Heure de départ : 15h51

Point d'atterrissage prévu : Luxeuil

1.1.2. Déroulement

1.1.2.1. Préparation du vol

Le vol est programmé le 12 mai 2014 pour une patrouille légère de Mirage 2000-5 et consiste en un entraînement à la mission de défense aérienne en zone TSA200² sur un Alphajet plastron décollant de Dijon. La préparation est effectuée en début d'après-midi en relation avec le pilote de l'Alphajet. Le briefing abordant tous les aspects du vol est effectué au sein de la patrouille une heure avant le décollage.

La visite pré-vol est effectuée en présence de deux mécaniciens.



Zone d'entraînement et impact

¹ Engagement en patrouille légère sur plastron avec identification visuelle

² En TSA 200, la mission est sous le contrôle radar continu du centre de détection et de contrôle (CDC) de Drachenbronn.

1.1.2.2. Description du vol et des éléments qui ont conduit à l'événement

La mise en route, les tests et le roulage se déroulent sans incident. Les appareils décollent en piste 29, effectuent une montée initiale puis un transit direct vers la zone TSA200 au niveau 285.

La patrouille réalise une identification au niveau 250, une interception au niveau 300 avec tir fictif du leader sur le plastron puis s'éloigne vers l'est pour se repositionner.

L'interception est effectuée en régime postcombustion (PC).

1.1.2.3. Reconstitution de la partie significative de la trajectoire du vol

En éloignement vers l'est et en descente vers le niveau 280, la PC est coupée à 280 nœuds environ et la manette des gaz est laissée en position plein gaz sec.

Quelques secondes plus tard, le pilote de l'avion leader perçoit une détonation à l'arrière de l'appareil, ressentie au travers de la cellule et de la manette des gaz. Simultanément, il entend une alarme sonore rouge et identifie six voyants allumés³ au tableau de pannes : **ALT1**, **ALT2**, **HYD1**, **BPG**, **BPD**, **BP**. D'autres voyants du tableau de panne sont aussi allumés.

Il acquitte les répéteurs d'alarme ambre et rouge. Il constate la disparition de toutes les visualisations ainsi que des indications des paramètres sur l'indicateur moteur carburant. Seuls les instruments de navigation secours restent disponibles. Il tente de réduire la manette des gaz et constate qu'elle est bloquée.

L'équipier aperçoit une fumée blanche continue dans le sillage de l'avion et annonce « *marking*⁴ ».

Le pilote répond « *big failure* » et passe le transpondeur sur « *emergency* ». Il confirme sa vitesse avec celle de l'équipier (300 kt) et la patrouille se met en virage vers la droite pour se dérouter vers Nancy.

Le pilote passe en régulation secours carburant et donne plusieurs impulsions sur la commande secours carburant. Il constate l'allumage d'autres voyants de panne ainsi qu'un voyant feu et observe une fumée blanche épaisse à l'arrière de l'avion.

L'avion part en « déclenché » vers la gauche, passe sur le dos et s'engage dans une trajectoire tournoyante nez bas qui s'apparente à une vrille. L'avion effectue plusieurs tours.

Le pilote tente de reprendre le contrôle de l'appareil, puis passe l'inverseur « normal/vrille » sur « vrille ». La rotation s'accroît nez bas.

L'équipier observe la trajectoire de l'avion leader et annonce « *check altitude* » puis « *eject* » à plusieurs reprises. Il remarque que des objets se détachent de la cellule.

Le pilote entend les annonces de son équipier et initie l'éjection à une altitude estimée à 15 000 pieds. Son casque est arraché. Il atterrit dans les arbres où il reste suspendu.

Il se libère du parachute et descend de lui-même au sol. Il est récupéré par les pompiers du SDIS 54 et est acheminé vers l'hôpital des armées de Metz.

L'appareil s'écrase dans un champ en lisière d'une forêt.

³ **ALT1** – **ALT2** : alternateurs 1 et 2 ; **HYD1** : pression hydraulique circuit 1 ; **BPG** – **BPD** : pompes basse pression carburant gauche et droite ; **BP** : basse pression carburant.

⁴ *Marking* : annonce pour signaler l'apparition d'une traînée de condensation derrière l'avion du leader.

1.1.3. Localisation

- Lieu :
 - pays : France métropolitaine
 - département : Meurthe et Moselle (54)
 - commune : Ozerailles
 - coordonnées géographiques du site : N 49° 13'305 / E 005° 51'062
- Moment : jour
- Aéroport le plus proche au moment de l'événement : Metz Nancy Lorraine (LFJL).

1.2. Tués et blessés

Blessures	Membres d'équipage	Passagers	Autres personnes
Mortelles			
Graves			
Légères	1		
Aucune			

1.3. Dommages à l'aéronef

Aéronef	Disparu	Détruit	Endommagé	Intègre
M2000-5 n°70		X		

1.4. Autres dommages

Les points d'impact de l'avion et des réservoirs pendulaires largables (RPL) ont été pollués par les débris, paillettes⁵ et fluides.

⁵ Leurres électromagnétiques largables.

1.5. Renseignements sur le personnel

1.5.1. Membres de la patrouille

1.5.1.1. Pilote de l'avion leader

- Age : 37 ans
- Unité d'affectation : EC 01.002 « Cigognes »
 - fonction dans l'unité : commandant en second depuis septembre 2013
- Formation :
 - qualification : chef de patrouille (2006)
 - école de spécialisation : école de l'aviation de chasse de Tours (2001)
 - stage de transformation sur Mirage 2000 : Orange (2002)
- Heures de vol comme pilote :

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	sur tout type	dont Mirage 2000-5	sur tout type	dont Mirage 2000-5	sur tout type	dont Mirage 2000-5
Total (h)	1 800	1 210	51	51	12	12

- Date du dernier vol comme pilote sur Mirage 2000-5 : 6 mai 2014
- Carte de circulation aérienne : verte, à jour.
- Autres : a déjà subi une éjection sur Mirage 2000-5 en 2010

1.5.1.2. Pilote équipier

- Age : 37 ans
- Pilote de la République de Chine (Taïwan) à l'escadron depuis octobre 2012 dans le cadre des échanges bilatéraux entre l'armée de l'air et la ROCAF (*Republic of China Air Force*)
- Qualification : chef de patrouille
- Heures de vol comme pilote : 1 900 heures, dont 1 500 sur Mirage 2000-5

1.6. Renseignements sur l'aéronef

- Organisme : armée de l'air
- Commandement organique d'appartenance : commandement du soutien des forces aériennes
- Base aérienne de stationnement : base aérienne 116 de Luxeuil
- Unité d'affectation : escadron de soutien technique aéronautique (ESTA) 2 E 004. Mis en œuvre par l'EC 01.002 « Cigognes »
- Type d'aéronef : Mirage 2000-5F
 - configuration : 2 RPL de 2 000 litres, 2 lance-missiles LM2226
 - armement : 1 MICA IR d'exercice, leurres électromagnétiques (paillettes)

- caractéristiques :

	Type - série	Numéro	Heures de vol totales	Heures de vol depuis
Cellule	M2000-5F	70	4 758	V10T ⁶ : 70
Moteur	M53 P2	60328	3 917	VN300 ⁷ : 70

L'appareil a effectué un vol de 2h40 le jour de l'événement avec ravitaillement en vol et dans la même configuration. Aucun dysfonctionnement n'a été signalé.

Aucune anomalie n'a été relevée lors de la visite journalière, lors des visites avant et après le premier vol, ni lors de la visite avant le dernier vol.

1.6.1. Maintenance

L'étude de la documentation démontre un entretien suivi, conforme au plan d'entretien.

Points particuliers :

Le groupe turboréacteur (GTR) a été posé le 09 janvier 2014 sur la cellule à l'ESTA 2E 004 lors de la VN300 avec un potentiel de 300 heures. Le régulateur secours carburant a été échangé et l'arbre de transmission flexible a été déposé et reposé lors de cette visite. Lors de cette dépose, l'arbre a fait l'objet d'un contrôle complet selon la carte de travail (CT) associée. Il a été inspecté à chaque visite hebdomadaire (VH).

1.6.2. Performances

L'appareil ne faisait l'objet d'aucune restriction de vol. Aucun signe précurseur n'a été détecté par le pilote.

1.6.3. Masse et centrage

Dans sa configuration, la masse avion au décollage est d'environ 15 100 kg au décollage avec un centrage dans les normes (53%).

1.6.4. Carburant

- Type de carburant utilisé : F34
- Quantité de carburant au décollage : 6,3 tonnes
- Quantité de carburant restant au moment de l'événement : 4,5 tonnes

⁶ V10T = visite transitoire à 10 ans à l'AIA de Clermont-Ferrand.

⁷ VN300 = visite normale 300 heures.

1.6.5. Autres fluides

Sans objet.

1.7. Conditions météorologiques

Les conditions observées sont conformes aux prévisions et font état d'une couche nuageuse à plusieurs étages sur toute la région, de base moyenne 3 000 pieds s'étendant jusqu'à 18 000 pieds, morcelée par endroits sans phénomène dangereux. La visibilité est supérieure à 10 kilomètres hors couche. Le vent moyen est de secteur Ouest-Sud-Ouest pour 15 à 20 nœuds dans les basses couches et d'environ 40 nœuds à 18 000 pieds.

1.8. Aides à la navigation

Sans objet.

1.9. Télécommunications

Le pilote est en contact radio avec le CDC de Drachenbronn en TSA 200 ainsi qu'avec son équipier sur une fréquence inter patrouille.

1.10. Renseignements sur l'aérodrome

Sans objet.

1.11. Enregistreurs de bord

L'avion est équipé :

- d'un enregistreur de paramètres (FDR) ENERTEC à bande magnétique de type PE6011, d'une autonomie de 8 heures. Une trentaine de paramètres sont enregistrés ;
- d'un enregistreur vidéo et audio sur support de format HI 8, permettant d'exploiter la visualisation tête haute (VTH) ainsi que les communications radio ;
- d'un système d'enregistrement et de restitution des paramètres de mission (SERPAM) ;
- d'un enregistreur d'événements situé dans le calculateur du GTR.

Seuls les paramètres du FDR ont pu être exploités. L'enregistrement s'est arrêté avant l'impact. Les autres supports ont été très endommagés ou détruits lors de l'impact et l'incendie.

1.12. Renseignements sur l'épave et sur la zone de l'impact

1.12.1. Examen de la zone

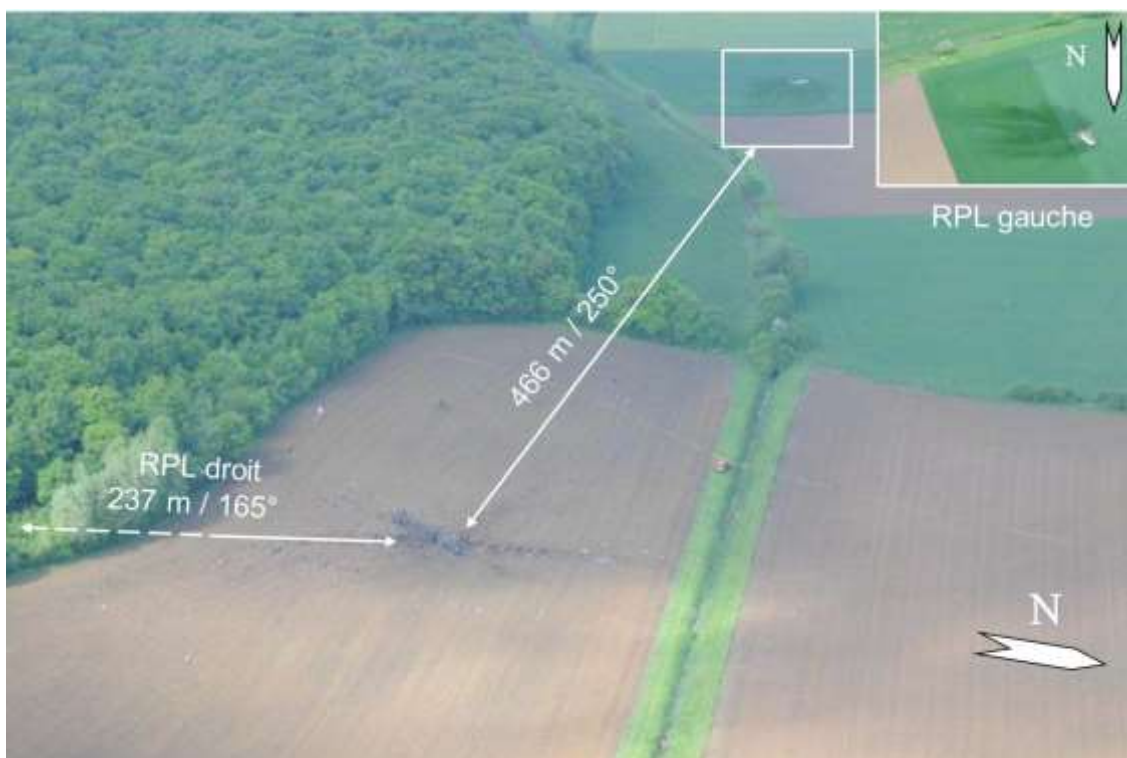
Au point d'impact, le cratère est profond d'environ 2 mètres et son axe est orienté au cap 190°. Les débris de la cellule sont de petite taille. Ils sont répartis en étoile sur plusieurs centaines de mètres autour de l'impact.

Le GTR est enfoui au fond du cratère, la partie supérieure vers le haut. Les débris restés dans le cratère ont été soumis à un incendie qui a persisté plus de 24 heures avec émission de fumée. Le cratère a ensuite été noyé par les pompiers. L'enregistreur de paramètres est retrouvé au bord du cratère.

Le RPL gauche a été retrouvé éventré dans un champ à environ 470 mètres de l'impact principal.

Le carburant contenu s'est répandu au sol sans provoquer d'incendie. Le RPL droit a été retrouvé brisé dans les bois à environ 240 mètres du point d'impact. La tête du MICA IRX a été retrouvée à 500 mètres environ du point d'impact.

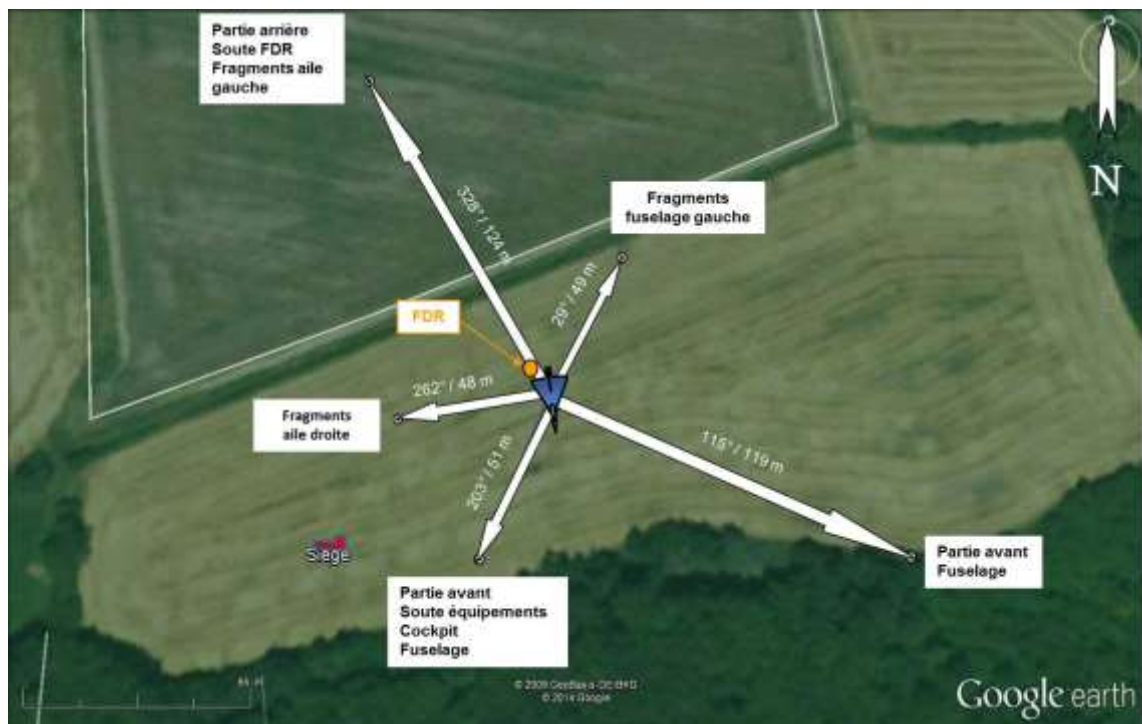
Le siège éjectable se trouve à quelques dizaines de mètres de l'impact. Des fragments de la cellule, projetés hors du cratère, portent des traces d'incendie.



Vue générale du site avec positions des RPL



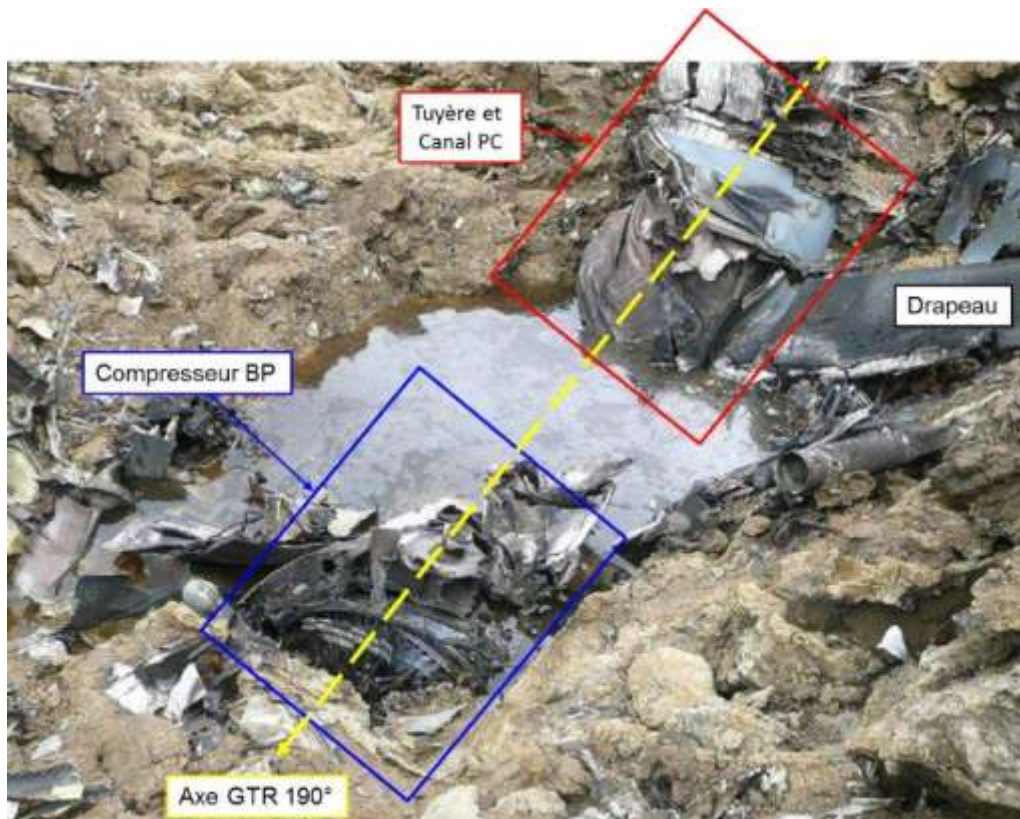
Vue générale du site avec positions du siège et du parachute



Répartition des débris



Aspect du cratère 24 heures après l'impact, vu selon l'axe 010°



Positionnement du GTR dans le cratère

1.12.2. Examen des débris sur le site

Les RPL portent des traces d'arrachement et les cartouches pyrotechniques d'éjection n'ont pas été percutées. Ils ne portent aucune trace d'incendie. Les leurres électro magnétique (EM) sont répandus au sol hors de leur magasin.

Description du turboréacteur

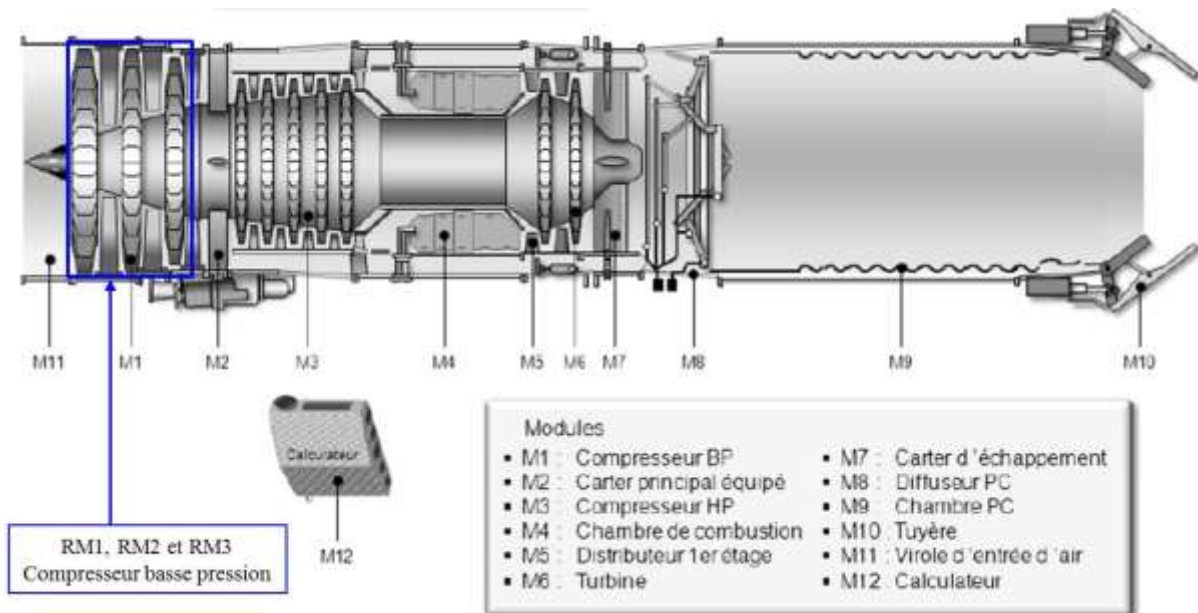


Schéma général du réacteur M53

Examen des débris du turboréacteur

La partie avant du compresseur basse pression est visible dans le cratère (roues mobiles RM2 et RM3) sur un secteur 10h-13h. Aucun indice d'ingestion de corps, d'endommagement des bords d'attaque, de mitraillage des aubes ou de rotation à l'impact n'est présent sur cette section. La RM1 est désolidarisée et projetée en aval de l'impact à environ 5 mètres. Aucun indice de corps étranger n'est présent sur les 7 aubes restantes sur le disque.

Des traces d'impact radial des aubes observées sur le joint « abradable » attestent d'une rotation faible ou nulle à l'impact.

La turbine haute pression est retrouvée dans le cratère, désolidarisée du reste du réacteur.

Les débris suivants ont été identifiés au fond du cratère :

- des fragments et des engrenages du relais d'accessoires ;
- des fragments de l'arbre flexible de transmission ;
- la prise de mouvement avion (PMA) ;
- les alternateurs ;
- des fragments du support des équipements ;
- les pompes hydrauliques et de carburant ;
- le groupe de lubrification ;
- les pompes carburant et PC.

1.13. Renseignements médicaux et pathologiques

1.13.1. Pilote

- Dernier examen médical :
 - type : visite systématique à l'unité (VSU) le 12 mai 2014 (référence CEMPN⁸ du 15 novembre 2013)
 - résultat : apte sans restriction
 - validité : 12 mois
- Examens biologiques : effectués

1.13.2. Autres personnels

Sans objet.

1.14. Incendie

L'allumage d'un voyant feu (PC avant) a été constaté par le pilote après la détonation. Des indices de feu ont été constatés sur certains fragments de la cellule.

1.15. Questions relatives à la survie des occupants

1.15.1. Abandon de bord

L'éjection a été réalisée dans le domaine d'utilisation du siège. Le pilote était pendu dans le harnais et décollé du baquet lorsqu'il a tiré la poignée d'éjection. La séquence s'est déroulée normalement. Le temps de descente sous voile est estimé à 11 minutes environ. Le pilote touche le sol à 5,3 kilomètres du point d'impact.

- Type de siège éjectable : Martin Baker type MK10Q
 - Données morphologiques :
 - taille : 1,85 m
 - poids : 80 kg
 - Éléments au moment de l'éjection :
 - altitude : estimée par le pilote à 15 000 pieds environ, dans une attitude $\frac{3}{4}$ dos et en trajectoire tournoyante nez bas
 - vitesse : estimée à environ 400 nœuds
 - Conséquences :
 - arrachement du casque et du masque (jugulaire non fixée, visières baissées). Celui-ci a été arraché par le vent relatif.
 - arrachement des poches de la combinaison anti-g
 - une des jarrettières gauches a été perdue
 - une chaussure de vol est en partie déchirée
- Les équipements ne portent pas de trace de projection de plomb.

⁸ CEMPN : centre d'expertise du personnel navigant

1.15.2. Aspects survie

Le pilote atterrit dans les arbres après avoir évité une ligne électrique. Le parachute s'accroche dans les branches et le pilote se retrouve suspendu à l'horizontale à environ cinq mètres de hauteur par les suspentes et le canot pneumatique⁹. Se libérant de la sangle du canot, il se retrouve suspendu entre deux arbres, parvient à atteindre un tronc et se libère du harnais. Il se laisse glisser jusqu'au sol.

Il sort de la forêt et prévient son unité par téléphone portable. Il percute un fumigène et un feu de Bengale de son gilet alors que des hélicoptères survolent la zone. Les équipages ne l'apercevant pas, il rejoint une route où le conducteur d'un véhicule civil l'emmène jusqu'à la gendarmerie d'un village proche.

1.15.3. Organisation des secours

Les secours ont été coordonnés par le centre de coordination et de sauvetage (CCS) de Drachenbronn qui a déclenché le plan SATER¹⁰ à 16h20 suite à la perte de contact radar et des indications de l'équipier confirmant l'éjection.

Le SDIS54 est prévenu par l'appel d'un témoin à 16h23 qui décrit un panache de fumée sur la commune des Barroches (proche d'Ozerailles). Les premiers témoignages parvenant au SDIS décrivent un pilote sous parachute.

À 16h40, le CCS donne au SDIS les coordonnées approximatives du lieu de chute du pilote. L'épave est retrouvée rapidement sur la commune d'Ozerailles.

À 17h22, le pilote est récupéré à bord d'un véhicule médicalisé du SDIS où il subit un premier bilan puis est acheminé sur indication du CCS vers l'hôpital des armées de Metz.

À 18h30, le pilote est pris en charge aux urgences.

1.16. Essais et recherches

Sans objet.

1.17. Renseignements sur les organismes

Sans objet.

1.18. Renseignements supplémentaires

Sans objet.

1.19. Techniques spécifiques d'enquête

Sans objet.

⁹ Le canot fait partie du paquetage de survie inclus dans le siège. Il se gonfle automatiquement avec la mise en œuvre du paquetage avant l'atterrissage.

¹⁰ SATER : service départemental d'incendie et de secours.

2. ANALYSE

L'événement est une perte de contrôle consécutive à une avarie technique. Le pilote est contraint de s'éjecter.

L'analyse qui suit expose la séquence chronologique de l'événement, tire les conclusions de l'exploitation des données enregistrées et du résultat des expertises. Elle évalue les hypothèses possibles de l'origine de l'avarie.

2.1. Séquence chronologique de l'événement et exploitation des données enregistrées

2.1.1. Séquence chronologique de l'événement

La séquence chronologique est présentée en deux parties. Les événements sont référencés par rapport à une origine T0 (perturbations du paramètre correspondant au régime moteur N) sur une échelle linéaire.

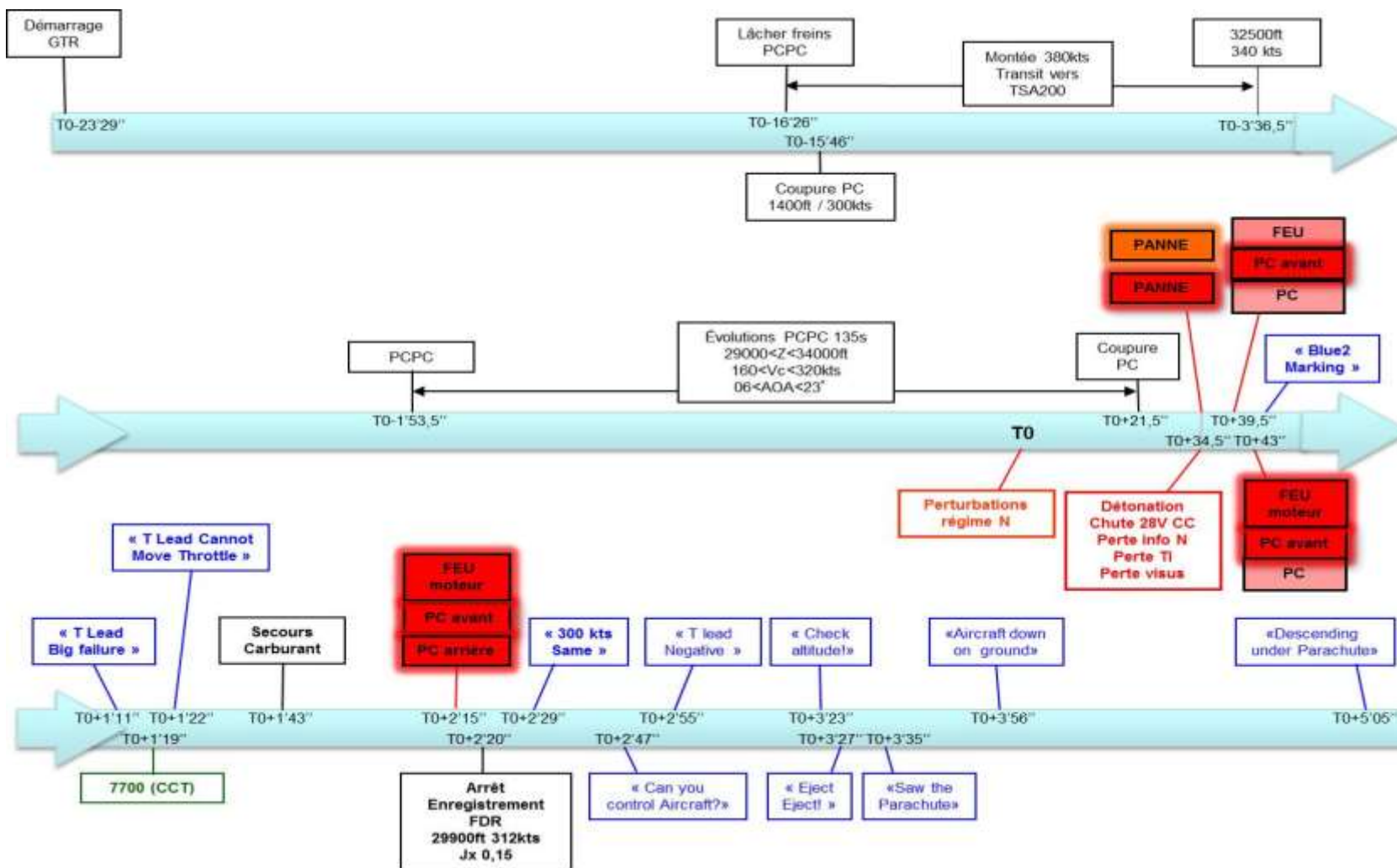
Une séquence générale présente l'ensemble du vol sur la totalité de l'enregistrement du FDR avec l'allumage des répéteurs d'alarme ambre et rouge lorsque leur correspondance de panne est identifiée.

Les annonces radio au sein de la patrouille sont ajoutées en encadrés bleus.

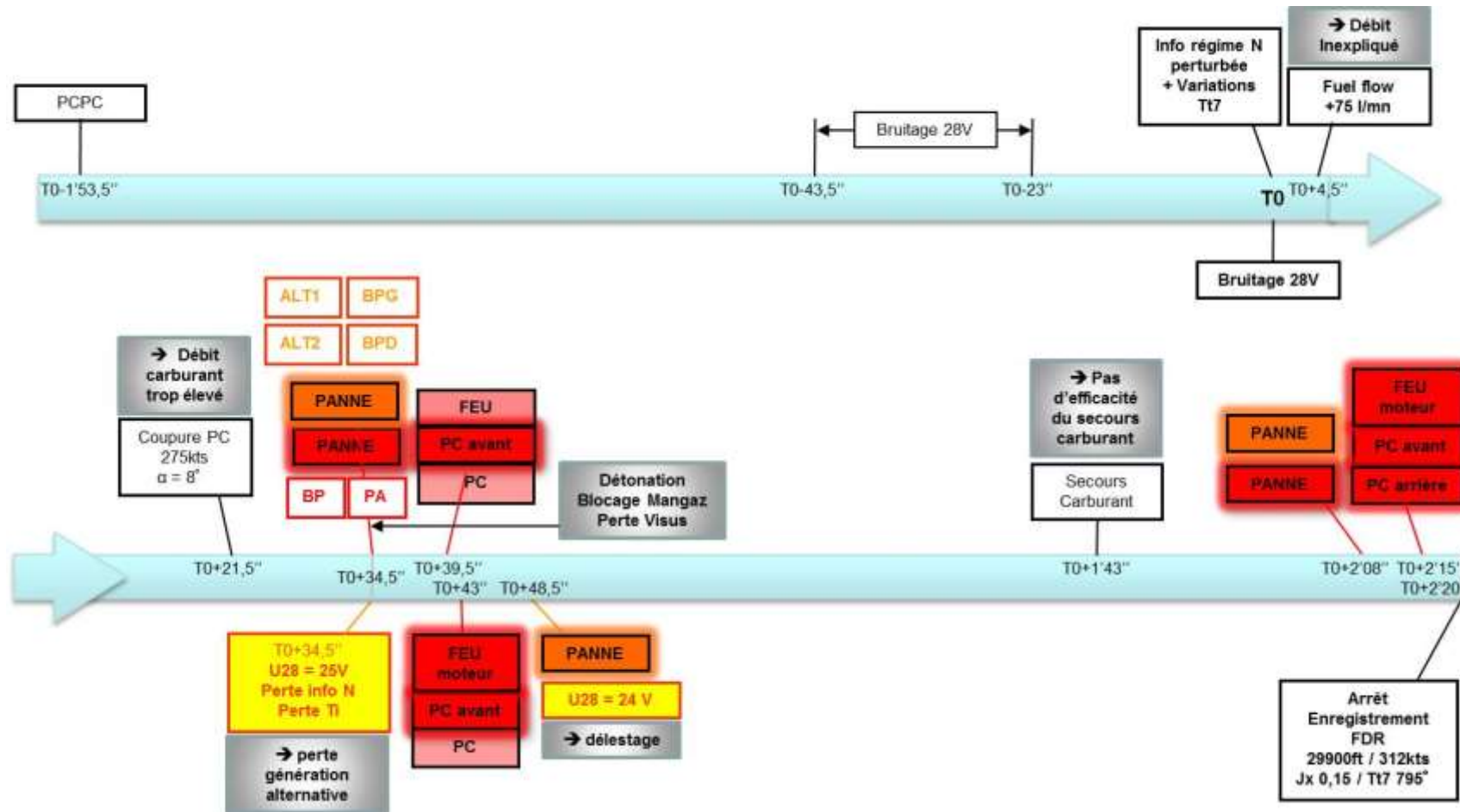
Une séquence significative détaille les dernières minutes d'enregistrement du FDR ainsi que les anomalies remarquables observées avec leur signification.

Les paramètres analogiques correspondants sont présentés en annexe 1.

L'analyse détaillée des alarmes et des anomalies est présentée en annexe 2.



Séquence chronologique de l'ensemble du vol



11

Séquence significative des dernières minutes d'enregistrement du FDR, signalisations et anomalies

¹¹ Jx = accélération longitudinale / Tt7 = température du sortie turbine

2.1.2. Conclusion de l'exploitation des données enregistrées

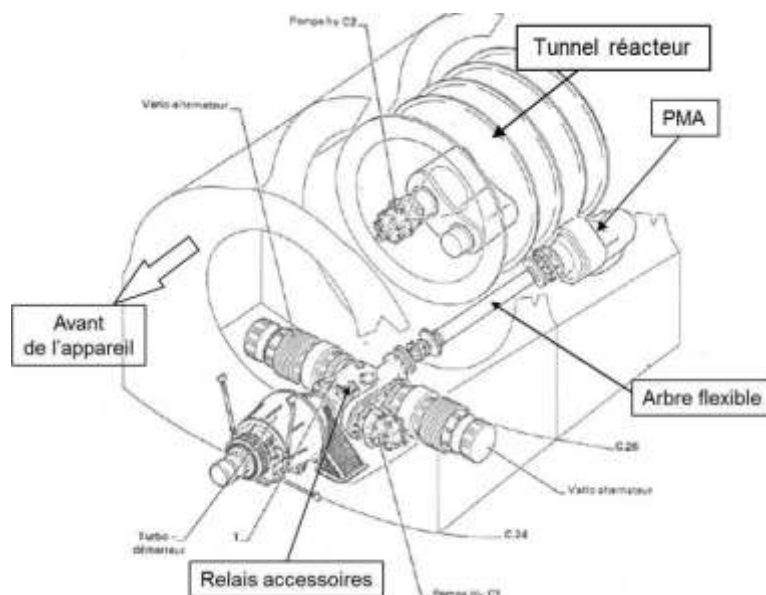
L'exploitation des données enregistrées corrobore le témoignage du pilote et montre que :

- les premières anomalies (régime moteur perturbé et fuite carburant) surviennent en régime PC stabilisé et ne sont pas perceptibles par le pilote ;
- la fonctionnalité du relais d'accessoires est perdue et le moteur continue de fonctionner ;
- la chute du régime enregistré peut signifier l'arrêt de la PMA ;
- la traînée de carburant observée par l'équipier est consécutive aux premières alarmes ;
- le secours carburant est inefficace et le moteur reste en régime de fonctionnement plein gaz sec ;
- un incendie se déclare dès les premières alarmes et se propage dans le tunnel réacteur ;
- l'enregistrement s'arrête consécutivement à l'allumage de tous les voyants feu ;
- le contrôle de l'avion est perdu après l'arrêt de l'enregistrement, en un peu plus de 2 minutes après les premières alarmes ;
- le temps estimé entre la perte de contrôle et l'éjection (48 secondes) est cohérent avec les tentatives infructueuses du pilote de reprendre le contrôle de l'appareil.

Ces éléments ont conduit à rechercher l'origine de l'avarie dans le périmètre du GTR (veine d'air et enceinte avant), de ses organes périphériques (prise de mouvement avion - PMA et support d'équipements) et des organes de la transmission faisant partie des équipements de la cellule (arbre de transmission flexible et relais d'accessoires).

2.2. Résultats des expertises

Les constats détaillés sur les différents ensembles sont présentés en annexe 3. Une étude détaillée de la transmission PMA-relais d'accessoires est présentée en annexe 4.



Positionnement spatial des différents ensembles

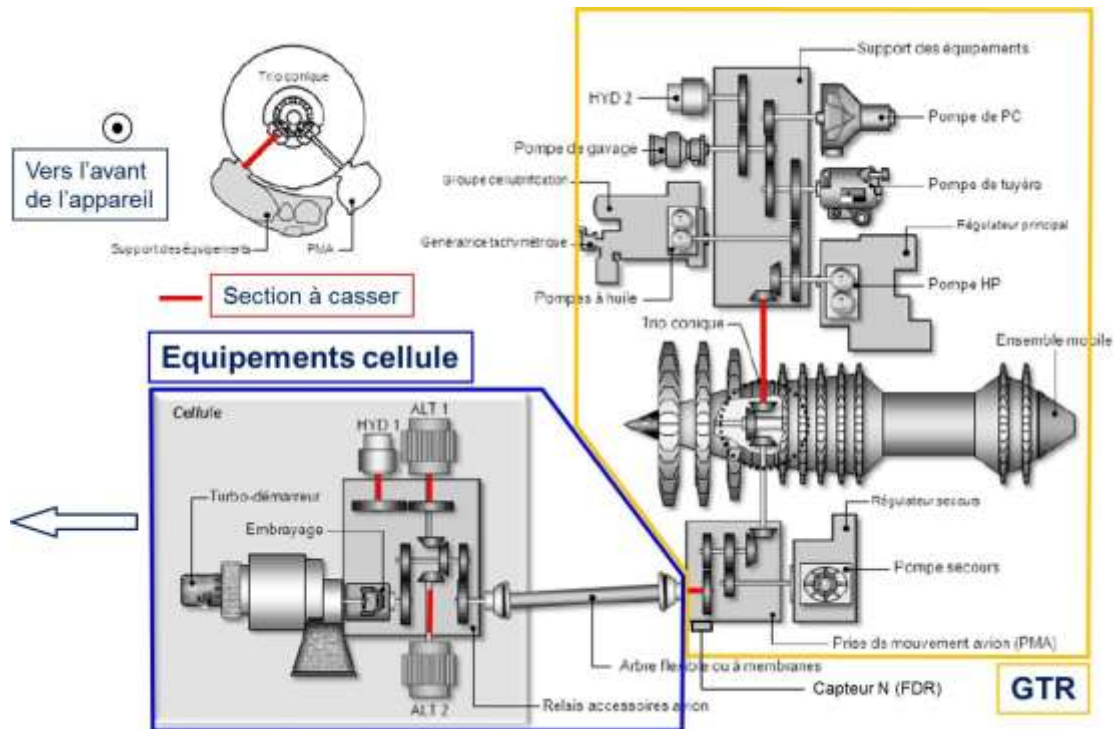


Schéma synoptique des ensembles du GTR (encadré jaune) et des équipements cellule (encadré bleu)

2.2.1. Expertises réalisées dans le périmètre du GTR comprenant le turboréacteur, le support des équipements, la PMA et le régulateur secours

Aucun dysfonctionnement du turboréacteur et du support des équipements antérieur à l'impact et susceptible d'être à l'origine de l'événement n'a été identifié.

Les expertises effectuées sur la PMA et le régulateur secours carburant montrent que :

- La denture des pignons coniques (sortie moteur et entrée PMA) est érodée et un secteur du pignon conique d'entrée PMA s'est rompu en fatigue (secteur manquant).
- La section fusible de sortie PMA vers l'arbre de transmission flexible n'est pas rompue mais présente une torsion révélatrice d'un couple résistant dans le sens de l'arbre vers la PMA.
- Les carters de la PMA (principal et intermédiaire) se sont séparés en fonctionnement.
- Les attaches de la PMA sur le module 2 portent des marquages résultant de fortes vibrations.
- L'ensemble régulateur de secours carburant et pompe de secours porte des traces d'endommagements consécutifs à de fortes sollicitations vibratoires ayant entraîné des desserrages de liaisons, une perte d'étanchéité et un fonctionnement anormal.

Les principaux constats effectués sur la PMA attestent d'endommagements intervenus en fonctionnement, avant l'impact.



Positionnement de la PMA sur le GTR et endommagements des pignons coniques

2.2.2. Expertises réalisées sur les organes de la transmission (arbre de transmission flexible et relais d'accessoires)

2.2.2.1. Arbre de transmission flexible

Des traces de *fretting*¹² indiquant un fonctionnement avec des liaisons desserrées, un débattement axial de l'arbre et une perte probable de son centrage en rotation ont été identifiés.

Les fragments de l'arbre de transmission flexible portent des indices d'endommagements en fonctionnement, antérieurs à l'impact.

2.2.2.2. Relais d'accessoires

Aucun des arbres fusibles internes au relais n'est rompu en torsion.

Aucun indice d'endommagement ou de dysfonctionnement antérieur à l'impact n'a été identifié sur les fragments du relais d'accessoires, ses attaches sur la cellule ou sur un équipement du relais.

2.2.3. Analyses des fluides et particules

La présence de particules métalliques est consécutive à des dégradations apparues en fonctionnement, en particulier au niveau des engrenages coniques de la PMA.

¹² *Fretting* : marquage résultant du frottement de deux surfaces en contact soumises à des mouvements oscillatoires de faible amplitude générant un glissement partiel du contact.

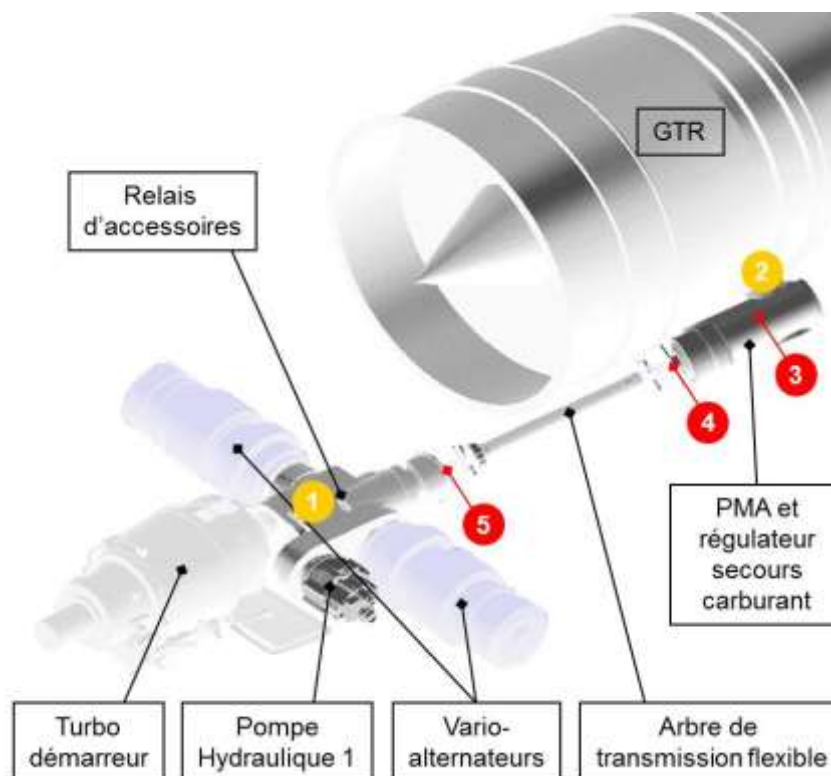
2.2.4. Conclusion des expertises

Les expertises montrent que le système de transmission (constitué par la PMA et ses attaches sur le réacteur, le régulateur secours carburant et ses liaisons sur la PMA, l'arbre de transmission flexible et ses liaisons côté PMA et relais d'accessoires) s'est dégradé sous l'effet de fortes contraintes vibratoires apparues en fonctionnement.

2.3. Hypothèses liées à l'apparition des contraintes vibratoires anormales sur le système de transmission

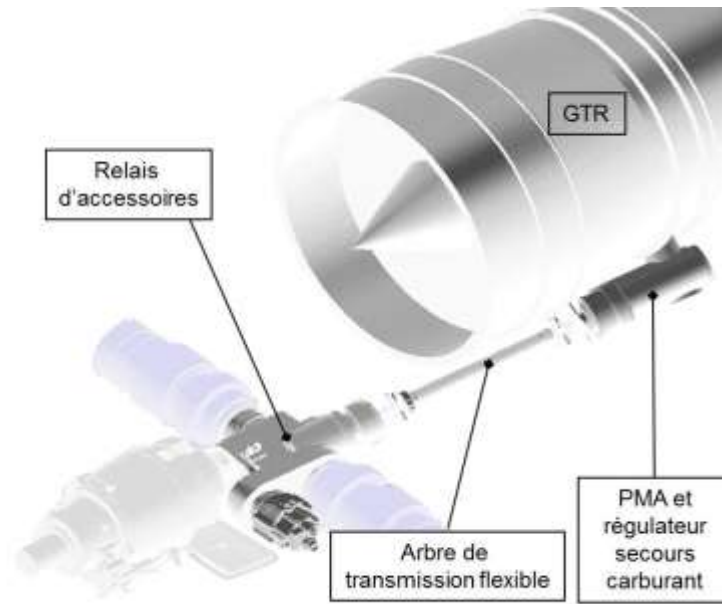
L'étude a été réalisée selon les hypothèses suivantes :

- dysfonctionnement endogène aux organes du système (PMA ; régulateur secours carburant ; arbre flexible ; relais d'accessoires) ;
- défaillance des attaches du système de transmission sur le GTR et sur la cellule (① attaches relais d'accessoires sur cellule ; ② attaches PMA sur module 2) ;
- défaillance des liaisons inter-organes du système de transmission (③ liaisons PMA-régulateur secours carburant ; ④ liaisons arbre-PMA ; ⑤ liaisons arbre- relais d'accessoires).



Représentation schématique du système de transmission

2.3.1. Hypothèses de dysfonctionnement endogène aux organes du système (PMA, régulateur secours carburant, arbre de transmission flexible, relais d'accessoires)



Organes du système de transmission

2.3.1.1. PMA

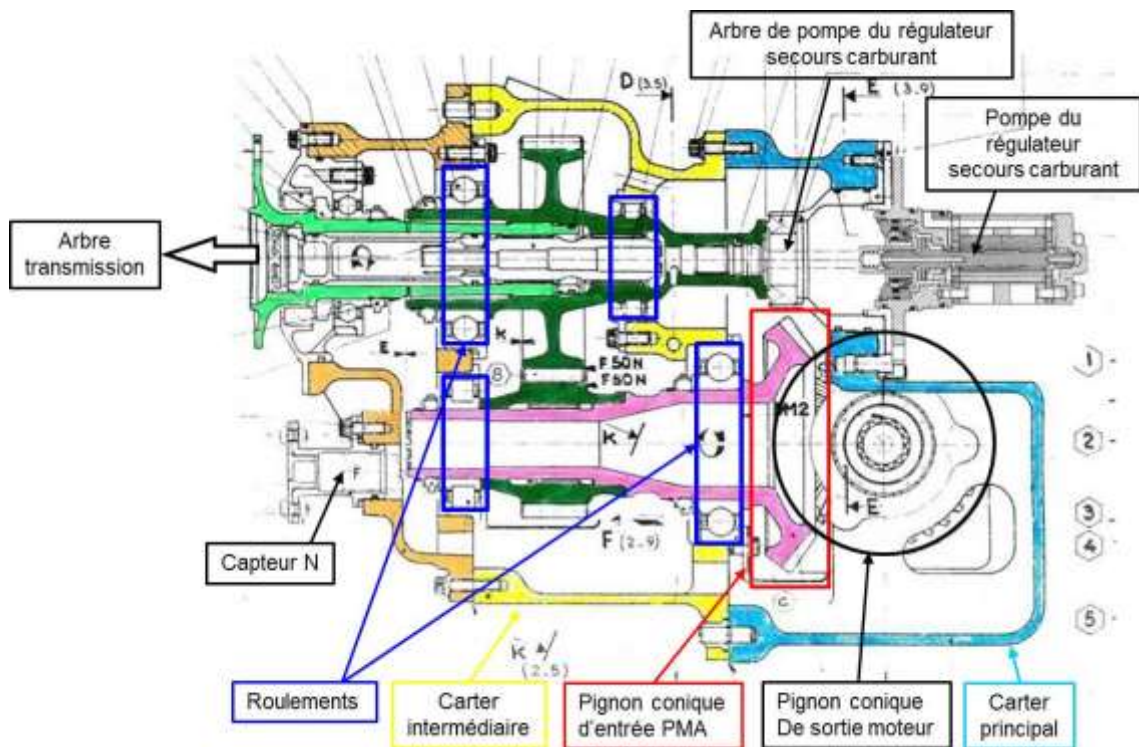


Schéma de la PMA

Les dysfonctionnements de la PMA peuvent provenir :

- d'une défaillance primaire du pignon conique d'entrée ;
- d'une défaillance des roulements ;
- d'une défaillance des carters.

Défaillance primaire du pignon conique d'entrée PMA

L'analyse montre que la roue conique s'est dégradée en fonctionnement et un secteur de 120° s'est rompu en fatigue sous sollicitation vibratoire.

Les pignons sont conformes.

Cet organe présente un bon comportement en service, sans avarie significative et aucun antécédent de rupture des pignons n'est connu.

Le temps de fonctionnement est de 2 252h sur le même module 2. Selon le constructeur des engrenages, une dégradation spontanée du pignon suite à une non-conformité se produirait en moins de 150h de fonctionnement.

L'analyse comparative des pignons issus du même lot de la PMA 1585, dont le temps de fonctionnement est supérieur (3 547h) ne révèle aucune anomalie.

L'hypothèse d'une défaillance primaire et spontanée du pignon conique de la PMA1587 est rejetée.

Défaillance des roulements

La PMA 1587 est équipée de roulement SNR et SNFA qui limitent son potentiel à 3 000h.

Les roulements ont été retrouvés en bon état.

L'hypothèse d'une défaillance des roulements de la PMA est rejetée.

Défaillance des carters de la PMA

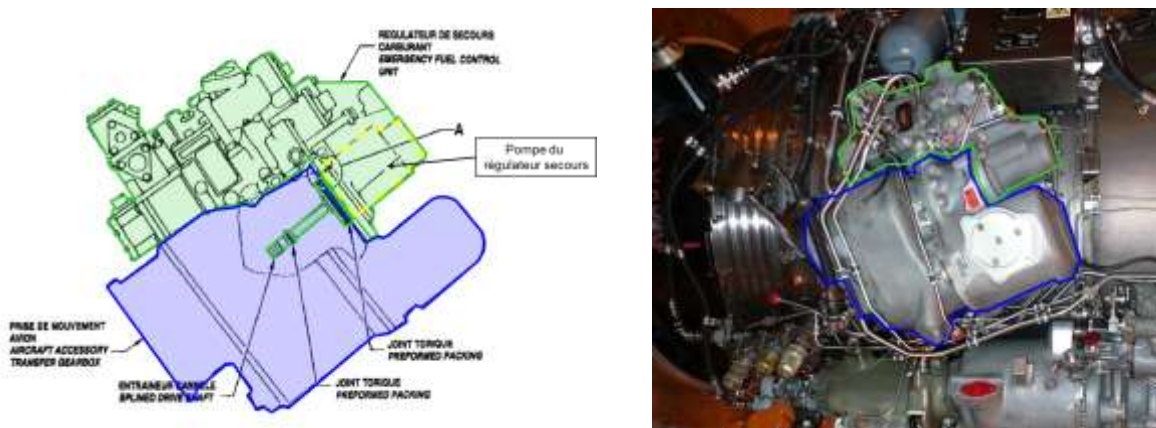
Aucune trace de fatigue sur les faciès des nombreuses ruptures des fragments n'est identifiée.

Le matage important constaté sur les brides entre le carter principal et intermédiaire résulte de contraintes intenses et répétées. Ces traces de matage ne peuvent être obtenues si les carters sont rompus au préalable : les efforts ne seraient plus transmis aux brides.

Les contraintes sont donc antérieures à la rupture des carters.

L'hypothèse d'une rupture des carters de la PMA ayant causé l'accident est rejetée.

2.3.1.2. Régulateur secours carburant



Assemblage et tailles respectives des ensembles PMA (bleu) / régulateur secours carburant (vert)

Les traces de *fretting* constatées sont la conséquence de vibrations entre les éléments (pompe, régulateur secours / PMA) qui sont restés guidés et centrés.

La pompe était arrêtée à l'impact et ne porte pas d'indice de vibration interne (aucune trace de contact entre rotor et stator).

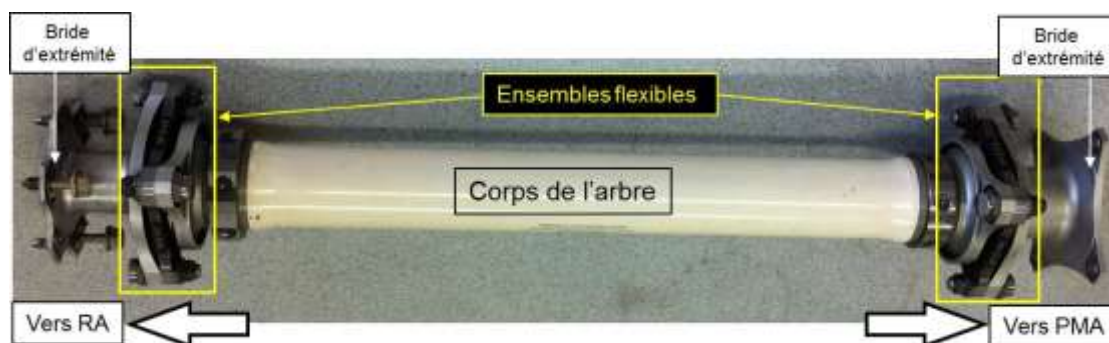
Le *fretting* observé sur les éléments du régulateur n'est pas dû à un dysfonctionnement de la pompe.

L'analyse des antécédents de dysfonctionnement de la pompe montrent que ceux-ci se limitent généralement aux parties tournantes et à la rupture des palettes. Ces dysfonctionnements conduisent à un grippage qui provoque la rupture de l'arbre fusible d'entraînement et ne génèrent pas de vibration.

La pompe du régulateur est le seul organe en rotation susceptible de générer des vibrations dans ces ensembles. Elle est néanmoins de petite taille et a un faible impact vibratoire sur l'environnement en comparaison avec les pièces massives qui l'entourent (régulateur secours et PMA).

L'hypothèse d'un dysfonctionnement endogène au régulateur secours carburant est rejetée.

2.3.1.3. Arbre de transmission flexible



Arbre de transmission flexible déposé

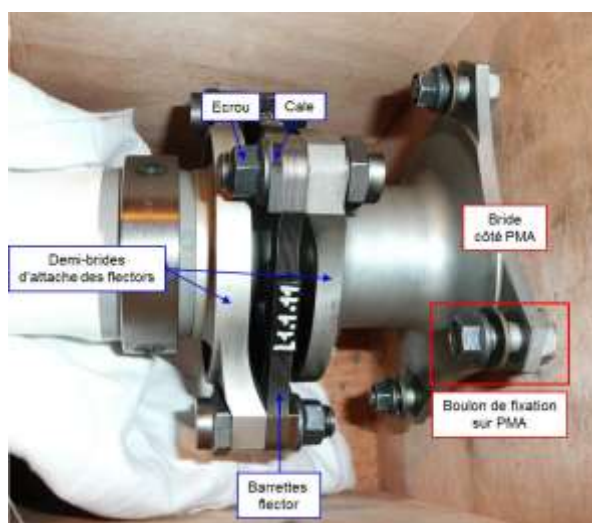
Les spécifications de l'arbre de transmission flexible autorisent un très faible degré de liberté autour de l'axe longitudinal et radial. Ces mouvements sont absorbés par des ensembles flexibles de type « flector ».

Aucun cas de rupture de l'arbre ou d'une rupture totale d'un « flector » (rupture totale de toutes les barrettes¹³) ayant une cause endogène à l'arbre n'a été observé depuis la mise en service de la flotte M2000.

Les endommagements observés sur les extrémités ne sont pas en accord avec une hypothèse de rupture primaire de l'arbre (les marquages des 4 demi-bridés des ensembles flexibles attestent d'un fonctionnement hors norme¹⁴ avant rupture).

L'hypothèse d'une rupture primaire de l'arbre est rejetée.

Ensembles flexibles



Détail d'un ensemble flexible de l'arbre



Vis de fixation flector (écrou manquant après dévissage)

Un écrou de fixation de « flector » s'est échappé par dévissage et des barrettes étaient manquantes sur l'extrémité côté relais d'accessoires.

Les expertises n'ont pas permis de mettre en évidence des anomalies sur les fragments des barrettes de « flector ».

Des desserrages partiels (rotation de cale) ont déjà été observés sans toutefois provoquer un desserrage complet.

Un desserrage des boulons de fixation des barrettes de « flector » peut conduire à un dysfonctionnement de l'arbre¹⁵.

¹³ Chaque bloc « flector » comprend 10 lames (ou barrettes) maintenues en leur centre par un bloc élastomère. Ces blocs (4 par « flector ») sont reliés aux deux fourches par 4 boulons. Chacun des boulons enserre 20 lames.

¹⁴ Une translation ainsi qu'une flexion minimale de l'arbre de 12° à chaque extrémité sont nécessaires pour que les écrous de « flectors » entrent en contact avec les demi-bridés opposés.

¹⁵ Selon le constructeur, la perte d'un écrou de « flector » et sa rondelle engendrerait un balourd de 317 g.mm sur l'arbre.

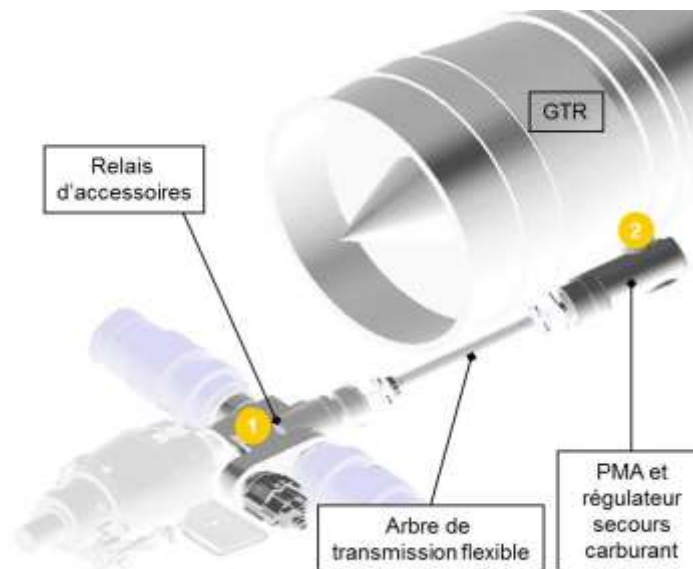
L'hypothèse d'une défaillance par desserrage d'une fixation de « flector » est possible.

2.3.1.4. Relais d'accessoires

Les constats effectués sur les débris du relais d'accessoires attestent de l'absence de dysfonctionnement de celui-ci.

L'hypothèse d'un dysfonctionnement du relais d'accessoires est rejetée.

2.3.2. Hypothèses de défaillance des attaches du système de transmission sur le GTR et sur la cellule



Positionnement des attaches du système de transmission

1 attaches relais d'accessoires sur cellule ; **2** attaches PMA sur module 2

2.3.2.1. Attaches du relais d'accessoires sur la cellule

Les constats effectués attestent de l'absence de défaillance au niveau des 3 attaches du relais d'accessoires sur la cellule.

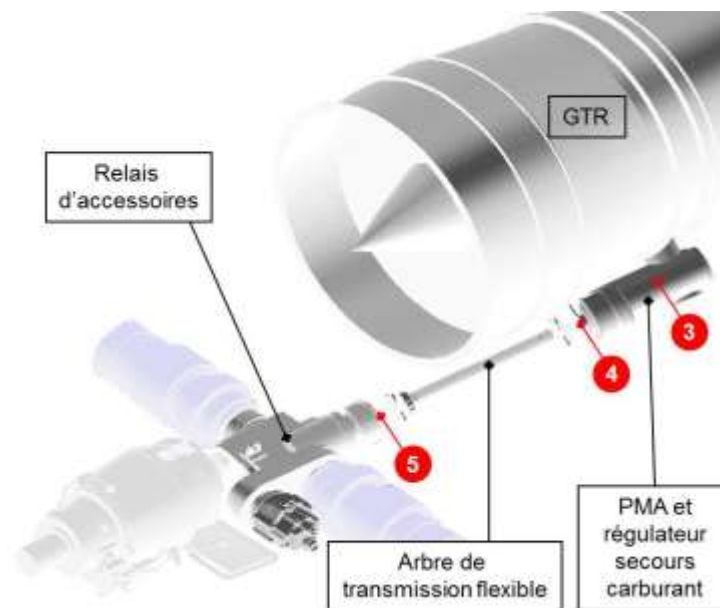
L'hypothèse d'une défaillance des attaches du relais d'accessoires sur la cellule est rejetée.

2.3.2.2. Attaches de la PMA sur le module 2

Les traces de *fretting* et de matage important montrent que les fixations étaient fonctionnelles et que la fonction support de la PMA était assurée lors de l'apparition des contraintes. Les indices relevés sur les attaches sont des conséquences de ces contraintes répétées.

L'hypothèse d'une défaillance des attaches de la PMA sur le module 2 est rejetée.

2.3.3. Hypothèses de défaillance des liaisons inter-organes du système de transmission

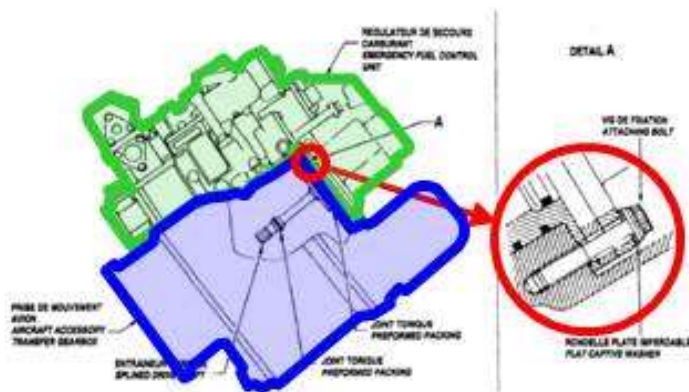


Positionnement des liaisons inter-organes du système de transmission

3 Liaisons PMA-régulateur secours carburant ; **4** liaisons arbre-PMA ; **5** liaisons arbre-relais d'accessoires

2.3.3.1. Liaisons PMA-régulateur secours carburant

Le bloc régulateur secours carburant est fixé sur la PMA par 3 vis avec hélicoïls¹⁶ métalliques auto-freinant.



Ensemble PMA (bleu) - bloc régulateur secours carburant (vert) et détail d'une fixation

Des pertes de serrage de ces fixations avec un recul du bloc régulateur secours sur la PMA survenus en fonctionnement ont été identifiées lors des expertises.

¹⁶ Fil métallique en spirale inséré dans le logement de la vis.

Observation du parc M2000 :

Un seul cas présentant à la fois des couples de freinage et de serrage insuffisants de ces liaisons a été observé sur le parc M2000. L'expertise de ce GTR a montré que ce régulateur avait fonctionné environ 1 000 heures depuis sa pose sur la PMA sans perte de fonctionnalité des liaisons ni autre anomalie (desserrage du boisseau / doseur et perte d'étanchéité).

Aucun cas de desserrage spontané de ces liaisons ayant provoqué un recul du bloc régulateur n'a été observé par le passé.

Selon le constructeur, une non-conformité de ces liaisons ne génère pas de vibration.

L'expertise approfondie du GTR 60328 atteste de l'absence de trace d'usure induite par micro déplacement au niveau des surfaces de contact entre le régulateur de secours et la PMA.

Le desserrement de ces liaisons en fonctionnement apparaît donc comme une conséquence des fortes contraintes vibratoires auxquelles ces organes ont été soumis.

L'hypothèse d'une défaillance des liaisons PMA-régulateur secours carburant est rejetée.

2.3.3.2. Liaisons arbre-PMA

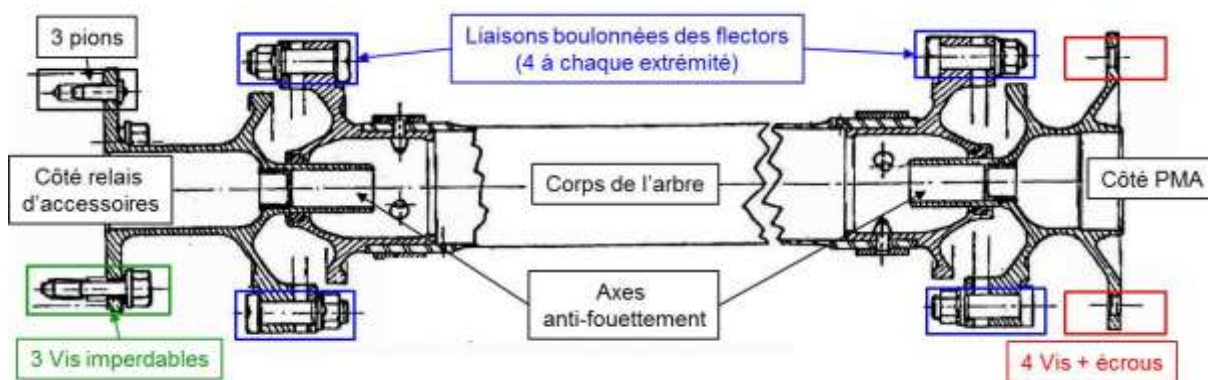


Schéma de l'arbre de transmission flexible et de ses liaisons



Liaisons arbre-PMA (rouge) sur avion

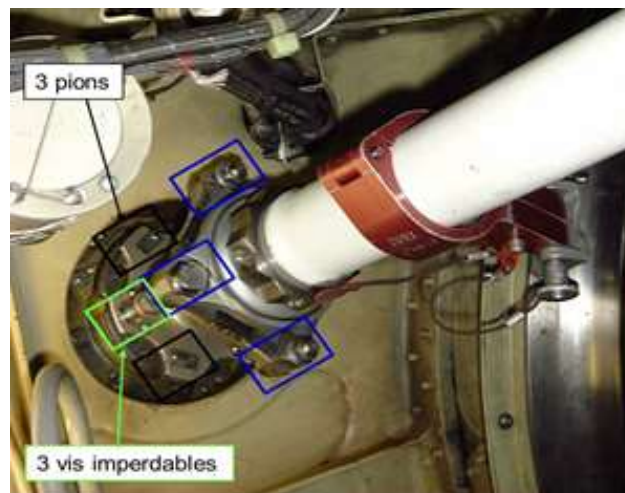
Les expertises montrent que :

- la seule liaison retrouvée (vis + écrou) est desserrée (couple de serrage nul) ;
- les indices relevés sur les trous des vis disparues au niveau des brides attestent d'un temps de fonctionnement avec des liaisons desserrées ;
- les brides de liaison témoignent également d'un temps de fonctionnement de l'arbre avec 3 vis manquantes puis d'une perte de centrage de l'axe.

Le desserrage de ces liaisons est de nature à entraîner une diminution de rigidité du système de transmission et induire des vibrations.

L'hypothèse d'une défaillance par desserrage des liaisons arbre-PMA est possible.

2.3.3.3. Liaisons arbre-relais d'accessoires



Liaisons arbre-relais d'accessoires (vert) sur avion

Les constats montrent que cet accouplement a fonctionné avec des liaisons desserrées et un écartement des plateaux de l'arbre flexible et de l'arbre télescopique du relais d'accessoires. Des indices de couple résistant côté PMA sont observés.

Le desserrage de ces liaisons est de nature à entraîner une diminution de rigidité du système de transmission et induire des vibrations.

L'hypothèse d'une défaillance par desserrage des liaisons arbre-relais d'accessoires est possible.

2.3.4. Conclusion des hypothèses d'apparition de contraintes vibratoires anormales sur le système de transmission

Le desserrage d'une ou plusieurs liaisons est de nature à entraîner un mode de fonctionnement vibratoire et hors norme¹⁷ de l'arbre (cf annexe 5 : déclenchement d'un phénomène *WHIRL*)

¹⁷ Selon l'avionneur, les amplitudes maximales spécifiées pour l'arbre en fonctionnement sont de 1° en déviation axiale et de 3 millimètres en déplacement longitudinal. La vitesse de rotation de l'arbre est de 9190 tr/min maximum en régime plein gaz (N moteur = 103% ou 10 600 tr/min).

pouvant conduire à l'endommagement en cascade d'autres liaisons, la perte du centrage de l'axe puis la rupture de l'arbre.

Les hypothèses de défaillance par desserrage d'une fixation de flector de l'arbre de transmission ou des liaisons d'extrémité de l'arbre avec la PMA et le relais d'accessoires sont retenues.

2.4. Scénario possible de l'événement

L'évaluation des hypothèses de défaillance primaire, l'analyse des données enregistrées et les constats effectués permettent d'envisager le scénario suivant :

- Défaillance d'une ou plusieurs liaisons de l'arbre de transmission par perte de serrage (« flector » ou liaisons d'extrémité), entraînant l'apparition de balourds et de vibrations.
- Fonctionnement hors norme de l'arbre de transmission, endommagement des « flectors » et des autres liaisons. Divergence des vibrations, précession (*WHIRL*) et accentuation des contraintes sur l'ensemble du système.
- Dégradation de la PMA (fissuration du pignon conique mené conduisant à sa rupture, endommagement des carters).
- Perte d'étanchéité du régulateur secours carburant par desserrage de sous-ensembles internes et de ses fixations sur la PMA. Apparition d'une fuite de carburant.
- Rupture de l'arbre, perte de fonctionnalité du relais d'accessoires et endommagement de la cinématique de la manette des gaz par mouvement orbital de l'extrémité d'arbre toujours entraîné par la PMA ou par échappement énergétique de débris.
- Rupture et dissociation des carters de la PMA, perte d'entraînement du pignon conique endommagé et arrêt rapide la chaîne cinématique.
- Inflammation du carburant sur canal PC et propagation du feu à l'ensemble du tunnel réacteur (mécanisme du feu dans le tunnel réacteur présenté en annexe 6).
- Atteinte des câbles de commandes de vol et perte de contrôle définitive de l'appareil.

Ce scénario est en accord avec les analyses effectuées. Cependant, il ne peut être entièrement démontré compte tenu de l'état de dégradation des débris et de l'absence d'une partie d'entre eux (liaisons, fragments d'arbre de transmission, PMA).

2.5. Causes possibles d'un desserrage des différentes liaisons de l'arbre de transmission flexible

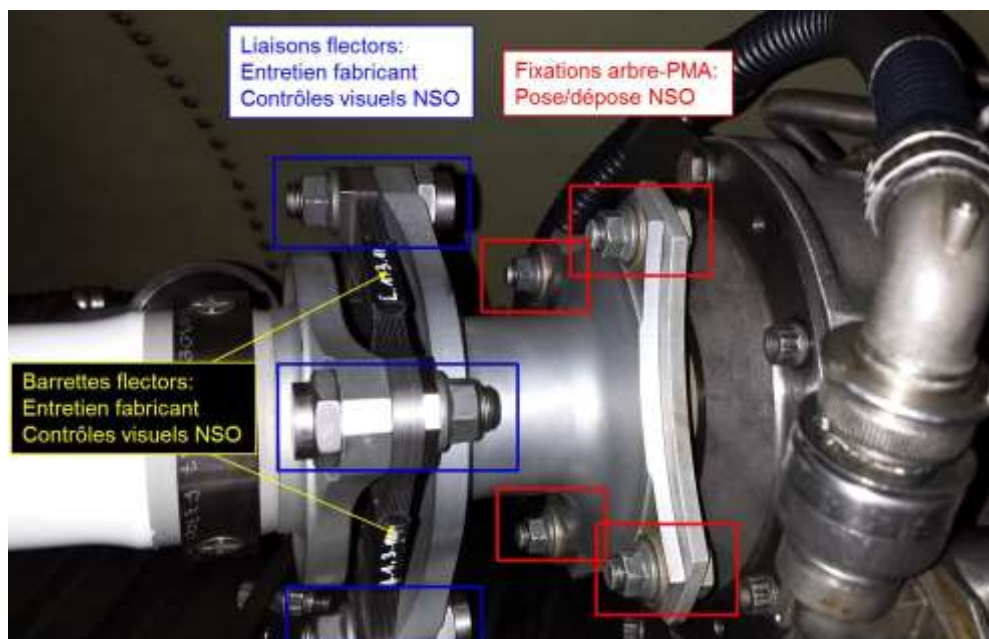
La perte de serrage d'une ou plusieurs liaisons boulonnées de l'arbre de transmission flexible peut résulter :

- d'un acte non sûr lors de l'opération de pose de l'arbre ;
- d'une perte des qualités de freinage d'un ensemble vis-écrou usagé ;
- d'une fragilité des contrôles de l'état des liaisons.

2.5.1. Hypothèse d'un acte non sûr lors d'une opération de pose de l'arbre

Les différentes liaisons de l'arbre de transmission flexible sont manipulées et contrôlées aux différents niveaux d'intervention¹⁸ NSI ou NSO :

- Les 4 fixations boulonnées reliant les barrettes « flectors » à chaque extrémité font partie intégrante de l'arbre et sont entretenues au niveau industriel par le fabricant (NSI). Elles sont également contrôlées visuellement par les opérateurs techniques du NSO, sans qu'aucune intervention physique ne soit autorisée à ce niveau.
- Les 3 vis imperdables assurant l'assemblage de l'arbre sur le relais d'accessoires sont manipulées par les opérateurs techniques du NSO lors des opérations de pose/dépose de l'arbre ou de recul moteur.
- Les 4 ensembles vis-écrous assurant l'assemblage de l'arbre sur la PMA sont manipulés par les opérateurs techniques du NSO lors des opérations de pose/dépose de l'arbre ou de recul moteur.



Fixations des « flectors » (encadrés bleus), liaisons d'assemblage sur la PMA (rouge) et niveaux respectifs d'intervention

L'opération de pose de l'arbre est décrite dans la CT 31-51-403.

Les actes non sûrs lors de la pose de l'arbre de transmission peuvent se traduire par :

- un montage non conforme des liaisons d'extrémité ;
- une intervention par erreur sur un écrou de fixation de « flector ».

¹⁸ NSI : niveau de soutien industriel. NSO ; niveau de soutien opérateur.

2.5.1.1. Assemblage non conforme des liaisons d'extrémité de l'arbre

Un assemblage non conforme peut résulter de l'oubli d'assemblage d'une ou plusieurs fixations ou de l'application d'un couple de serrage inadéquat sur une ou plusieurs fixations.

Les expertises ont montré que les 4 fixations de l'arbre sur le plateau PMA étaient toutes présentes lors de l'endommagement de la transmission en fonctionnement. De plus, les 3 vis imperdables côté relais d'accessoires étaient en place au début de la dégradation.

L'hypothèse d'un oubli d'assemblage d'une ou plusieurs fixations est rejetée.

Les différentes fixations sont d'abord accostées à l'aide de clés, puis serrées à l'aide d'une clé dynamométrique avec un couple défini dans le descriptif de l'opération de pose (CT 31-51-403).

Une erreur dans l'application des couples de serrage est faiblement probable, compte tenu du bon état d'étalonnage de l'outil et du savoir-faire des opérateurs.

L'hypothèse d'une application d'un couple de serrage inadéquat est peu probable.

2.5.1.2. Intervention par erreur sur un écrou de fixation des « flectors »

Les observations suivantes ont été effectuées :

- Sur les fragments d'arbre, un écrou constaté manquant sur une demi-bride de « flector » côté relais d'accessoires s'est échappé complètement par dévissage.
- Des essais ont montré qu'il est possible de desserrer les écrous de ces fixations (12 mm) avec une clé de 13 mm, employée pour les autres fixations d'extrémité.
- Les liaisons « flector » sont situées à quelques centimètres des brides de fixation de l'arbre sur la PMA et sur le relais d'accessoires.

L'hypothèse d'une intervention par erreur sur un écrou de fixation de « flector » est possible.

2.5.2. Hypothèse d'une perte des qualités de freinage d'un ensemble vis-écrou usagé

Caractéristiques des fixations vis-écrous :

Les 4 ensembles vis-écrous des fixations de l'arbre sur la PMA font partie de la cellule et sont consommables. Chaque ensemble est composé d'une vis de précision, d'une rondelle et d'un écrou hexagonal à embase auto-freiné. Les écrous et les vis ne sont pas appariés et peuvent être remplacés indépendamment l'un de l'autre.

À chaque opération de pose / dépose, ces ensembles peuvent être réutilisés. Les critères de remplacement de ces vis et écrous ne sont pas définis et relèvent des règles de l'art non écrites. Aucun problème de ravitaillement de ces pièces au niveau des unités n'est signalé.

L'ensemble retrouvé sur la liaison arbre-PMA a été constaté desserré et le couple de freinage constaté nul (l'écrou peut se visser entièrement à la main). L'écrou incriminé vissé sur une vis neuve présente également un couple de freinage nul.

Des tests réalisés par l'AIA de Bordeaux montrent que le couple de freinage d'un ensemble vis-écrou décroît rapidement au fur et à mesure des assemblages et que ce couple dépend aussi de l'état d'usure de la vis.

L'hypothèse qu'une perte des qualités de freinage d'un ou plusieurs boulons de la liaison arbre-PMA lors de leur réutilisation ait contribué à leur desserrage est possible.

2.5.3. Hypothèse d'une fragilité des contrôles de l'état des liaisons de l'arbre de transmission flexible

Des contrôles visuels de l'arbre de transmission sont effectués à chaque opération de pose de l'arbre, à chaque visite hebdomadaire (VH) et après chaque vol.

Les derniers contrôles visuels de l'arbre (VH à 4 démarrages GTR en amont de l'accident, visite après vol (VAV) au retour du vol le matin de l'accident) n'ont rien révélé d'anormal.

Les liaisons d'extrémité ne sont contrôlées que lors des opérations de pose. Ce contrôle permet de s'assurer que les fixations sont toutes accostées et dans le bon sens mais il ne permet pas de s'assurer du couple de serrage appliqué ni du freinage insuffisant d'un écrou.

Les contrôles ultérieurs de l'arbre (VH, VAV) sont visuels et centrés sur l'état des liaisons «flector» (boulons et barrettes). Le contrôle des liaisons d'extrémité de l'arbre sur la PMA ou le relais d'accessoires n'est pas explicitement requis.

L'ensemble des contrôles effectués sur l'arbre de transmission ne permet pas de détecter une perte de freinage ou l'amorce d'un desserrage des liaisons d'extrémité sur la PMA ou le relais d'accessoires.

PAS DE TEXTE

3. CONCLUSION

3.1. Éléments établis utiles à la compréhension de l'événement

- Les symptômes d'une avarie (bruit et voyants d'alarmes rouge et ambre) surviennent après 17 minutes de vol environ, après la coupure PC et sans signe précurseur perceptible en cabine. Ils traduisent un endommagement avec libération d'énergie et une perte de fonctionnalité du relais d'accessoires.
- La manette des gaz est bloquée par endommagement de sa cinématique.
- La commande électrique du régulateur secours carburant est sans effet.
- Le réacteur reste en régime de fonctionnement plein gaz sec et continue de délivrer une poussée.
- Une fuite de carburant apparaît et un incendie se déclare dans le tunnel réacteur.
- La perte de contrôle, non enregistrée par le FDR, survient un peu plus de 2 minutes après la première détection de feu et résulte de l'endommagement des câblages des commandes de vol par le feu.
- L'arbre de transmission flexible, la PMA et leurs liaisons ont été endommagés en fonctionnement, sous l'effet de fortes contraintes vibratoires extérieures à la veine d'air du moteur.
- Des indices de perte de serrage en fonctionnement ont été constatés sur les extrémités de l'arbre de transmission flexible dont les fixations étaient présentes au début de la séquence des endommagements.
- Un écrou à freinage elliptique d'une fixation de « flector » de l'arbre de transmission s'est entièrement dévissé et la seule fixation restante sur 4 (ensemble vis + écrou à freinage elliptique) de l'arbre sur la PMA a été retrouvée desserrée et avec un freinage nul.
- La cinématique de la PMA s'est arrêtée après la destruction de la transmission.
- L'endommagement de la PMA et le desserrage des fixations du régulateur secours carburant (ayant entraîné la fuite de carburant) sont des conséquences des contraintes vibratoires.
- L'arbre de transmission flexible et le régulateur secours carburant ont été reposés par des opérateurs qualifiés 70 heures avant l'événement. Ils ont fonctionné jusqu'à l'accident.
- Les contrôles visuels réguliers effectués sur l'arbre de transmission flexible jusqu'à l'événement n'ont rien révélé d'anormal. Le contrôle des fixations d'extrémité n'est pas demandé lors de ces contrôles.
- Aucun antécédent de destruction de la transmission, de desserrage spontané de ses liaisons ou de destruction de la PMA de cette nature n'est connu.

3.2. Scenario et causes possibles de l'événement

3.2.1. Scenario possible

La défaillance d'une fixation de « flector » ou de plusieurs liaisons d'extrémité de l'arbre de transmission flexible par perte de serrage semble être à l'origine de vibrations anormales ayant entraîné un fonctionnement hors norme de l'ensemble de la transmission.

Les vibrations ont été de nature à endommager d'autres liaisons de l'arbre de transmission, les attaches de la PMA sur le moteur, ainsi que les fixations du régulateur secours carburant sur la PMA et ont conduit à dégrader la rigidité du système de transmission.

Les contraintes vibratoires se sont amplifiées et ont provoqué des endommagements en cascade : dégradation des pignons coniques de la PMA, perte d'étanchéité du régulateur secours carburant par desserrage de ses fixations et fuite de carburant.

L'apparition probable d'un phénomène vibratoire (*WHIRL*) sur l'arbre de transmission a entraîné sa destruction, l'endommagement de la cinématique de la commande des gaz par déplacement de fragments de l'arbre puis l'arrêt de la PMA par rupture du pignon conique mené.

La perte définitive du contrôle de l'appareil est consécutive à l'atteinte des câblages de commandes de vol par l'incendie qui s'est déclaré et propagé dans le tunnel réacteur suite à la fuite de carburant.

3.2.2. Causes possibles de l'événement

Les causes de défaillances primaires (perte de serrage de « flector » ou de liaisons d'extrémité de l'arbre de transmission flexible) peuvent relever des facteurs humains et organisationnels liées aux opérations de maintenance et trouver leur origine dans :

- Un acte non sûr lors des opérations de pose de l'arbre (application d'un couple de serrage inadéquat sur les liaisons d'extrémité ou intervention par erreur sur une liaison « flector »).
- La fragilité des contrôles périodiques de l'arbre de transmission flexible qui ne demandent pas de vérification spécifique des liaisons de l'arbre de transmission sur le relais d'accessoires et la PMA et qui, en l'état, ne permettent pas de détecter aisément l'apparition d'une anomalie (perte de freinage ou amorce d'un desserrage).
- Une dégradation non perçue des qualités de freinage d'un ensemble vis + écrou (liaisons arbre-PMA) résultant de réemplois successifs lors des opérations de dépose et repose de l'arbre de transmission.

4. RECOMMANDATIONS DE SECURITE

4.1. Mesures de prévention ayant trait directement à l'événement

4.1.1. Montage des liaisons de l'arbre de transmission sur Mirage 2000

La dépose de l'arbre de transmission est réalisée à chaque recul du GTR ou intervention spécifique d'échange de l'arbre suite à la détection d'un défaut selon les critères de la CT 31-51-601.

Cette opération implique le démontage des liaisons d'extrémité de l'arbre sur le relais d'accessoires et la PMA. Les boulons de ces liaisons ne sont pas remplacés systématiquement. Ils sont réutilisés et leur état est vérifié uniquement avant la pose de l'arbre.

Leurs qualités de freinage diminuent à chaque réutilisation et ces pertes progressives de qualité, dont le seuil de détection peut être variable, peuvent échapper au jugement de l'opérateur qui est fondé sur des règles de l'art non écrites et l'expérience.

Lorsqu'un défaut est constaté, l'opérateur peut remplacer la vis ou l'écrou individuellement. Cependant, les qualités de freinage dépendent de l'ensemble des composants de la fixation.

Le serrage au couple préconisé ne garantit pas le maintien de la liaison qui présenterait des qualités de freinage dégradées.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande à :

la DGA, en relation avec l'armée de l'air, de prendre des mesures destinées à fiabiliser le processus de montage des liaisons de l'arbre de transmission et permettant de leur garantir des qualités de freinage suffisantes au gré des démontages.

4.1.2. Contrôles périodiques de la transmission

Les contrôles périodiques (visite hebdomadaire, visite après vol) consistent en la vérification de l'état de l'arbre de transmission et de ses liaisons flexibles mais ne prévoient pas de vérification spécifique des liaisons de l'arbre de transmission sur le relais d'accessoires et le PMA.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande à :

la DGA, en relation avec l'armée de l'air, de prendre des mesures destinées à fiabiliser les contrôles périodiques de la transmission en élargissant les vérifications à toutes les liaisons de l'arbre de transmission.

Les contrôles ne permettent pas de détecter aisément l'apparition d'une anomalie telle une perte de freinage ou l'amorce d'un desserrage.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande à :

la DGA, en relation avec l'armée de l'air, de prendre des mesures destinées à faciliter la détection des anomalies au niveau des fixations de l'arbre de transmission (amorce de desserrage).

4.2. Mesures de prévention n'ayant pas trait directement à l'événement

Port de l'équipement de tête et éjection

Lors de l'éjection, le casque et le masque du pilote ont été arrachés. Les deux visières étaient baissées, mais la jugulaire n'était pas fixée.

Les conditions de l'éjection (perte de contrôle, trajectoire tournoyante nez bas, centrifugation des membres...) rendaient difficile sa préparation et l'ajustage même tardif de la jugulaire du casque.

Bien que le pilote soit parvenu au sol sans se blesser à la tête (après être passé au travers de branches d'arbres et avoir été retenu en hauteur par le parachute), l'absence de la protection du casque aurait pu avoir d'autres conséquences en de telles circonstances.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande à :

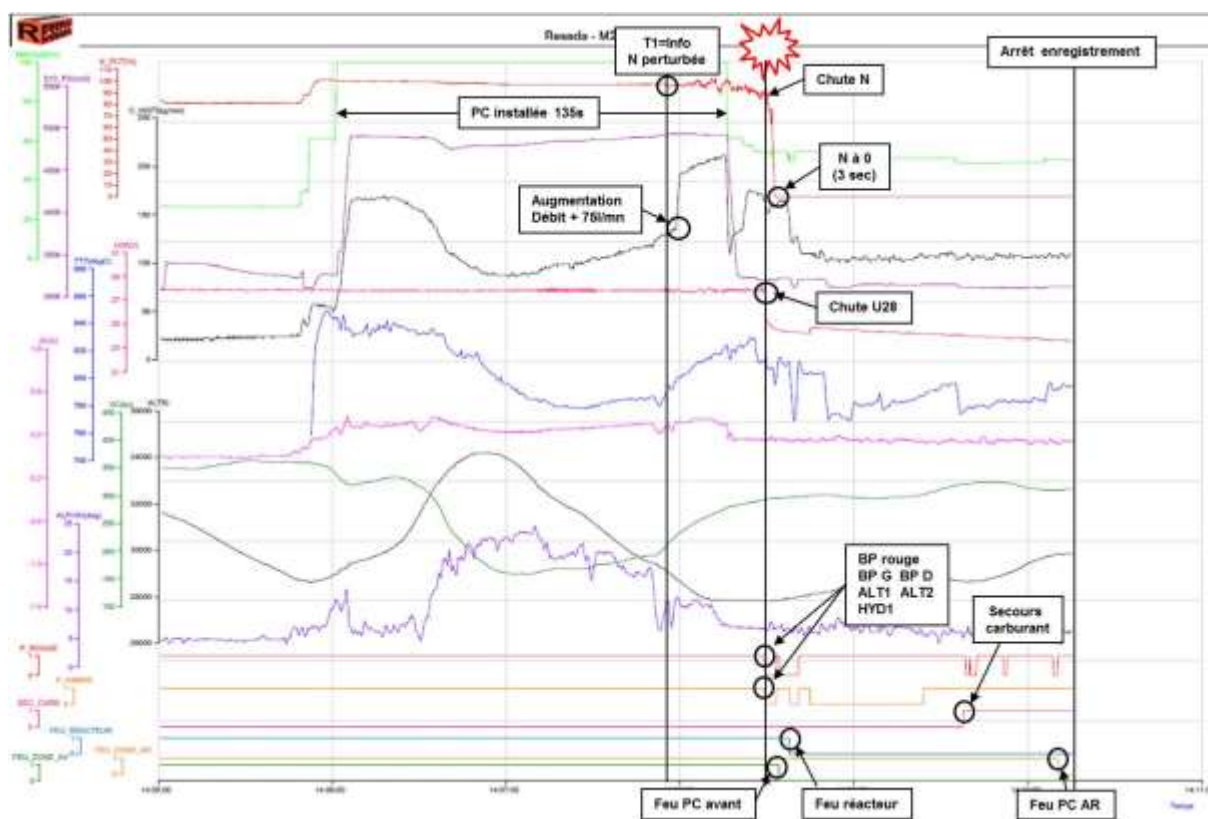
l'armée de l'air et la marine nationale de sensibiliser, à titre de retour d'expérience, les utilisateurs du casque LA100 sur l'importance de la bonne fixation de la jugulaire ainsi que d'un réglage adapté à la morphologie de la tête à l'aide des différentes cales.

ANNEXES

ANNEXE 1	Restitution des paramètres significatifs	44
ANNEXE 2	Analyse chronologique des alarmes et des anomalies	46
ANNEXE 3	Examens détaillés effectués sur le GTR et les éléments périphériques	49
ANNEXE 4	Examen de la transmission PMA-relais d'accessoires.....	56
ANNEXE 5	Apparition d'un phénomène « <i>WHIRL</i> »	73
ANNEXE 6	Mécanisme du feu dans le tunnel réacteur	74

ANNEXE 1

Restitution des paramètres significatifs



Évolution des paramètres significatifs lors de la séquence finale d'enregistrement

Le graphique ci-dessus représente l'évolution des paramètres suivants :

- régime moteur (N -capteur PMA) ;
- position manette des gaz MANGAZ ;
- section tuyère (S1)0 ;
- température tuyère (Tt7) ;
- consommation instantanée (C-INST) ;
- tension continue 28V (U28) ;
- altitude (ALT) ;
- vitesse (VC) ;
- incidence (ALPHA) ;
- accélération axiale (Jx) ;
- répéteurs de panne (P rouge et P ambre) ;
- commande secours carburant (SEC CARB) ;
- voyants feu du tunnel réacteur.

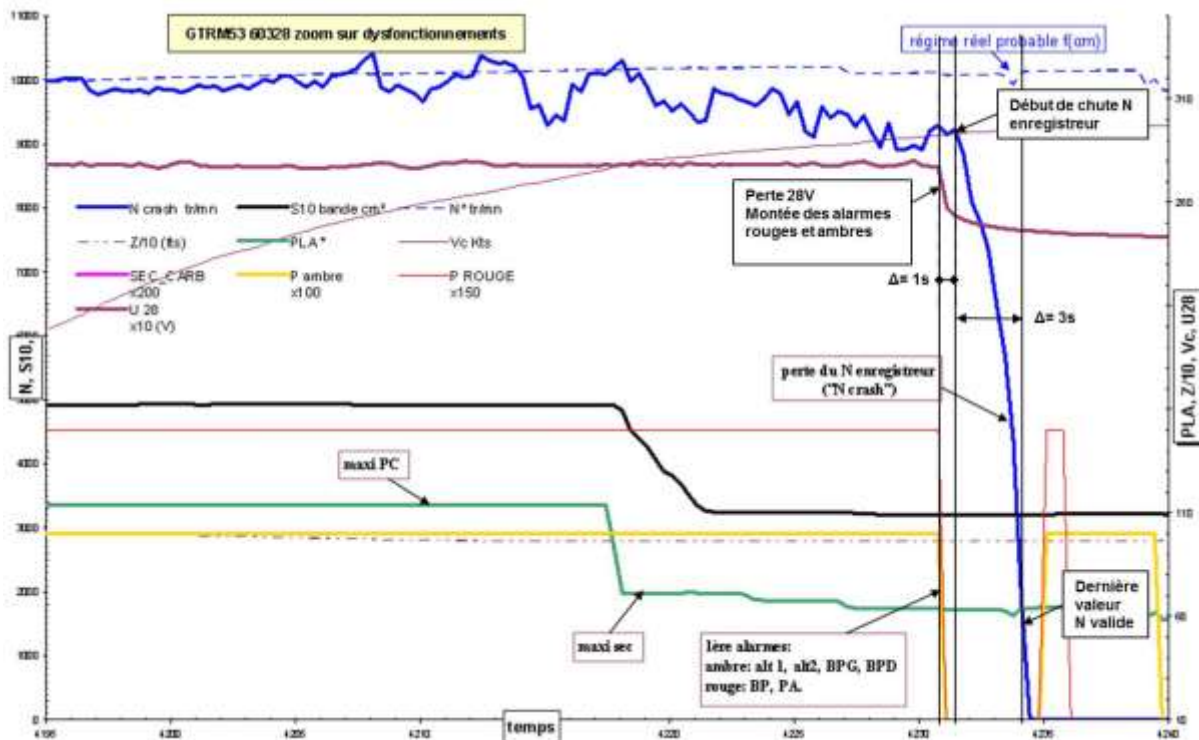
Le paramètre N devient perturbé en régime PC stabilisé.

La consommation de carburant augmente brutalement de 75 l/min sans incidence sur la Tt7. Après la coupure PC, la consommation baisse puis ré-augmente au-dessus de la valeur attendue, pour baisser à nouveau ensuite.

Les voyants feu PC avant, feu réacteur, feu PC arrière s'allument successivement.

L'activation du secours carburant n'a pas d'incidence sur les autres paramètres.

L'enregistrement s'arrête après l'allumage du voyant feu PC arrière.



Détail de la chronologie des dysfonctionnements

Le paramètre N, perturbé, s'effondre **une seconde après la chute du 28 V** et la montée des alarmes rouges et ambres. Il demeure enregistré en baisse franche durant 3 secondes avant de tomber à zéro.

ANNEXE 2

Analyse chronologique des alarmes et des anomalies

- T0 – 43,5 s : les variations du paramètre 28V continu (variations de 0,3V) constatées durant 21s ne sont concomitantes avec aucune anomalie. Selon l'avionneur, ces variations sont parfois observées sur d'autres appareils et ne sont pas expliquées. Elles sont jugées sans relation avec l'événement.
- T0 : les variations erratiques du régime moteur N¹⁹ constituent une anomalie remarquable non perceptible en cabine car l'information du régime moteur présenté au pilote provient d'un autre capteur. Des fluctuations du 28V et de la Tt7 apparaissent de manière concomitante.
- T0 + 4,5 s : l'augmentation soudaine du débit carburant sans modification des autres paramètres moteur (stable en régime PC) traduit une fuite apparue en aval des débitmètres.

Les premières anomalies (N moteur perturbé et fuite carburant) surviennent en régime PC stabilisé et ne sont pas perceptibles par le pilote.

- T0 + 21,5 s : le débit carburant diminue après la coupure PC mais il reste trop élevé en plein gaz sec par rapport au modèle de fonctionnement normal. La fuite carburant est installée.
- T0 + 34,5 s : l'apparition des alarmes ambres et rouges s'accompagne d'une chute de la tension continue de 28V à 25V et de la perte de la mesure Ti²⁰. Ces symptômes sont le signe de la perte de l'alimentation alternative entraînant l'arrêt des pompes basse pression carburant et la déconnexion du pilote automatique. Les voyants **ALT1**, **ALT2**, **BP.G**, **BP.D** s'allument donc, ainsi que **PA** et **BF**²¹. Le voyant LIM s'allume et l'alarme sonore retentit en raison de la perte du calculateur avec un délai de 3 secondes. Les visualisations CTH, CTM, VTM, VTLG, VTLD ne sont plus alimentées. L'allumage du voyant **HYDI** signifie que la pression hydraulique du circuit 1 devient inférieure à 175 bars.

La concomitance des alarmes indique la perte de fonctionnalité du relais d'accessoires. Les paramètres moteur montrent que celui-ci continue de fonctionner.

Le bruit perçu par le pilote (détonation) et le blocage de la manette des gaz ne sont pas expliqués. Ils sont consécutifs à une avarie ayant endommagé la cinématique de la commande des gaz.

- T0 + 35,5 s : le paramètre N moteur du capteur PMA chute rapidement et tombe à zéro en 3 secondes. La roue phonique du capteur délivrant l'information du paramètre N sur la PMA s'arrête faute d'entraînement ou bien le capteur est endommagé. Le voyant **TR**

¹⁹ Le paramètre N moteur enregistré est élaboré à partir d'un capteur à roue phonique situé sur la PMA.

²⁰ Température d'impact, prise à l'entrée d'air du réacteur.

²¹ Allumage **BP** : Les deux pompes BP cessent de fonctionner suite à la perte de l'alimentation alternative. Seule la pressurisation des nourrices (+110 mbar) pressurise la ligne d'alimentation. À 28 000ft (~330 mbar) au moment de l'événement, la pression d'alimentation est donc d'environ 440 mbar. **BP** s'allume pour une pression absolue inférieure à 825 mbar. Son allumage est confirmé par le pilote.

s'allume avec un délai de 3s après l'arrêt d'alimentation alternative des transfo-redresseurs. **MAN** s'allume en raison de la perte d'une chaîne CDVE lorsque la pression hydraulique devient inférieure à 95 bars.

La chute du N moteur enregistré survient après la perte de fonctionnalité du relais d'accessoires et peut signifier l'arrêt de l'entraînement de la PMA.

- T0 + 39,5 s : le voyant feu PC avant s'allume, suivi à T0+43s du voyant feu moteur²². Ils indiquent la naissance et la propagation d'un incendie dans le tunnel réacteur 5 secondes après l'apparition des premières alarmes.
- T0 + 45 s : l'équipier aperçoit une traînée blanche sortant de la tuyère. Cette traînée est vraisemblablement du carburant liquide, non enflammé²³. Aucune flamme n'est observée à l'extérieur.

Une traînée de carburant apparaît consécutivement aux symptômes simultanés décrits par le pilote.

- T0 + 48,5 s : la tension continue chute sous 26V et entraîne un délestage du réseau électrique. Ce dernier provoque l'allumage du répéteur ambre, accompagné des voyants CC, ANEMO, BECS, PELLEs, SOURIS. La tension baisse ensuite régulièrement, indiquant une décharge continue de la batterie.
- T0 + 1 min 43 s : la commande du régulateur secours carburant est actionnée et le pilote donne plusieurs impulsions vers l'avant. Le moteur ne réagit pas aux impulsions.

Le secours carburant est inefficace. Le moteur reste en régime de fonctionnement normal en plein gaz sec.

- T0 + 2 min 08 s : les répéteurs de panne ambre et rouge s'allument. Les pannes correspondantes ne sont pas identifiées.
- T0 + 2 min 15 s : le voyant feu PC arrière s'allume, indiquant la propagation de l'incendie dans le tunnel réacteur.
- T0 + 2 min 20 s : l'arrêt de l'enregistrement est vraisemblablement consécutif à une atteinte par l'incendie des câblages cheminant entre le boîtier d'acquisition de paramètres (situé en avant du moteur) et l'enregistreur, situé près du cadre 32, sous le conduit moteur.

La naissance et la propagation d'un incendie dans le tunnel du réacteur est probablement à l'origine de l'arrêt de l'enregistrement et à la perte de contrôle de l'appareil par atteinte des câblages électriques des commandes de vol.

²² Les lignes de détection détectent soit une élévation de température localisée (500°C environ), soit une température moyenne d'environ 270°C ±20°C par rapport à la température ambiante sur toute la longueur du détecteur.

²³ La combustion du kérosène à l'air libre est accompagnée d'un important dégagement de fumée noire.

Annonces de l'équipier

- T0 + 2 min 27 s : la confirmation de la vitesse du leader (300kts) montre que le moteur continue de fonctionner en régime plein gaz sec après l'arrêt de l'enregistrement.
- T0 + 2min 47 s : la trajectoire de l'avion du leader surprend l'équipier. La perte de contrôle vient de survenir.
- T0 + 3 min 35 s : l'éjection du pilote vient d'avoir lieu.
- T0 + 3 min 56 s : l'impact de l'avion vient d'avoir lieu.

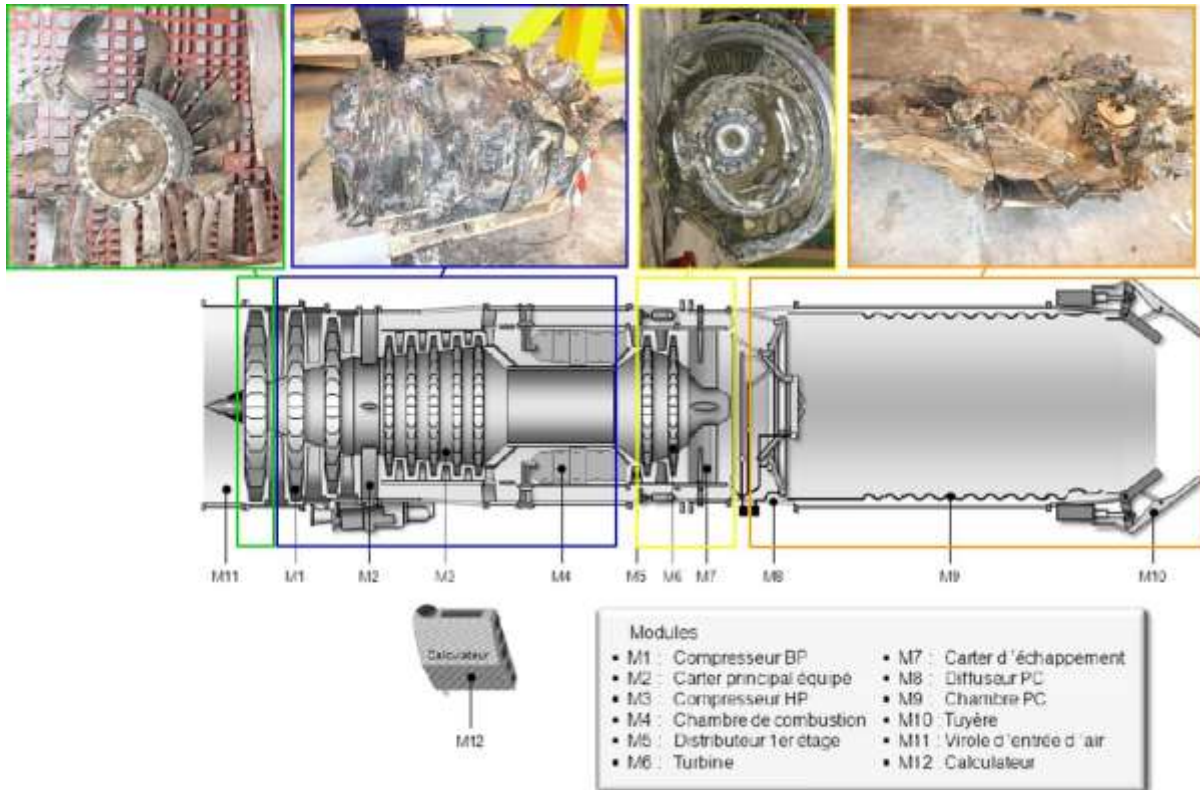
Les annonces de l'équipier permettent d'établir que :

- Le contrôle de l'avion est perdu en un peu plus de 2 minutes après les premières alarmes et après que tous les voyants feu soient allumés (estimation 2min12s).
- Il s'écoule un peu moins de trois minutes entre les premières anomalies non perçues par le pilote et la perte de contrôle de l'appareil (estimation 2min46s).
- Le temps estimé entre la perte de contrôle et l'éjection (48 secondes) est cohérent avec les tentatives infructueuses du pilote de reprendre le contrôle de l'appareil.

ANNEXE 3

Examens détaillés effectués sur le GTR et les éléments périphériques

1. Etat des différents ensembles



Éléments séparés : étage RM1 ; bloc compacté de l'étage RM2 au module M4 ; bloc M5 à M7 ; canal PC et volets de tuyère

2. Veine d'air du GTR

L'expertise de la vaine d'air du GTR indique :

- L'encastrement des aubes de la roue mobile 1^{er} étage (RM1) dans le redresseur 1^{er} étage (RD1).
- L'absence de mutilation des RM2 coté bord d'attaque (BA).
- Le secteur de chambre de combustion observé est peu cokéfié.
- L'absence d'indice d'absorption de corps étranger.
- L'absence de déformation des aubes dans le sens anti-rotation côté compresseur.
- Les paliers 1 et 2 ne présentent pas de signe de surchauffe.
- Des mouvements relatifs axiaux de pièces consécutives à l'impact et l'absence d'indice de rotation à l'impact.

3. Enceinte avant (compresseur BP)

L'arbre de liaison GTR-support des équipements (SE) est rompu en statique au niveau de la section fusible.

L'arbre de liaison GTR-PMA n'est pas rompu (pas de section fusible dans sa définition) mais tordu.

L'endoscopie du multiplicateur (trio conique moteur) révèle :

- l'absence d'endommagement de la denture de la roue d'entraînement (environ 2/3 de la denture sont visibles) ;
- l'absence d'endommagement des dents visibles des deux pignons de sortie (SE et PMA) ;
- l'absence d'endommagement de la denture du multiplicateur, hormis la présence de terre et de boue séchées.

Les dégâts internes observés (écrasement des tôles du scaphandre, déplacement des pignons par rapport à la roue, torsion de l'arbre BP, rupture des vis de fixation du roulement), sont vraisemblablement consécutifs à l'impact au sol.

4. Support des équipements (SE)

Peu de fragments du carter ont été retrouvés.

L'absence de rupture au niveau des pignons du SE est constatée.

L'expertise de la pompe PC indique :

- la rupture du carter diffuseur de sortie est vraisemblablement consécutive à l'impact ;
- les roulements sont en bon état ;
- le joint *sealol* est en bon état.

5. Relais d'accessoires



Débris du relais d'accessoires

Les rotules de fixation sur la cellule sont retrouvées en bon état, avec absence de jeu. Les supports sont cassés. Les bagues de ferrures d'attache et les attaches de suspension sur la cellule sont en bon état.

L'expertise du relais d'accessoires montre également :

- l'absence d'usure anormale des dentures du trio et du duo conique du relais ;
- l'absence de trace de fatigue au niveau de la rupture du pignon d'entraînement de la pompe hydraulique ;
- l'absence de trace de fatigue sur les faciès de rupture du carter du relais au niveau de la fixation de la pompe hydraulique ;
- aucune vis n'est desserrée ;
- des empreintes de dents du pignon mené du couple conique incrustées à l'intérieur du carter ;
- la roue libre est déformée, mais pas cassée (semble lié à l'impact) ;
- aucun indice de dysfonctionnement d'un équipement du relais antérieur à l'impact ;
- les arbres fusibles d'entraînement des équipements ne sont pas rompus.

L'ensemble des constats indique l'absence de vibration du relais d'accessoires, l'absence de dysfonctionnement des accessoires et que la cinématique du relais d'accessoires était vraisemblablement immobile à l'impact.

6. Arbre de transmission flexible

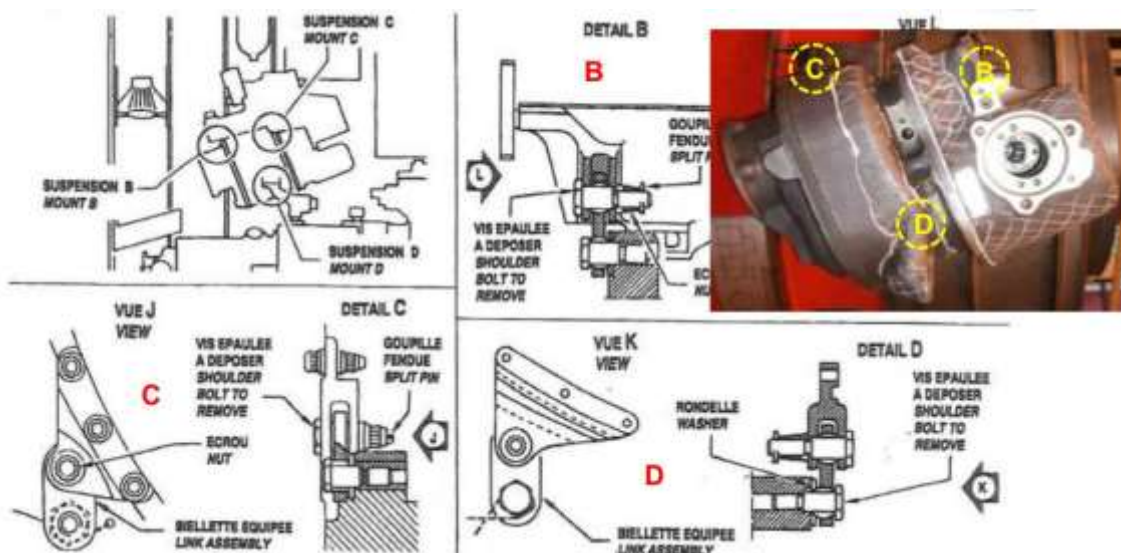
Le corps de l'arbre n'a pas été retrouvé, à l'exception d'un petit fragment.

L'analyse binoculaire des extrémités de l'arbre de transmission n'a pas mis en évidence de fissuration par fatigue (coté PMA et coté relais).

Les extrémités de l'arbre et ses liaisons ont fait l'objet d'une étude détaillée.

7. PMA

7.1. Fixations sur le module 2



Positionnement des attaches de la PMA sur le module 2

L'absence de jeu sur les 3 rotules de fixation et une usure mineure sur l'ergot et la barrette sont observées.

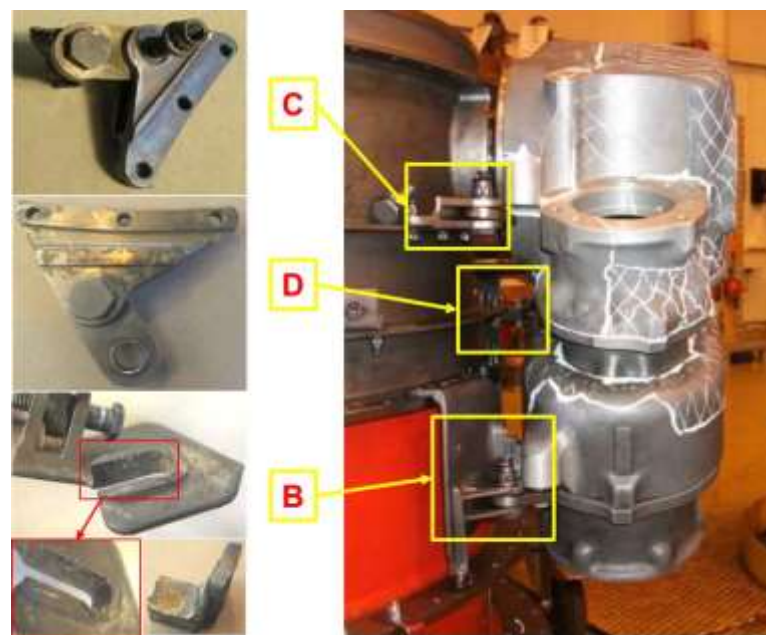
Des traces de *fretting* importantes sont constatées sur les attaches et les brides de fixation.

Des traces de *fretting* importantes sont relevées sur la plaque d'arrêt, tandis que le niveau d'usure observé se situe dans l'expérience.

Les constats détaillés démontrent la présence de vis serrées sur les trois fixations.

Sur la suspension B (côté arbre de transmission) un matage important est constaté, témoignant d'une surcharge répétée mais ponctuelle et importante sur les faces du support et de la plaque d'arrêt.

Les suspensions B et D, côté sortie de la PMA sont plus endommagées que la suspension C, côté régulateur secours carburant.



Aspect des attaches de la PMA

7.2. Carters



Représentation sur une PMA des parties manquantes des carters (hachurés à la craie)

Environ 30% des carters est manquant.

Les faciès des nombreuses ruptures des carters observées sont exemptes de trace de fatigue.

Des traces d'interposition et de matage entre les brides du carter intermédiaire et du carter principal sont observées.

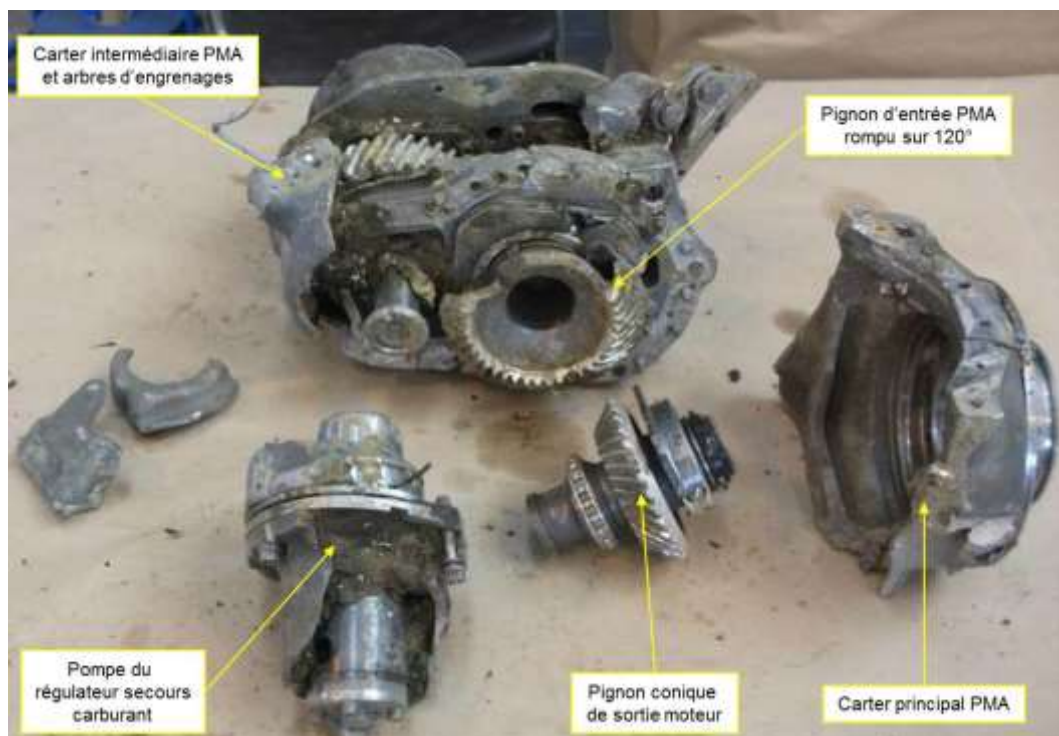
La bride du carter principal est usinée par la cage de roulement de la roue conique.

La rotation du carter intermédiaire par rapport au carter principal est constatée.

Les *hélicoils* des trois points de fixation du régulateur de secours sont présents dans leur logement.

Ces constats attestent de l'ouverture des carters en fonctionnement.

7.3. Roue conique d'entrée



Aspects des fragments principaux de la PMA et de la roue conique d'entrée

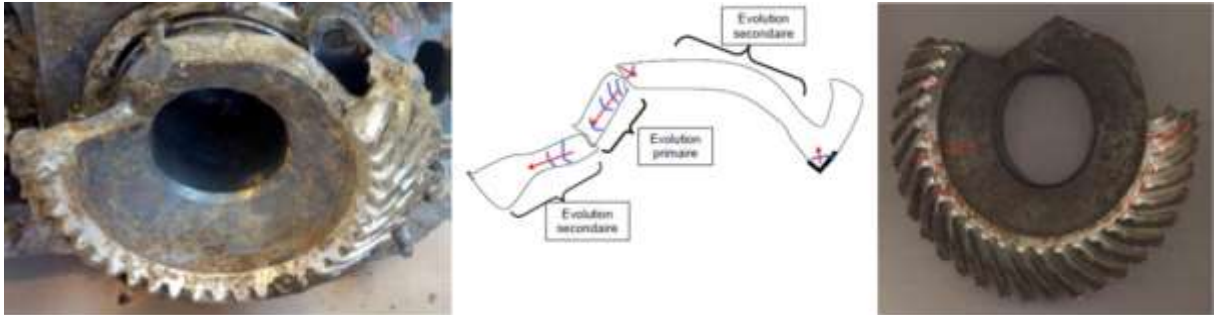
Un secteur de 120° est rompu et manquant.

Une fissure primaire sous sollicitation vibratoire semble initiée à partir d'un fond de denture et se propage vers le moyeu. Deux fissures secondaires partent de la fissure primaire et se propagent vers les dentures, libérant ainsi les morceaux.

De multiples amorces de fissures secondaires sont observées en fond de denture.

L'examen de la structure au MEB montre la présence de cémentites en réseau plus ou moins continu.

La rupture du pignon conique d'entrée PMA s'est produite en fonctionnement.



Analyse du faciès de rupture du pignon conique d'entrée PMA ; propagation de la fissure et amorces de fissures secondaires en fond de denture

7.4. Régulateur de secours carburant

Le moteur électrique est absent.

Il y a eu rotation de la plaque réducteur et du boisseau.

L'absence des 4 vis de fixation du réducteur et du moteur électrique sans endommagement des taraudages semble être consécutive à des vibrations ayant entraîné le dévissage.

La rupture d'une vis de maintien de l'enrichisseur du régulateur de secours et des traces de matage au niveau du plan de joint sont constatées, ainsi qu'un début de dévissage d'une douille rapportée.

Le boisseau est trouvé en position ralenti. Les marques qu'il porte indiquent qu'il a fonctionné en position reculé d'environ 30 mm par rapport à sa position normale de fonctionnement.

Les autres vis du régulateur ont été retrouvées serrées et freinées.

L'absence de trace de battement dans la soupape régulatrice et dans le clapet suppresseur est constatée.

Des traces d'incendie sont visibles à l'extérieur et à l'intérieur du carter, au niveau de la pompe du régulateur.



Aspect du régulateur secours et boisseau

La pompe de secours est retrouvée désolidarisée du régulateur de secours et de la PMA.

L'expertise indique que :

- la pompe n'est pas bloquée, toutes les palettes sont présentes et intègres, la came et le rotor ne présentent pas de trace d'interférence ou de frottements relatifs bien que l'arbre soit rompu au niveau du palier arrière ;
- les déformations des brides, des vis d'assemblage et les traces de *fretting* montrent une très importante sollicitation vibratoire ;
- des écartements inter-brides de l'ordre de 5 mm (desserrage des vis) et l'extrusion des joints toriques sont observés, conséquences vraisemblables d'une excitation vibratoire ;
- la rupture de l'arbre de la pompe de secours est secondaire et est consécutive à une déformation (désalignement en rotation) ;
- les constats attestent de fortes contraintes vibratoires sur ces ensembles.

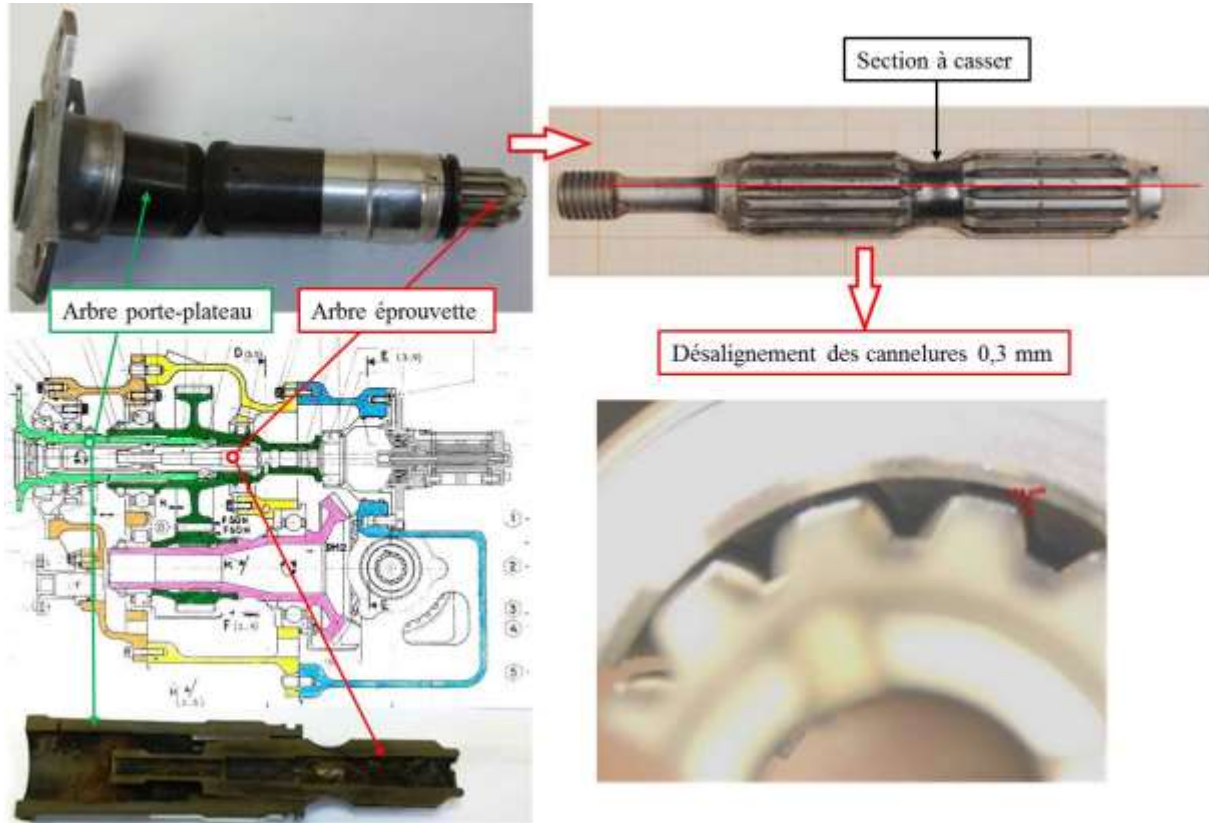


Aspect de la pompe de secours carburant ; de l'arbre d'entraînement et des liaisons sur la PMA

ANNEXE 4

Examen de la transmission PMA-relais d'accessoires

1. Sortie de la PMA - arbre éprouvette



Arbre éprouvette de la PMA et désalignement des cannelures

Les résultats de l'examen de l'arbre éprouvette déposé indiquent :

- un état relativement correct de l'ensemble des cannelures ;
- un vrillage de l'arbre éprouvette au niveau de la section à casser, mis en évidence par le désalignement des cannelures amont par rapport aux cannelures aval (impossibilité de passer l'arbre éprouvette au travers des cannelures internes) ;
- un désalignement entre les cannelures amont et aval d'environ 0,3 mm ;
- un décalage angulaire observé de l'ordre d'un degré et dans le sens d'un couple résistant côté relais d'accessoires.

2. Arbre porte-plateau de la PMA

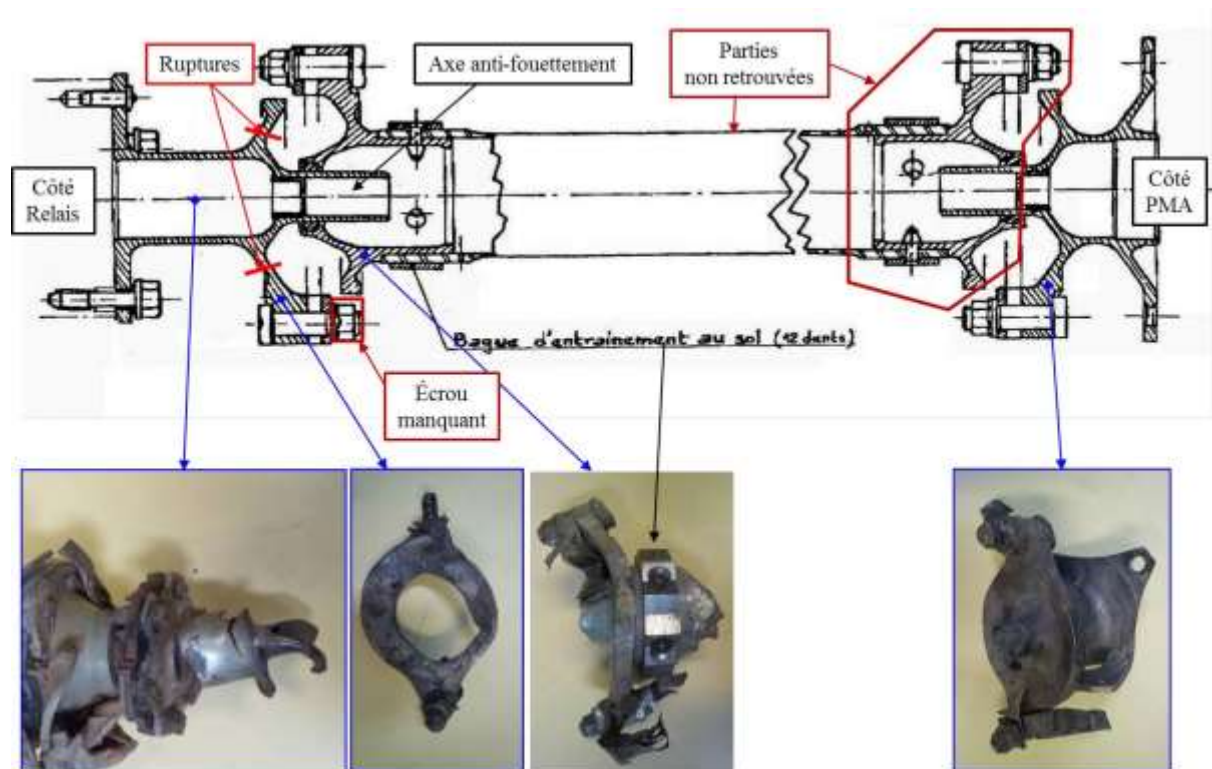


État des composants de l'arbre porte-plateau

L'analyse de l'arbre porte plateau de la PMA montre :

- un désalignement de l'arbre porte plateau ;
- des traces de *fretting* (statique) sur un secteur de 120° (A) ;
- que les «oreilles» N° 1 et 2 du plateau sont tordues vers l'arrière (B) ;
- sur la piste intérieure du roulement :
 - une absence de trace de grippage ou de portée sectorielle ;
 - du *fretting* en regard des billes indiquant des vibrations importantes en statique (sans rotation).
- un *fretting* sur le centrage affectant toute la circonférence (C).

3. Arbre flexible



Endommagement sur débris d'arbre flexible

La demi-bride de « flector » côté PMA avec sa bague de fixation sur le corps de l'arbre est manquante.

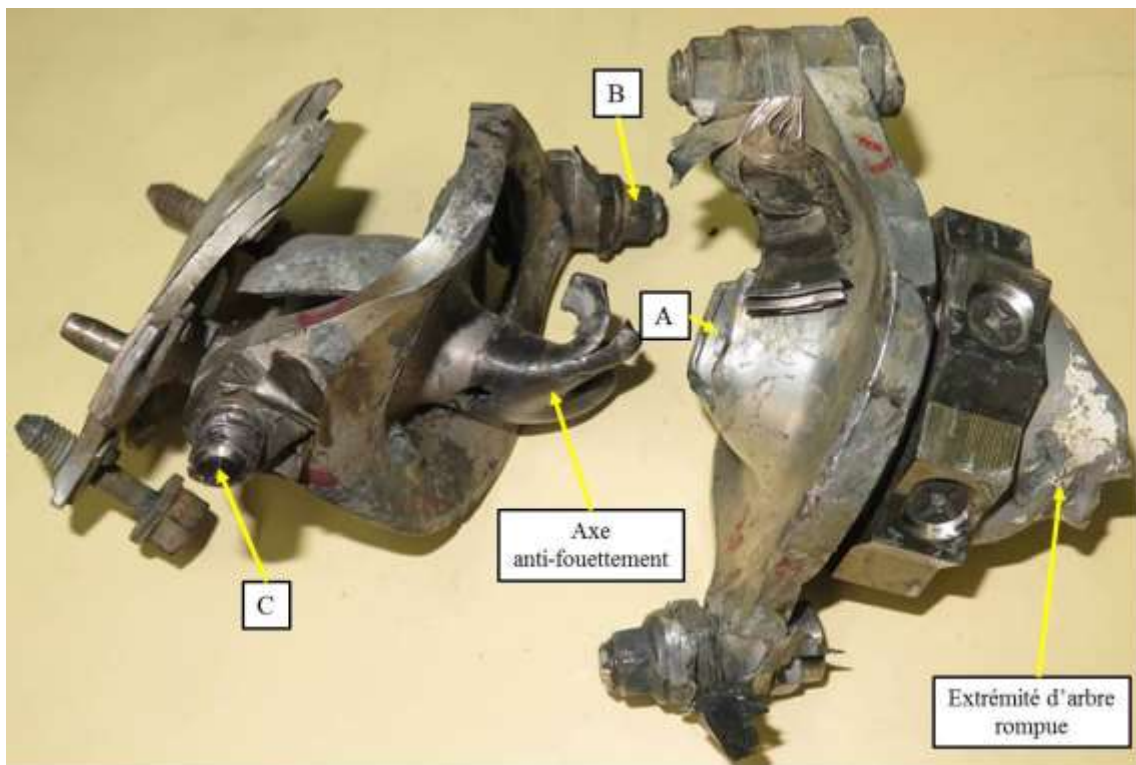
Toutes les barrettes des « flector » sont rompues et /ou absentes.

Un écrou de maintien des barrettes ainsi que la cale associée manquent sur la fourche amont du « flector » côté relais.

Le type d'endommagement (évasement) de l'axe anti-fouettement côté relais indique une dissociation du « flector » avant l'impact.

Le corps de l'arbre n'a pas été retrouvé à l'exception de petits morceaux.

3.1 Ensemble « flector » côté relais



Fragments d'arbre flexible côté relais d'accessoires

– Axe anti fouettement :

Il est plié et évasé et ne porte pas de trace de frottement circonférentiel.

Il est sorti de son logement avant l'impact car l'évasement observé a des dimensions supérieures à celles de l'orifice A de la fourche côté arbre.

– Barrettes côté arbre :

Les boulons de fixation sont en place et serrés et les cales sont présentes.

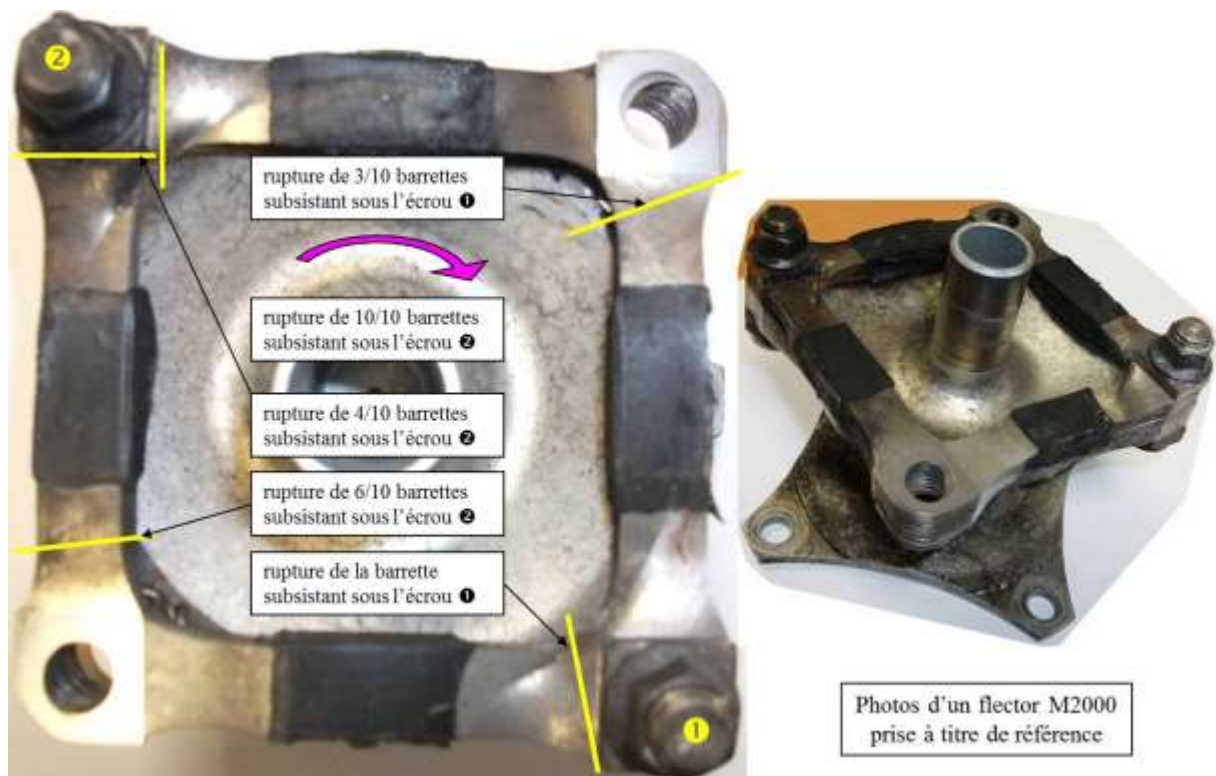
Toutes les barrettes (2x20) sont rompues mais présentes au niveau des fixations.

– Barrettes côté relais :

Le boulon de fixation B est en place et serré avec la cale et 20 barrettes sont rompues ;

L'écrou et la cale sont manquants sur la vis de fixation C et 11 barrettes sur 20 sont absentes de ce point de fixation.

3.2 « Flector » côté PMA



Endommagements sur les « flectors » côté PMA (vu depuis l'avant sur organe intègre de référence)

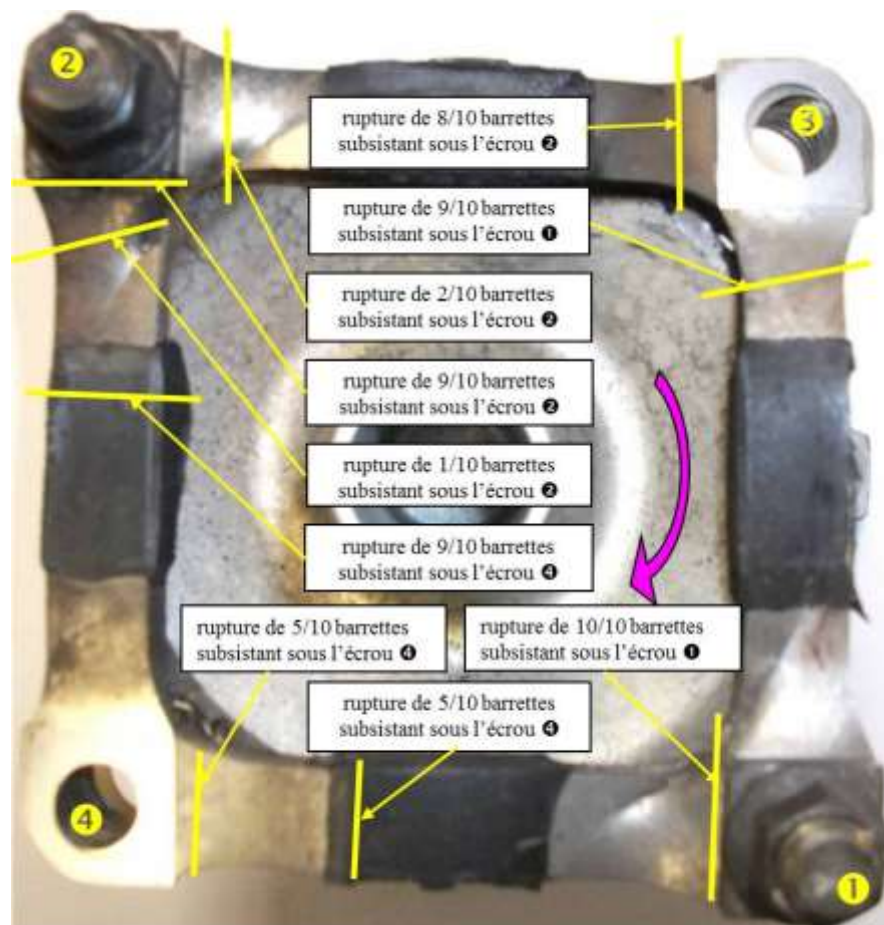
Les deux écrous ❶ et ❷ sont serrés.

Sous l'écrou ❷ les fragments des 20 barrettes sont présents.

Sous l'écrou ❶ ne subsistent que 4 fragments de barrettes.

La fourche côté arbre, sur laquelle ont pu subsister des fragments de barrettes n'a pas été retrouvée.

3.3 « Flector » côté relais d'accessoires



Endommagements sur les flectors côté relais (vu depuis l'avant sur un organe intègre de référence)

Fourche côté arbre :

Les deux écrous ① et ② sont serrés.

Sous l'écrou ② les fragments des 20 barrettes sont présents.

Sous l'écrou ① les fragments des 20 barrettes sont présents.

Fourche côté relais:

L'écrou ④ est serré, l'écrou ③ est absent ainsi que la cale associée.

Sous l'écrou ④ les fragments des 20 barrettes sont présents.

Sous l'écrou ③ 9 fragments de barrettes sont présents.

3.4 Vis de la demi-bride « flector » côté relais



Endommagements sur la vis de la liaison « flector » côté relais (écrou manquant)

L'expertise de la vis ❸ permet de constater :

- l'absence d'arrachement de filets (=> l'écrou manquant s'est dévissé) ;
- des marquages provoqués par l'échappement des barrettes de « flector ».

4. Liaison PMA-arbre de transmission : trous de fixation

L'expertise a porté sur les trous de fixation du plateau de la PMA et ceux de la bride de l'arbre flexible en regard côté PMA.

4.1 Trous de fixation du plateau de la PMA

Endommagements et marquages hors expériences du plateau de PMA

Le trou n° 1 (voir schéma ci-après) est celui dans lequel subsistait le boulon d'assemblage.

Les endommagements identifiés en bord du trou sont marqués en rouge.

Les marquages de l'intérieur de l'alésage du côté de la face du plateau considérée sont en bleu.

La flèche mauve indique le sens de rotation.

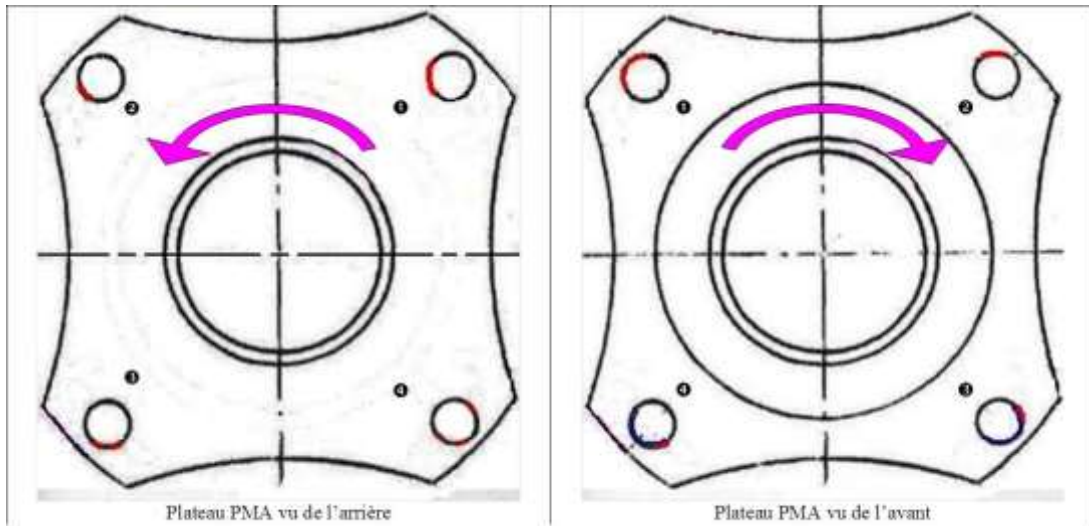


Schéma du plateau de PMA et position des endommagements



Plateau PMA trou n°1 vu de l'avant



Plateau PMA trou n°1 vu de l'arrière

Les ovalisations du trou n°1 sont décalées d'environ 180° au débouché sur les faces. La vis semble s'être mise en biais dans le sens « couple résistant côté arbre ».

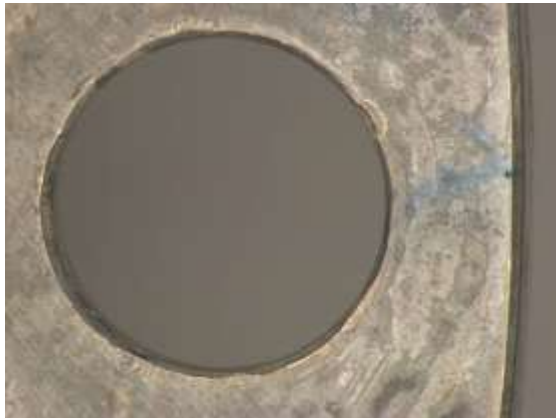


Plateau PMA trou n°2 vu de l'avant



Plateau PMA trou n°2 vu de l'arrière

L'ovalisation sur 60° du trou n°2 affecte environ un tiers de l'épaisseur (côté PMA) 45° environ avant la radiale extérieure (dans le sens de rotation). Le bord du trou est très endommagé avec un « tartinage » de métal.



Plateau PMA trou n°3 vu de l'avant



Plateau PMA trou n°3 vu de l'arrière

Le bord du trou n°3 est endommagé sur 90° avec une bavure 45° environ avant la radiale extérieure. Côté arbre flexible sur un secteur d'environ 180°, une trace est identifiée sur 1/3 de l'épaisseur centrée sur la radiale extérieure.



Plateau PMA trou n°4 vu de l'avant



Plateau PMA trou n°4 vu de l'arrière

Le bord du trou n°4 (chanfrein) est endommagé avec des marquages du bord (chanfrein) à plusieurs endroits.

Du côté de l'arbre flexible, sur un secteur d'environ 200°, une trace est identifiée sur 1/3 de l'épaisseur centrée à 30° avant la radiale extérieure (dans le sens de rotation).

Les quatre trous sont affectés de bavures (refoulement de matière).

Les vis se sont mises « en biais » dans les trous 1 et 2.

Les têtes de vis ont laissé des empreintes significatives au niveau de chaque trou, parfois associées à une bavure.

4.2 Trous de fixation de la bride de l'arbre flexible

Endommagements et marquages hors expérience du plateau de l'arbre flexible

Le trou n° 1 est déchiré.

Les marquages de l'intérieur de l'alésage avec refoulement de matière (bavure) débouchant sur la face du plateau considérée sont indiqués en bleu.

La flèche mauve indique le sens de rotation.

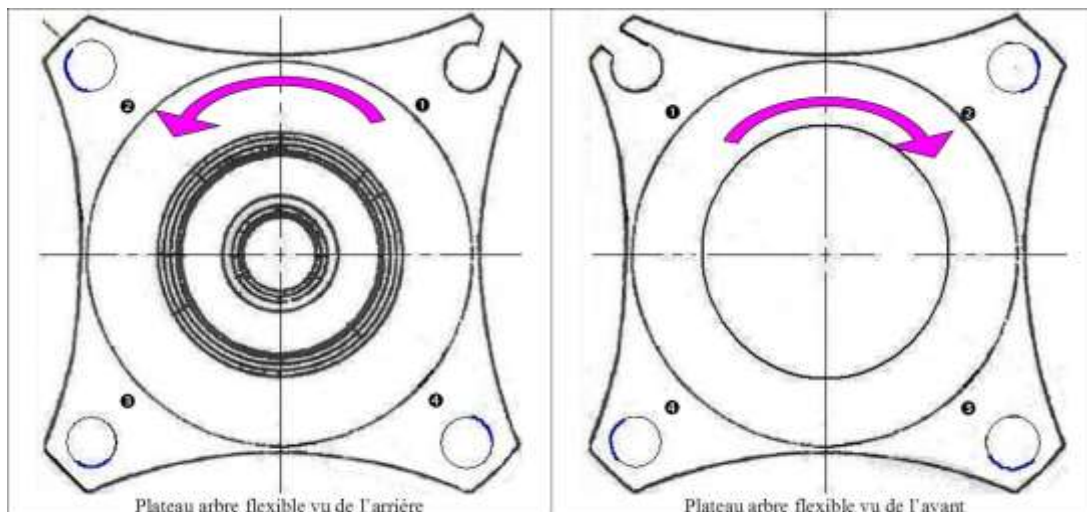


Schéma du plateau de l'arbre flexible et position des endommagements

Les endommagements des trous 2, 3 et 4 sont cohérents avec un couple résistant côté arbre de transmission flexible.



Arbre trou n°1 vu de l'arrière



Arbre trou n°2 vu de l'arrière

Sur le trou n°1, la présence de bavures (bavure écrasée sur la face de contact avec le plateau PMA) est constatée. La rupture du trou est orientée vers l'extérieur de la bride.

Sur le trou n°2, des déformations avec bavures sont observées sur les deux faces sur un secteur de 60° et sont centrées à environ 75° après la radiale extérieure (dans le sens de rotation).



Arbre trou n°3 vu de l'arrière



Arbre trou n°4 vu de l'arrière

Sur le trou n°3, des déformations avec bavures sont observées sur les deux faces sur un secteur de 60° et sont centrées à environ 30° après la radiale extérieure (dans le sens de rotation).

Sur le trou n°4, des déformations avec bavures sont observées sur les deux faces sur un secteur de 50° et sont centrées à environ 75° après la radiale extérieure (dans le sens de rotation).

Les trous 2, 3 et 4 sont affectés de bavures importantes (refoulement de matière). Au niveau du trou n°2, la rondelle a laissé une empreinte avec une bavure associée.

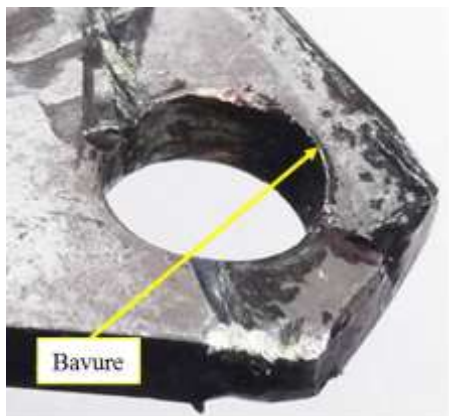
4.3 Détail des endommagements des trous du plateau de l'arbre flexible, côté PMA



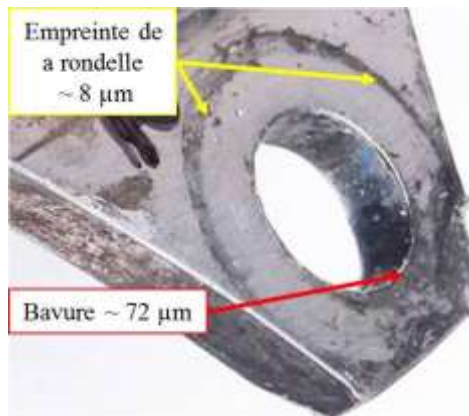
Trou n°1 vu de l'arrière (face de contact)



Trou n°1 vu de l'avant



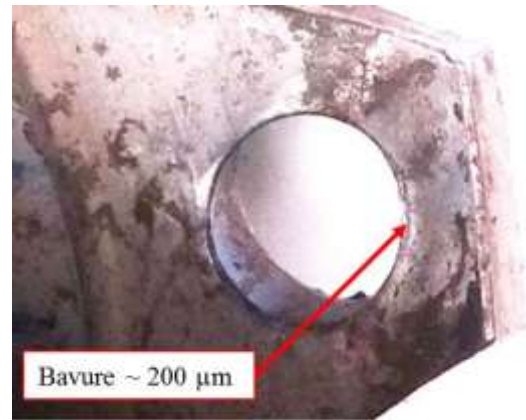
Trou n°2 vu de l'arrière (face de contact)



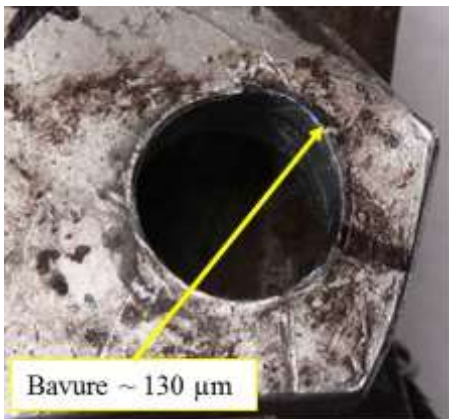
Trou n°2 vu de l'avant



Trou n°3 vu de l'arrière (face de contact)



Trou n°3 vu de l'avant



Trou n°4 vu de l'arrière (face de contact)



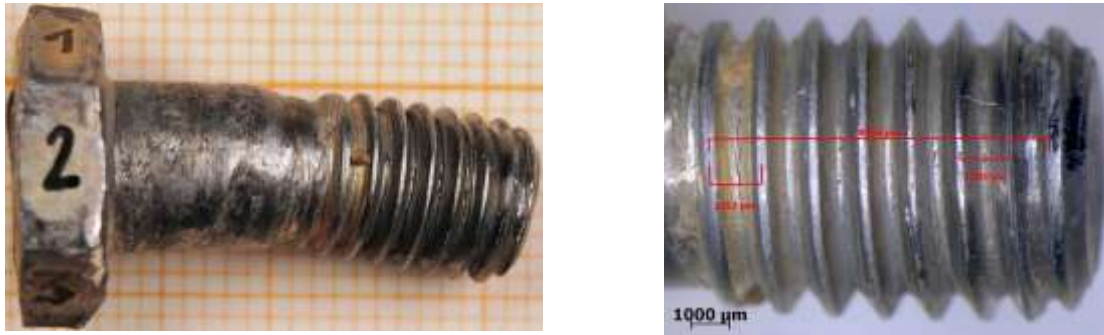
Trou n°4 vu de l'avant

Le refoulement de matière (bavure) affecte les deux faces, ce qui milite dans le sens d'une occurrence avec les vis desserrées (refoulement sous tête de vis et sur la face de contact inter-brides).

La localisation de ces bavures correspond à la transmission du couple de la PMA vers le relais, au travers des vis.

**Les vis étaient présentes au début du processus d'endommagement.
La liaison a fonctionné avec les vis desserrées.**

5. Ensemble vis et écrou restant de la liaison arbre-PMA



Etat de la vis et des filets

Le matériau de la vis est conforme à la définition. Le fût de la vis est tordu et usé (usures au diamètre de l'ordre de 0.4 mm sous tête et de 0.9 mm au début du filetage).

L'absence d'allongement significatif de la partie filetée est constatée, ainsi qu'un couple de desserrage inférieur à 0.1 Nm.

Le couple de l'auto-frein de l'écrou est constaté nul (vissage à la main).

La vis dépasse de l'écrou d'environ 1 filet pour 2 filets constatés sur un assemblage serré (GTR 60191), ce qui atteste d'une liaison desserrée.

Comparaison des qualités de l'écrou de la vis restante (freinage nul) avec d'autres ensembles vis-écrou de même type.

La comparaison est effectuée avec :

- deux ensembles neufs ;
- un ensemble «usagé» (vis «usagée» 1 et écrou «usagée») ;
- écrou du boulon restant sur le plateau de PMA du C70.

Boulons d'assemblage PMA-arbre flexible. Mesure de la fonction "auto frein" (écrou 8PH135M).				N.m
	vis neuve 1	vis neuve 2	vis "usagée 1"	vis du C70
écrou neuf 1	3.3 Nm	2.1 Nm	0.9 Nm	
écrou neuf 2	2.6 Nm	2.7 Nm	0.8 Nm	
écrou "usagé 1"	1.5 Nm	1.1 Nm	0.55 Nm	
écrou du C70	0.5 Nm	0.4 Nm	0 Nm	0

L'écrou issu du plateau de PMA accidentée n'assure plus sa fonction de freinage et ce quelle que soit la vis associée.

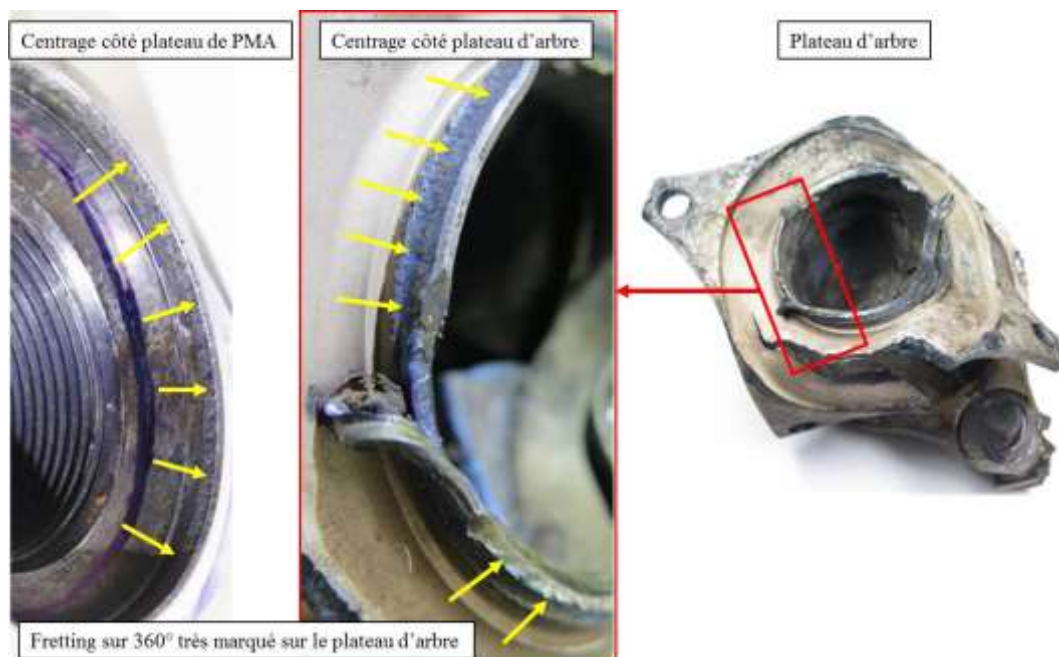
Le couple de freinage d'un assemblage dépend aussi de la vis.

Les couples de freinage décroissent au fur et à mesure des montages/démontages.

Les examens métallurgiques confirment également la perte du cadmiage des flancs de filets travaillants ainsi que la disparition de la déformation de l'écrou assurant la fonction de freinage.

Les expertises montrent que la perte de la fonction freinage de l'écrou, vraisemblablement due à une succession de montages/démontages, est avérée.

6. Etat du centrage de la liaison arbre-PMA



Aspect des endommagements sur le plateau d'arbre

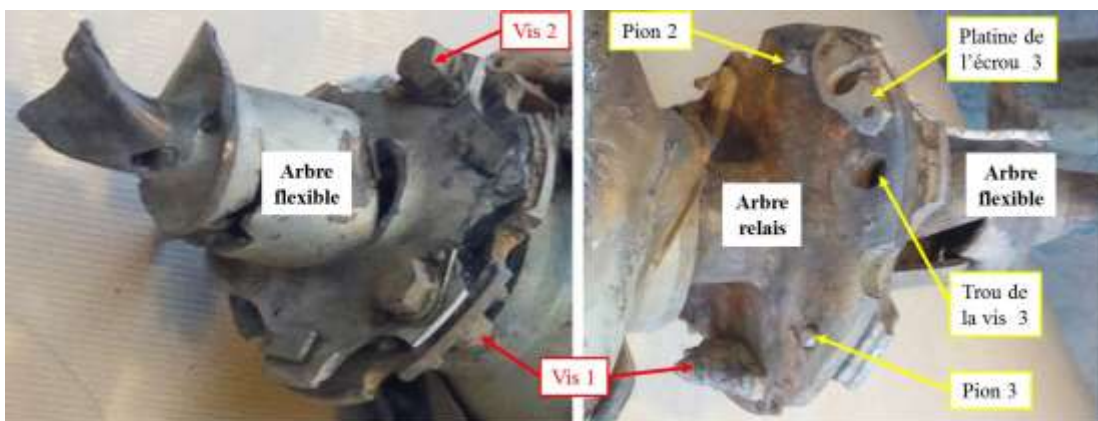
La partie mâle du centrage assurant l'alignement de la liaison est découpée/arrachée sur environ 180°.

Les diamètres de centrage des deux parties présentent un *fretting* important sur toute la circonférence, particulièrement marqué côté arbre dont le plateau est en alliage de titane.

Les traces observées sur la partie mâle évoquent des déplacements relatifs axiaux sur toute la hauteur du centrage.

=> La fonction centrage et probablement le serrage des deux plateaux ont été perdus en fonctionnement.

7. Liaison arbre – relais d'accessoires



Extrémités d'arbre de transmission et d'arbre télescopique du relais et fixations de liaison

Les deux plateaux d'arbres sont déformés. Bien que solidaires, ils présentent un espacement de l'ordre de 1 à 2 mm.

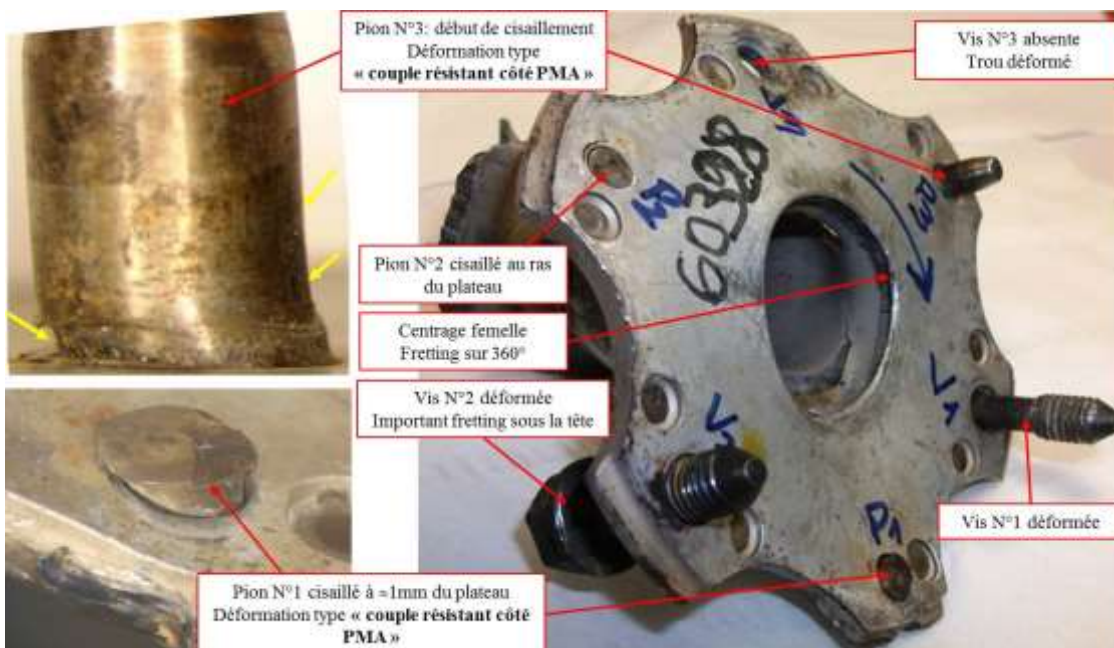
7.1 Fixations d'extrémité de l'arbre

Les vis n° 1 et 2 sont présentes et tordues, la vis et l'écrou n°3 sont absents, la platine de l'écrou n°3 est déchirée et ses rivets sont rompus.

Le pion n°1 est tordu dans le sens d'un couple résistant vers la PMA et rompu à environ 1mm au-dessus du plateau de l'arbre.

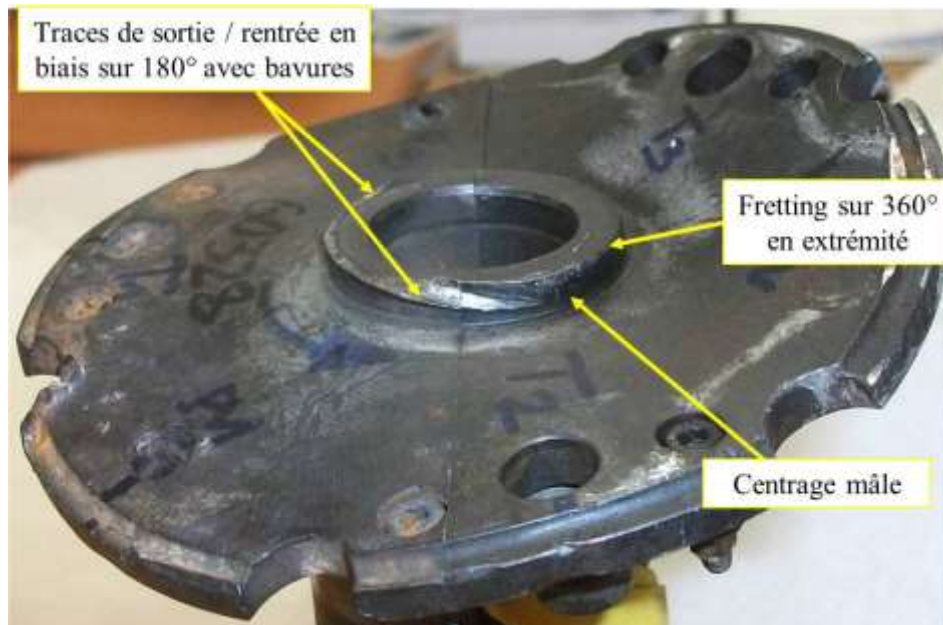
Le pion n°2 est rompu à la jonction des plateaux mais coincé dans son logement du plateau du relais (dépassement initial).

Le pion n°3 est présent mais tordu dans le sens d'un couple résistant vers la PMA. Sa position en retrait indique l'espacement des plateaux.



Endommagements des fixations de l'extrémité de l'arbre de transmission côté relais

7.2 Liaison arbre de transmission – relais / faces de contact :



Mise en évidence des endommagements sur le centrage de l'arbre

Sur l'ergot de centrage, des traces de *fretting* sont constatées sur les faces de contact ainsi qu'un emboutissage en biais de la partie mâle.
La liaison arbre de transmission – relais avion semble avoir fonctionné desserrée.

7.3 Arbre télescopique du relais d'accessoires



Arbre télescopique d'entrée du relais avion

L'arbre télescopique est coincé en position « sorti ».
Après découpe longitudinale par électro érosion, aucun indice significatif d'une anomalie en fonctionnement n'est identifié.

8. Interprétations des différents constats

Liaison PMA-arbre de transmission flexible

Les quatre vis de liaison PMA-arbre étaient présentes au début du processus de dégradation. Les trois vis absentes se sont vraisemblablement rompues en cisaillement suite à un desserrage.

Il n'est pas possible de se prononcer sur la conformité de serrage de ces vis au départ, mais il est établi qu'il y a eu perte de serrage. Cette liaison a fonctionné avec des vis desserrées.

« Flector » côté relais d'accessoires

L'axe est sorti de son logement avant l'impact.

Le « flector » côté relais avion s'est dissocié en fonctionnement.

L'écrou de maintien des barrettes s'est dévissé en fonctionnement, libérant la cale et permettant l'échappement de plusieurs barrettes.

Arbre éprouvette de sortie de la PMA

Le vrillage de cet arbre s'est vraisemblablement produit en fonctionnement.

L'occurrence d'un vrillage en fonctionnement indique l'apparition d'un couple résistant proche du couple de rupture²⁴.

Liaison arbre de transmission flexible – relais d'accessoires

A l'instar de la liaison PMA-arbre de transmission flexible, cette liaison semble avoir fonctionné avec des fixations desserrées.

²⁴ 126 DaN.m

ANNEXE 5

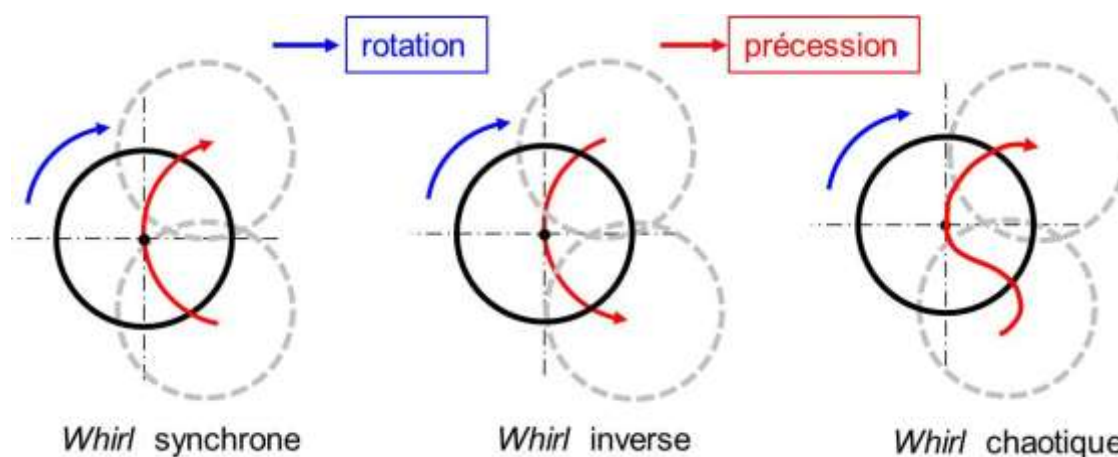
Apparition d'un phénomène « *WHIRL* »

Le *WHIRL* est un phénomène vibratoire aléatoire, instable et destructeur pour les machines tournantes. Des mouvements de flexion perpendiculaires à l'axe de rotation peuvent apparaître sur les parties tournantes. Ce phénomène peut être explosif et provoquer des ruptures statiques instantanées.

Les indices relevés sur les fragments d'extrémité de l'arbre de transmission montrent que l'arbre a subi un débattement axial en fonctionnement d'environ 12° à chaque extrémité.

Un tel débattement peut résulter de l'apparition d'un phénomène dynamique *WHIRL*, qui peut induire des mouvements de flexion latéraux sur l'arbre et des efforts instantanés dépassant la résistance mécanique des liaisons. Ce phénomène est de nature à rompre les liaisons arbre-PMA par rupture successives de celles-ci.

Le *WHIRL* peut survenir en cas de modification de répartition de la masse ou de rigidité de l'ensemble du système tournant.



Les différentes formes de précession par rapport à la rotation du système

Le desserrage d'une ou plusieurs liaisons boulonnées de l'arbre de transmission constitue un facteur favorisant le déclenchement d'un *WHIRL* par diminution de la rigidité du système tournant.

ANNEXE 6

Mécanisme du feu dans le tunnel réacteur

La fuite de carburant (75 l/min) apparaît suite à la perte d'étanchéité du régulateur secours carburant, dont la pompe, toujours entraînée, continue de tourner.

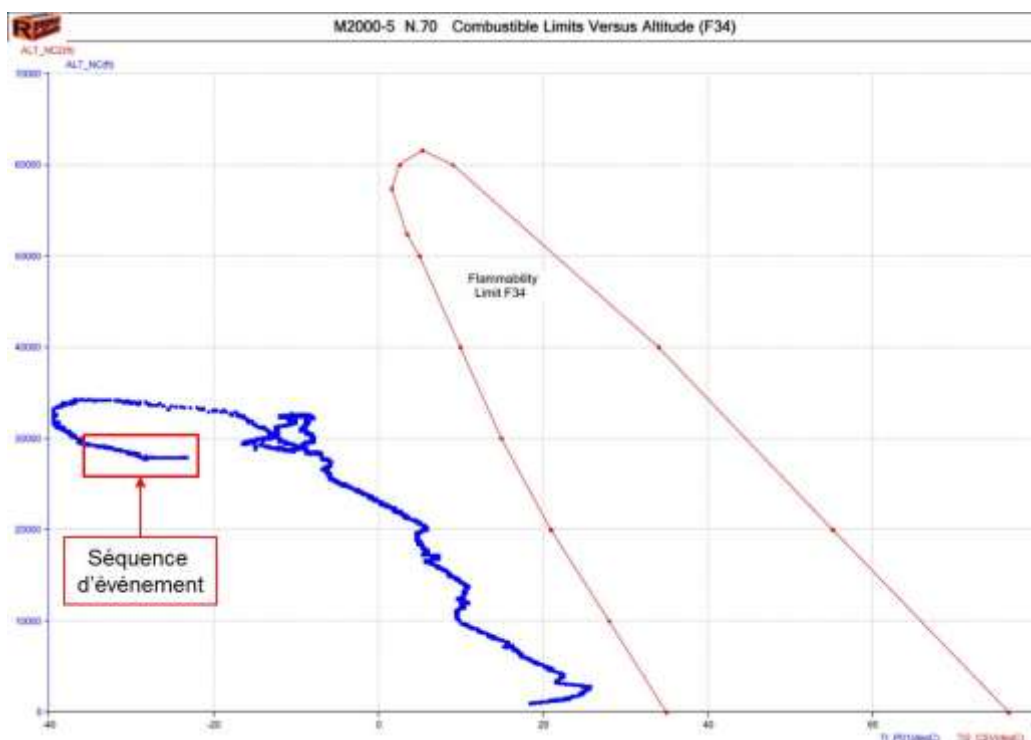
Le débit de la fuite augmente après la coupure PC (165 l/min) suite au retour de pression carburant à cet endroit, puis diminue (85 l/min) avec le désengagement de l'entraînement de la pompe de secours et l'arrêt de celle-ci.

Le carburant s'écoule dans la partie inférieure du tunnel réacteur où il s'accumule puis s'enflamme vraisemblablement au contact des parties chaudes. Il est détecté par la boucle de détection PC 35 s après la fuite, puis par celle de la partie moteur 4 s plus tard et enfin à l'arrière du canal PC après 92 s.

Les endommagements des câblages électriques surviennent peu de temps après la propagation de l'incendie à l'ensemble du tunnel réacteur.

La traînée blanche apparue dans l'intervalle de l'avarie indique que le carburant liquide s'échappe entre la paroi du tunnel réacteur et les volets de tuyère. Aucune flamme ni fumée noire n'est aperçue par l'équipier, ce qui montre que le feu reste cantonné sur les parties chaudes du réacteur et du canal PC alors que du carburant liquide s'écoule à l'extérieur.

Ceci s'explique car les conditions d'inflammabilité du kérosène (pression et température) ne sont pas réunies durant le vol de l'appareil. Dans les conditions rencontrées, les flammes ne peuvent exister qu'au contact d'une source chaude et ne se propagent pas à l'extérieur.



Domaine d'inflammabilité du F34 et profil de vol de l'appareil (altitude / température d'impact)