Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Bureau enquêtes accidents pour la sécurité de l'aéronautique d'État

Rapport d'enquête de sécurité

M-2023-04-I

Date de l'évènement	4 avril 2023
Lieu	Mer d'Iroise (Finistère)
Type d'appareil	Rafale Marine
Organisme	Marine nationale

BEA-É

AVERTISSEMENT

UTILISATION DU RAPPORT

Conformément à l'article L.1621-3 du code des transports, 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 aux engagements internationaux de la France, à l'esprit des lois et des règlements et relève de la seule responsabilité de son utilisateur.

COMPOSITION DU RAPPORT

Cette enquête de sécurité a conduit à un rapport réduit qui ne présente que les éléments principaux et nécessaires à la compréhension des évènements.
Les faits, utiles à la compréhension de l'évènement, sont exposés dans le premier chapitre du rapport. L'identification et l'analyse des causes de l'évènement font l'objet du deuxième chapitre. Le troisième chapitre tire les conclusions de cette analyse et présente les causes retenues.
Le BEA-É formule ses recommandations de sécurité dans le quatrième et dernier chapitre.

Sauf précision contraire, les heures figurant dans ce rapport sont exprimées en heure légale française.

CRÉDITS

	Marine nationale	Page de garde
Figure 1	RESEDA	8
Figure 2	DIRCAM	11
Figure 3	Dassault aviation	12
Figures 4	Marine nationale	12
Figures 5 à 8	BEA-É	13 et 14
Figure 9	AIA	15
Figure 10	SAE	16
Figure 11	BEA-É	18
Figures 12 et 13	SAE	18 et 19
Figure 14	AIA	20
Figure 15	SAE	21
Figures 16 et 17	BEA-É	23 et 24

TABLE DES MATIÈRES

GLOSSAIRE 4
SYNOPSIS 5
1. RENSEIGNEMENTS DE BASE 7
1.1. Déroulement du vol 7
1.2. Dommages corporels 9
1.3. Dommages à l'aéronef 9
1.4. Autres dommages 9
1.5. Renseignements sur le commandant d'aéronef 9
1.6. Renseignements sur l'aéronef 9
1.7. Conditions météorologiques 10
1.8. Aides à la navigation 10
1.9. Télécommunications 10
1.10. Renseignements sur l'aérodrome 10
1.11. Enregistreurs de bord 11
1.12. Constatations sur l'aéronef 12
1.13. Renseignements médicaux du commandant de bord 15
1.14. Incendie 15
1.15. Questions relatives à l'organisation des secours 15
1.16. Essais et recherches 16
1.17. Renseignements sur les organismes 16
1.18. Moteur M88-2 16
2. ANALYSE 17
2.1. Expertises techniques 17
2.2. Séquence de l'évènement 22
2.3. Recherche des causes de l'évènement 22
2.4. Recherche des causes annexes n'ayant pas contribué directement à l'évènement 25
3. CONCLUSION 27
3.1. Éléments établis utiles à la compréhension de l'évènement 27
3.2. Causes de l'évènement 27
4. RECOMMANDATIONS DE SÉCURITÉ 29
4.1. Mesures de prévention ayant trait directement à l'évènement 29
4.2. Mesures n'ayant pas trait directement à l'évènement 29

GLOSSAIRE

BA	Base aérienne
CEMPN	Centre d'expertise médicale du personnel navigant
EAC	Ecole de l'aviation de chasse
EFPN	Ecole de formation du personnel navigant
FBM	*Flight basic manual* – manuel d'emploi basique
FOD	*Foreign Object Debris* – Corps étranger
ft	*Feet* – pieds (1 pied vaut 30,48 cm)
g	Unité de mesure de l'accélération – un g vaut 9.81 m/s2
kt	*Knots* – nœuds (1 kt vaut 1,852 km/h)
Lbs	*Pounds* – livres (1lb vaut environ 0.45 kg)
Nm	*Nautical mile* – mille nautique (1 Nm vaut 1,852 km)
PCL	*Power control lever* – manette de contrôle de la puissance moteur
PIU	*Propeller Interface Unit* – unité de régulation du pas de l'hélice
PW&C	*Pratt & Whitney Canada Corp.*
UTC	*Coordinated universal time* - temps universel coordonné

SYNOPSIS

Date et heure de l'évènement : 4 avril 2023 à 21h20 (19h20 UTC[1])
Lieu de l'évènement : en mer d'Iroise à 60 Nm[2] au large du Finistère
Organisme : Marine nationale
Commandement organique : commandement de la force de l'aéronautique navale (ALAVIA)
Unité : Flottille 11F
Aéronef : Rafale Marine n°39, immatriculé F-XGDL
Nature du vol : mission d'entraînement
Nombre de personnes à bord : 1

Résumé de l'évènement selon les premiers éléments recueillis

Lors d'un vol d'entraînement à l'assaut de nuit en très basse altitude, après avoir accéléré vers 480 kt[3] en légère montée, le pilote n°3 d'une patrouille de quatre Rafale perçoit une détonation et un flash lumineux, ressent de fortes secousses, suivies de l'allumage des alarmes « R.ENG VIB »[4] et « R.ENG FLAMEOUT »[5] associées au moteur droit. Il annonce immédiatement un « stop combat ».
La patrouille monte à 5 000 ft[6] en direction du terrain de Landivisiau et la décision est prise de ne pas rallumer le moteur droit. Le n°3 se présente en longue finale pour un atterrissage en monomoteur. Une fois en bon contact radio avec le contrôle local d'aérodrome et à 25 Nm du terrain, en coordination avec le n°3, les autres appareils de la patrouille font demi-tour pour poursuivre leur mission.
La finale et l'atterrissage avec prise de brin[7] se passent sans encombre et le pilote roule en autonomie jusqu'au parking.
L'aéronef est endommagé, le pilote est indemne.

Composition du groupe d'enquête de sécurité

- un directeur d'enquête de sécurité du bureau enquêtes accidents pour la sécurité de l'aéronautique d'État (BEA-É) ;
- un directeur d'enquête de sécurité adjoint (BEA-É) ;
- un enquêteur technique (BEA-É) ;
- un enquêteur de première information ;
- un pilote ayant une expertise sur Rafale ;
- un mécanicien ayant un expertise sur Rafale ;
- un médecin breveté supérieur de médecine aéronautique.

Autres experts consultés

- Service industriel de l'aéronautique atelier industriel aéronautique de Bordeaux (SIAé AIA BdX). ;
- Direction générale de l'armement essais propulseurs/restitution des enregistreurs d'accidents (DGA EP/RESEDA) ;
- Safran Aircraft Engines (SAE).

1 *Universal time coordinated* - temps universel coordonné.
2 Nautique (1 Nq vaut 1,852 m).
3 *Knots* – noeuds (1 noeud vaut 1,852 km/h).
4 R. ENG VIB *(Right Engine Vibe)* - vibration moteur droit.
5 R.ENG FLAMEOUT *(Right Engine FLAMEOUT)* - extinction moteur droit.
6 Feet – pieds (1 pied vaut 30,48 cm).
7 Le brin d'arrêt est un câble tendu en travers de la piste qui permet de stopper un aéronef lors de l'atterrissage lorsque celui-ci l'engage avec sa crosse.

PAS DE TEXTE

1. RENSEIGNEMENTS DE BASE

1.1. Déroulement du vol

1.1.1. Mission

Type de vol : circulation aérienne militaire tactique (CAM T)
Type de mission : entraînement à l'assaut terre en *self-escort*[9]
Point de départ : base de l'aéronautique navale (BAN) de Landivisiau (LFRJ)
Heure de départ : 20h50
Point d'atterrissage : BAN de Landivisiau (LFRJ)

1.1.2. Déroulement

1.1.2.1. Contexte et préparation du vol

La mission est un entraînement à l'assaut terre en *self-escort* impliquant une patrouille de quatre Rafale Marine, opposée à deux autres Rafale Marine.
La patrouille des quatre Rafale Marine est formée de deux patrouilles légères de deux aéronefs :

- le pilote n°1 est en cours de formation en vue de passer la qualification de chef de patrouille et son équipier le pilote n°2 est qualifié chef de la patrouille et responsable de la patrouille ;
- le pilote n°3, qualifié chef de patrouille, a pour équipier le pilote n°4 qui est à l'entraînement pour acquérir la qualification de pilote opérationnel.

Le briefing se tient vers 17h. Lors de celui-ci, l'accent est mis sur l'entraînement à la fonction de chef de patrouille du pilote n°1.

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

La mise en route et le décollage ont lieu de jour, peu de temps avant la nuit aéronautique[10].
Les pilotes n°1 et n°2 décollent en premier à 20h47 et transitent vers l'Ouest, suivis 5 minutes plus tard par les pilotes n°3 et n°4.
Après son décollage, le pilote n°3 est rejoint par son équipier et la patrouille légère transite également vers l'Ouest, en basse altitude entre 2 000 et 3 000 ft au-dessus de la mer, à une vitesse de 450 kt, jusqu'à la zone d'entraînement au combat distante de 100 Nm.
À 21h15 la patrouille fait demi-tour cap vers Ouessant pour débuter l'exercice d'assaut terre.

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

À 21h20, le pilote n°3 affiche PG[11] sec pour accélérer et monter à 5 000 ft correspondant au plancher de combat. En montée à 480 kt, à environ 3 500 ft, il entend une forte détonation, perçoit un flash lumineux d'une fraction de seconde et ressent de fortes secousses pendant quelques secondes. Les alarmes « R.ENG VIB » puis « R.ENG FLAMEOUT » s'affichent sur le tableau d'alarme. Le pilote constate une « T49 »[12] » élevée. Il annonce immédiatement à la radio un stop combat et indique au reste de la patrouille qu'il a « perdu son moteur droit ».
Son équipier voit une flamme à l'arrière de l'avion de son leader qui est différente de celle émise en post combustion[13].
Le pilote n°3 prend la décision de ne pas rallumer le moteur droit concerné et positionne la mini-manette de contrôle général moteur sur extinction. Il annonce à la patrouille qu'il rentre se poser à Landivisiau. Le pilote n°1 annonce alors à tous un stop combat, déclare au contrôle une urgence et le besoin des moyens de secours à l'atterrissage.

---

9 Mission d'assaut vers la terre où chaque appareil assure sa propre protection aérienne.
10 30 minutes après le coucher du soleil.
11 Plein gaz.
12 T49 température d'entrée de la turbine basse pression.
13 Système consistant à injecter du carburant après la turbine pour augmenter la poussée du turboréacteur.

Figure 1 : trajectoire du vol (les temps indiqués sont en référence de la mise sous tension)

1.1.2.4. Gestion post-évènement

Les quatre appareils de la patrouille se dirigent alors vers le terrain de la BAN de Landivisiau.
Une fois les aéronefs établis à 5 000 ft, qui est l'altitude de sécurité, le pilote n°1 déroule la check-list monomoteur. La lecture est interrompue par l'annonce du pilote n°3 de passer en fréquence avec le directeur des vols (DV). Cependant, seul le pilote n°1 parvient à établir la communication radio avec le DV.
Le pilote n°4 se rapproche du pilote n°3 pour procéder à une vérification visuelle de l'aéronef sur d'éventuels dégâts, feu ou fuite carburant. Il ne remarque aucune anomalie sur l'avion de son leader.
Ce dernier procède à une vidange carburant pour alléger son aéronef jusqu'à la masse permettant un atterrissage monomoteur. Il est alors accompagné par le n°4.
À 21h27mn, à 25 Nm du terrain de la BAN, une fois en bon contact radio avec le contrôle local d'aérodrome et dans l'axe de la finale, le pilote n°2, chef de la patrouille, propose que le pilote n°3 poursuive seul la phase finale d'approche et que les autres membres de la patrouille repartent sur l'exercice initialement prévu. Ce plan d'action est accepté par le pilote n°3.
Le directeur des vols, n'arrivant toujours pas à joindre directement l'avion en panne, fait confirmer sur la fréquence d'approche la masse de l'appareil afin de vérifier la compatibilité avec un atterrissage en monomoteur.
La visibilité est très bonne, le pilote n°3 se présente pour une approche guidée par le contrôle en piste 07.
À 21h33mn, l'atterrissage est effectué à vue avec prise de brin d'entrée de bande. Le pilote aperçoit la caravane de secours sur une bretelle de la piste et décide avec l'accord du DV de faire le roulage en autonome jusqu'au parking.

1.1.3. Localisation

- Lieu :
  - pays : France
  - département : Finistère (29)
  - commune : Mer d'Iroise
  - coordonnées géographiques : N 48°13'36'' / E 005°35'48'' (60 Nm des côtes, Ouest de Brest)
  - altitude du lieu de l'évènement : 3 300 ft
- Moment : début de nuit
- Aérodrome militaire le plus proche au moment de l'événement : Landivisiau (LFJR)

1.2. Dommages corporels

Le pilote est indemne.

1.3. Dommages à l'aéronef

L'aéronef est endommagé.

1.4. Autres dommages

Sans objet.

1.5. Renseignements sur le commandant d'aéronef

Âge : 34 ans
Unité d'affectation : CENTEX GAé (Centre d'expertise du Groupe Aérien embarqué) et abonné[14] à la 11F

- Formations :
  - qualification : chef de patrouille (2022)
  - école de spécialisation : section marine école de Meridian (US) (2016)
- Heures de vol comme pilote :

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	sur tout type	dont (Rafale)	sur tout type	dont (Rafale)	sur tout type	dont (Rafale)
Total (h)	1 250	1 000	95	90	8	8
Dont nuit	290	250	36	34	2	2

- Date du précédent vol de nuit sur l'aéronef : 21 mars 2023

1.6. Renseignements sur l'aéronef

- Organisme : Marine nationale
- Commandement d'affectation : ALAVIA
- Aérodrome de stationnement : BAN de Landivisiau
- Unité d'affectation : Flottille 11F
- Type d'aéronef : Rafale Marine standard F3-R

	Type-série	Numéro	Heures de vol (h) totales	Heures de vol (h) depuis dernier entretien NTI2[15]	Heures de vol (h) depuis visite intermédiaire (50 h)
Cellule	Rafale Marine standard F3-R	39	3 076	/	/
Moteur droit	M88-2	WM000008	3 468	68	22
Moteur gauche	M88-2	WM000206	3 181	171	27

1.6.1. Maintenance et navigabilité

L'examen de la documentation technique témoigne d'un entretien conforme aux programmes de maintenance en vigueur.
Les derniers chantiers des moteurs droit et gauche de l'aéronef ont été réalisés à bord du porte-avions « Charles de Gaulle » respectivement les 6 février 2023 et 27 décembre 2022. Sur ces chantiers plusieurs modules des moteurs ont été remplacés, notamment la turbine haute pression (TuHP) du moteur concerné. Celle-ci a été prélevée à Landivisiau avec 158 heures de fonctionnement depuis son dernier contrôle.

1.6.2. Performances

L'aéronef est utilisé dans son domaine de vol.

[14] Un abonné est un personnel navigant affecté hors unité navigante.
[15] Niveau technique d'intervention de niveau 2.

1.6.3. Masse et centrage

Lors du décollage et lors de l'évènement, les masses de l'aéronef sont respectivement de 19 035 kg et d'environ 17 000 kg. Par ailleurs, le centrage est dans le domaine de vol de l'aéronef.

1.6.4. Carburant

- Type de carburant utilisé : F-34
- Quantité de carburant au décollage : 8 030 kg
- Quantité de carburant estimée au moment de l'évènement : environ 6 000 kg

1.6.5. Autres fluides

L'huile moteur utilisée est de l'O-156.

1.7. Conditions météorologiques

1.7.1. Prévisions

Les prévisions font état de conditions anticycloniques avec un flux de dominante du Sud faible à 21h et d'un ciel très nuageux à couvert à l'étage moyen et à l'étage élevé (à l'avant d'une perturbation).

1.7.2. Observations

Les conditions météorologiques sur la plateforme sont ce soir-là favorables à l'exécution de la mission (mer 2[16], 3 jours avant la pleine lune, beau temps et vent faible entre 10 et 15 kt).
La patrouille rencontre quelques formations nuageuses en dessous de 2 000 ft lors du survol maritime les obligeant à relever leur hauteur avant la phase d'assaut terrestre.

1.8. Aides à la navigation

Le Rafale Marine n°39 est au standard F3-R. Il est équipé, entre autres, de deux centrales inertielles à gyrolasers qui transmettent les informations de localisation, et dans lesquelles une carte GPS est positionnée ; d'un radar avec un mode de suivi de terrain et avec une capacité de détection des masses nuageuses.

1.9. Télécommunications

Les quatre Rafale de la patrouille n'ont pas tous la même configuration radio.
Le Rafale Marine n°39 du pilote n°3 est équipé notamment des appareils de télécommunication suivants :
- un poste 1 : V/UHF[17] :
- un poste 2 : UHF[18] :

1.10. Renseignements sur l'aérodrome

La BAN de Landivisiau se situe à environ 8 km au Nord-ouest de la ville de Landivisiau sur les communes de Bodilis, Saint-Servais et Plouneventer. La piste, orientée 07/25, est longue de 2 700 m et large de 45 m. L'affectataire du terrain est la Marine nationale et il n'est pas ouvert à la circulation aérienne publique. La piste est pourvue de quatre brins d'arrêts bidirectionnels (cf. BRA[19] figure 2) situés à environ 300 m des deux seuils. En fonction de la piste en service, le terrain est gréé avec un brin en entrée de bande et deux brins en fin de bande.
Dans le cadre de l'entraînement aux appontages, un miroir d'appontage est installé de chaque côté de la piste avant les brins, à proximité des marquages de pont d'envol situés aux deux seuils de piste. L'accès peut se faire grâce à cinq bretelles d'accès, nommées A, B, C, D et E. Une parapiste[20] parallèle à la piste permet si nécessaire l'atterrissage et le décollage d'un aéronef en cas d'indisponibilité de la piste.

---

16 État de la mer selon l'échelle de Douglas (de mer 0 : calme, mer 5 : forte, à mer 9 : énorme).
17 *Very High Frequency* bande de fréquences radio comprise entre 30 et 300 Mhz.
18 *Ultra High Frequency* bande de fréquences comprise entre 300 et 3000 Mhz.
19 BRA brin d'arrêt.
20 Taxiway avec la résistance d'une piste.

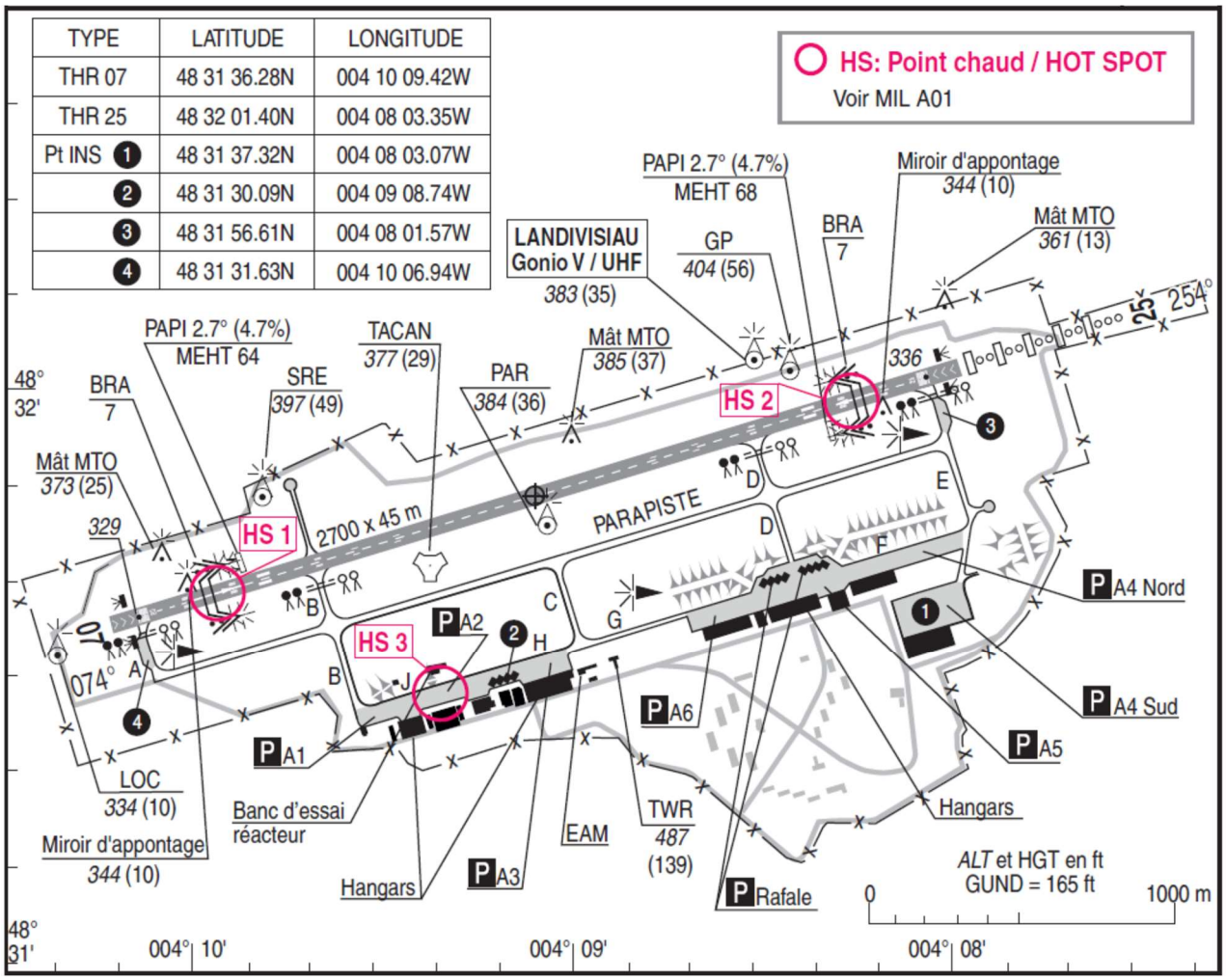

Figure 2 : carte de l'aérodrome de Landivisiau

1.11. Enregistreurs de bord

Le Rafale est équipé de plusieurs sources de données enregistrées :

- un enregistreur de vidéo numérique (EVN) qui enregistre les images filmées devant l'avion et l'affichage du collimateur tête haute (CTH) ;
- un enregistreur statique de paramètres (ESPAR) ;
- une cassette A contenant les données de préparation et de restitution de la mission ;
- une cassette B contenant des données enregistrées pendant les vols pour la maintenance.

L'ensemble de ces données est exploitable.

1.12. Constatations sur l'aéronef

L'examen de l'aéronef montre de nombreuses dégradations sur le moteur droit et sur des éléments directement à proximité.

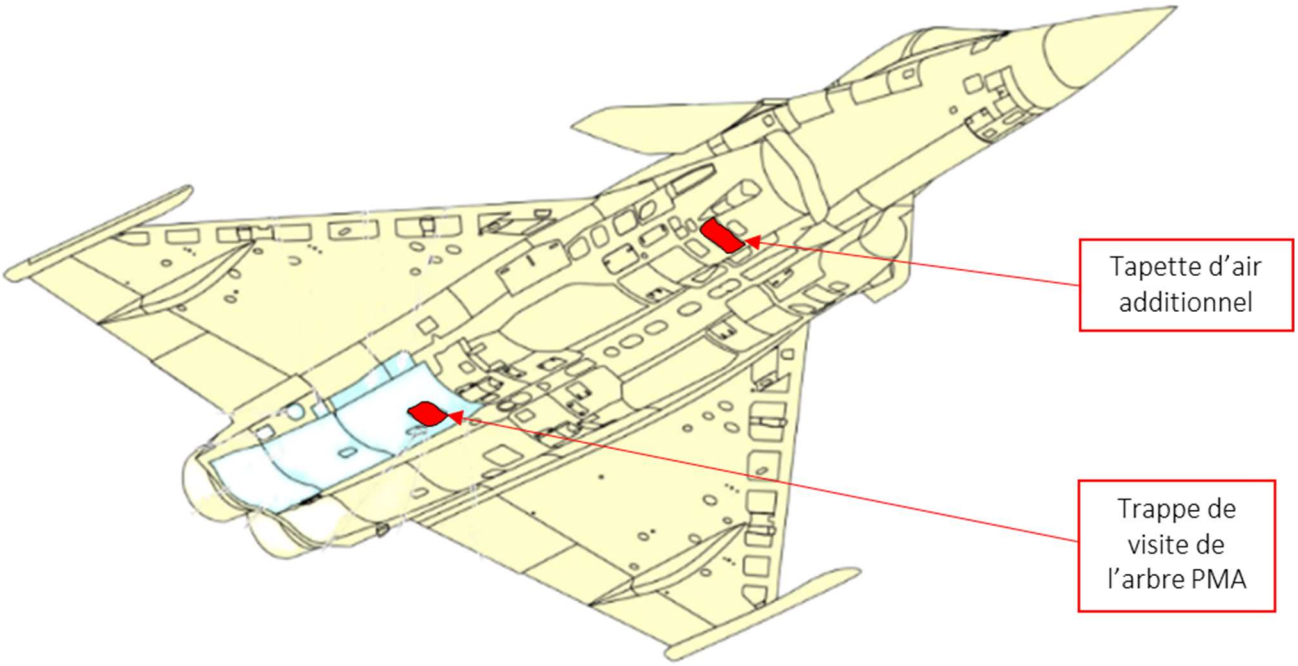

Figure 3 : position des trappes inférieures sur Rafale

1.12.1. Constats au retour du vol

Des dommages externes sont visibles sur de multiples éléments :

- la tapette d'air additionnel est déformée vers l'extérieur ;

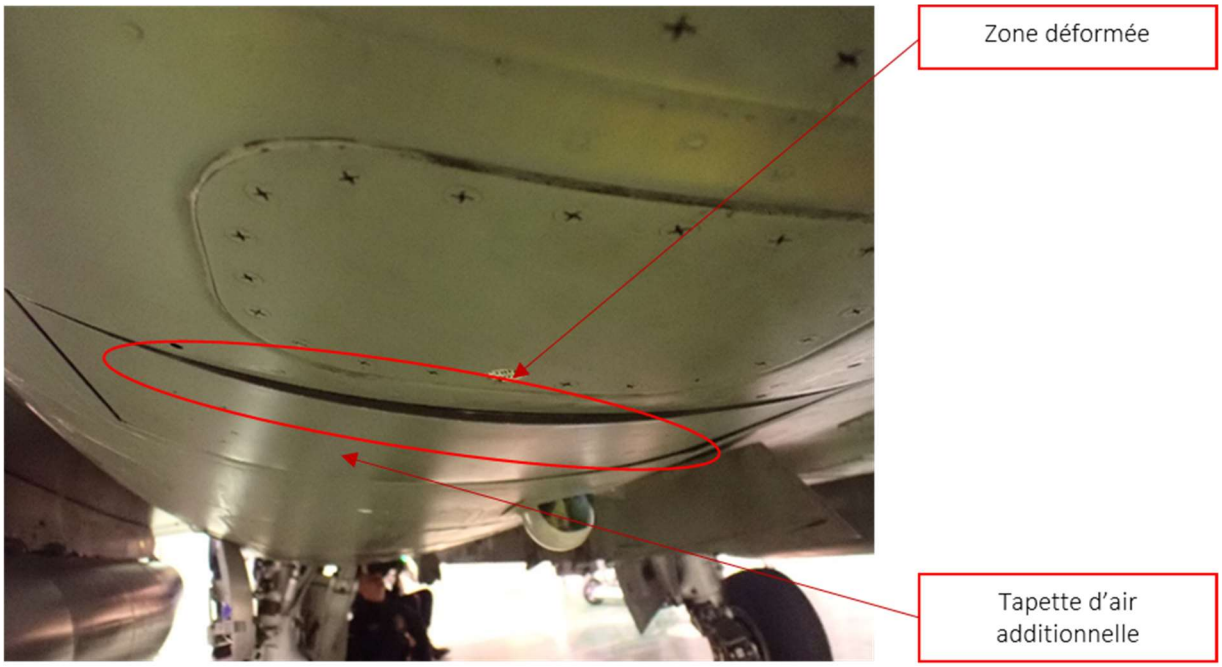

Figure 4 : tapette d'air additionnelle du moteur droit

- la trappe de visite (trappe d'accès à l'arbre PMA[21]) sous le capot avant du moteur droit est manquante ;

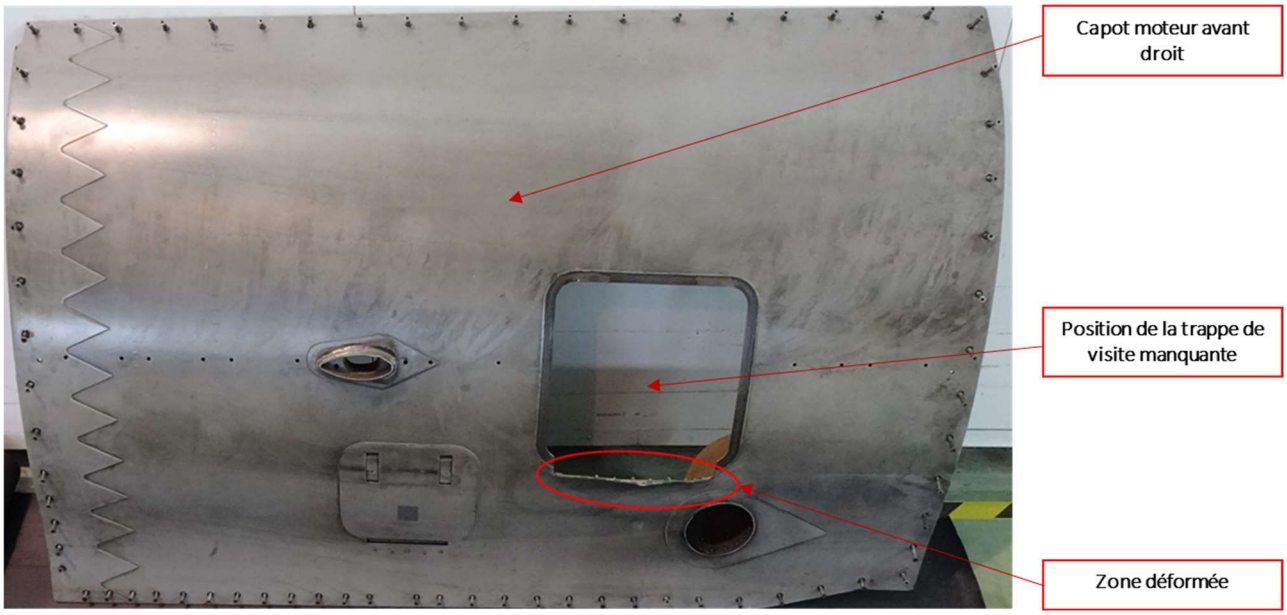

Figure 5 : capot moteur avant droit déposé et emplacement de la trappe de visite

- sur le moteur droit, les volets de la roue d'entrée sont désaxés et libres ;

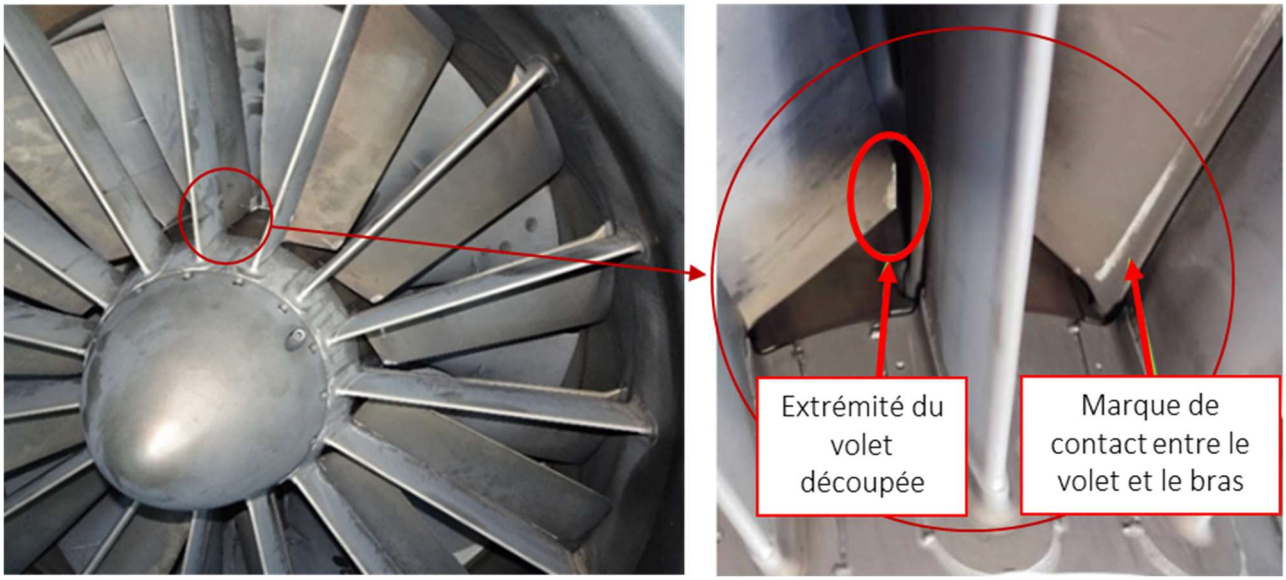

Figure 6 : volets de la roue d'entrée du moteur droit

[21] Prise de Mouvement Avion.

- le cône de dilution est désolidarisé, il repose sur le fond du canal PC, il n'est plus retenu que par les bras accroche-flammes ;

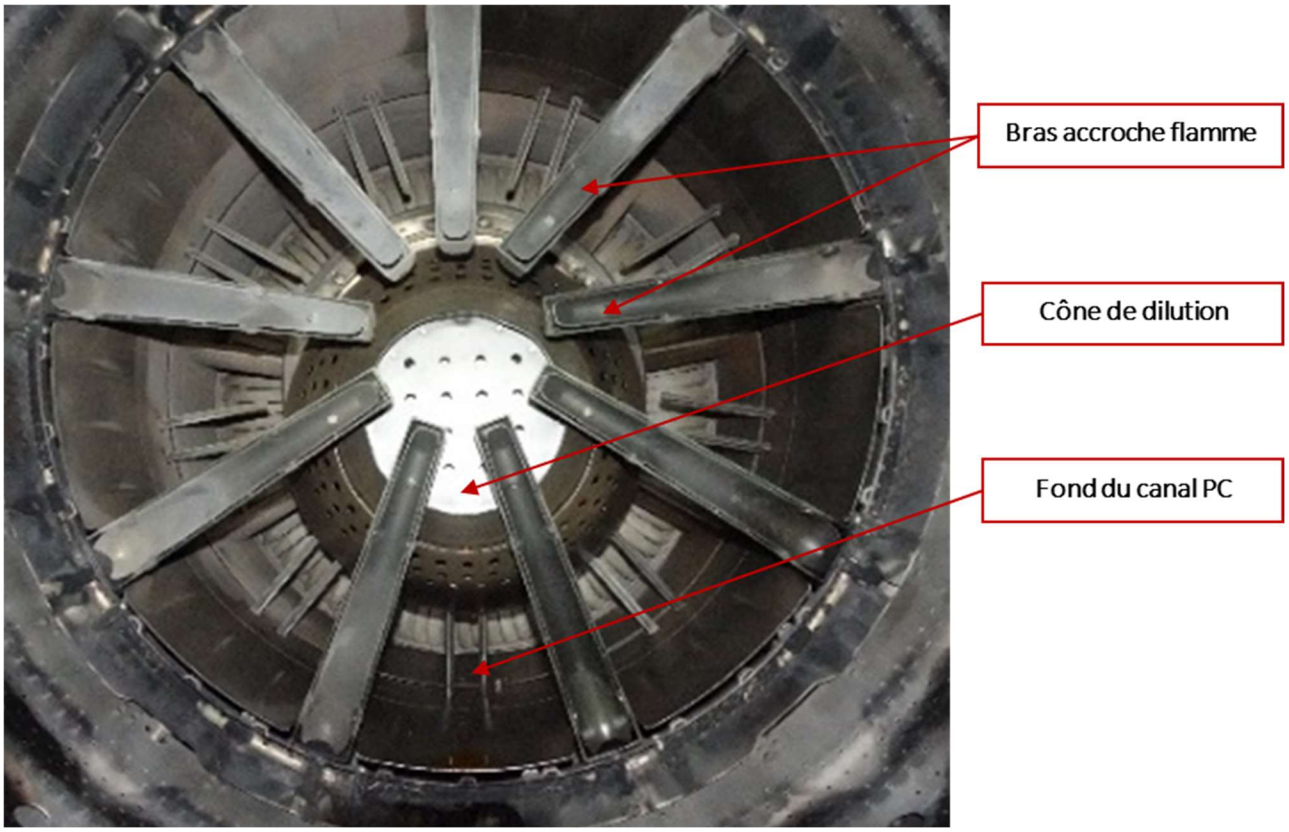

Figure 7 : cône de dilution du moteur droit

- des dépôts sont présents sur les volets chauds situés à l'extrémité de la tuyère.

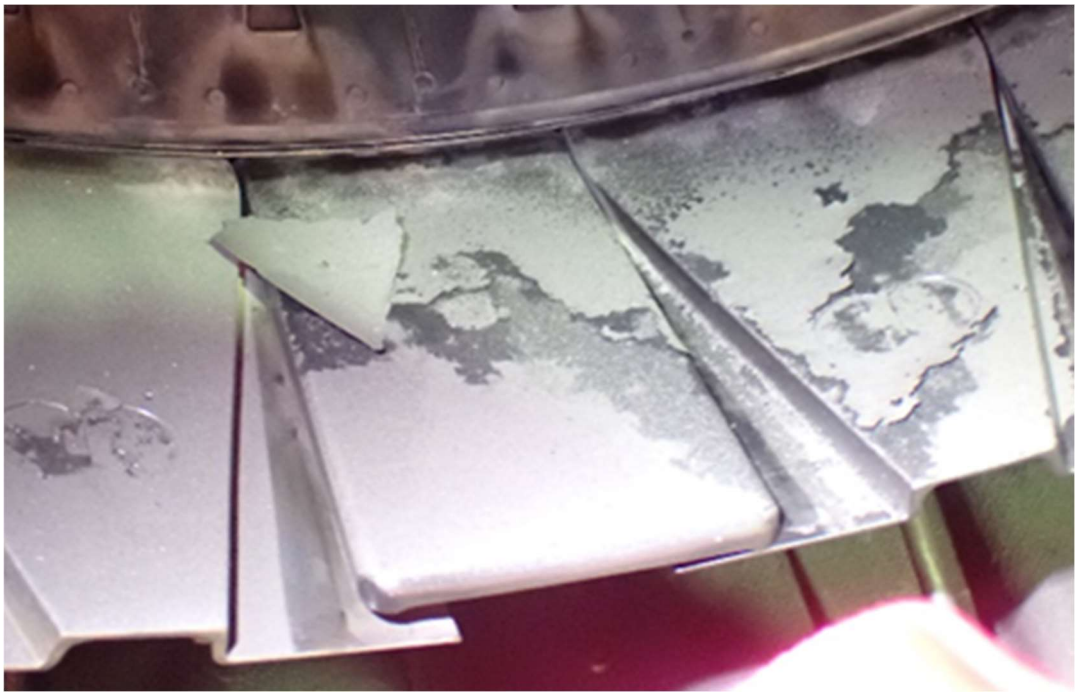

Figure 8 : volets chauds de la tuyère du moteur droit

1.12.2. Constats à l'issue de la dépose du moteur

L'axe fusible de la couronne de commande des volets de la roue d'entrée est rompu et les axes des biellettes de commande des volets sont désolidarisés de la couronne de commande.

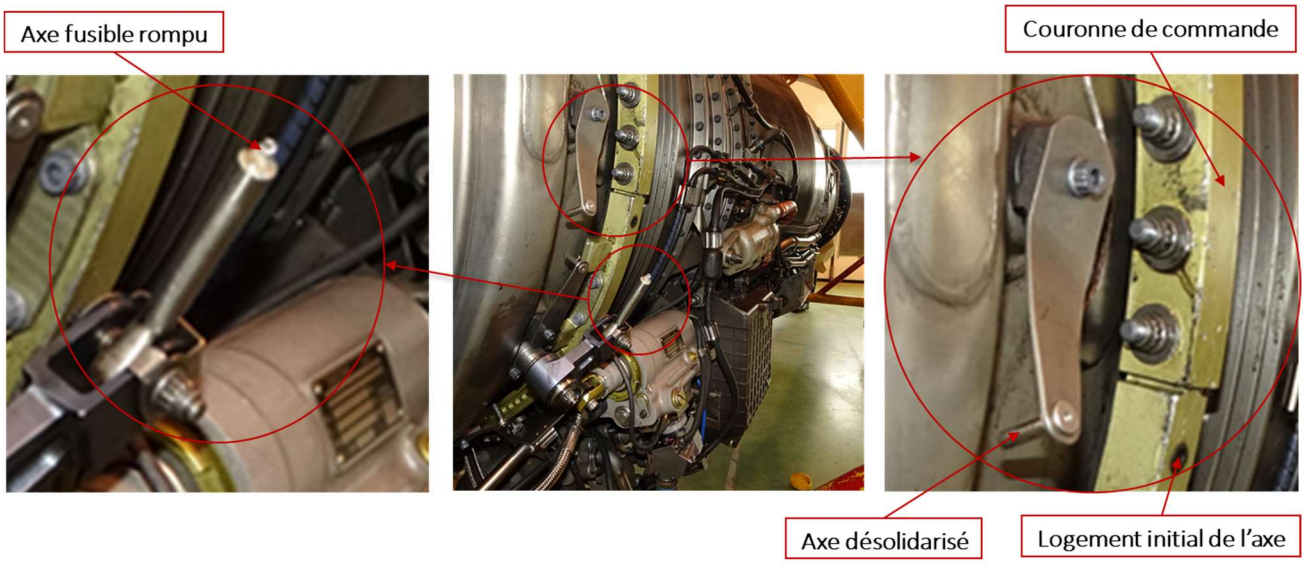

Figure 9 : couronne de commande des volets de la roue mobile d'entrée

Des dépôts de matière sont retrouvés à l'intérieur de la vanne de prélèvement d'air droite. L'arbre d'entraînement de la PMA est bloqué. Le compresseur basse pression (BP) est bloqué.

1.13. Renseignements médicaux du commandant de bord

- Dernier examen médical :
  - type : visite révisionnelle du personnel navigant du 29 mars 2023 en référence à la visite au centre d'expertise médicale du personnel navigant (CEMPN[22]) du 2 septembre 2022
  - Résultat : apte
- Examens biologiques : non effectués
- Blessures : aucune

1.14. Incendie

Sans objet.

1.15. Questions relatives à l'organisation des secours

1.15.1. Engagement d'un système d'arrêt lors de l'atterrissage

Par précaution, le pilote prend la décision de prendre le brin de début de bande, ce qu'il réalise avec succès.

1.15.2. Organisation des secours

Le pilote rejoint le terrain de la BAN de Landivisiau en mono-moteur.
À 21h23 (3 minutes après l'évènement) : l'équipe du SSIS (Service Sécurité Incendie et de Secours) est alertée par la tour de contrôle d'une panne moteur sur un Rafale Marine non armé avec 1,7 t de carburant à bord.
Le pilote ne demandant pas d'assistance, ni l'équipe médicale d'astreinte de la BAN, ni les secours médicalisés civils ne sont alertés.
À 21h28 : l'équipe du SSIS au complet est positionnée à la bretelle Charlie avec un véhicule léger poste de commandement (chef de manœuvre à bord), un véhicule d'intervention mousse (avec deux marins pompiers à bord), un Véhicule d'Intervention Polyvalent (avec trois marins pompiers à bord) ainsi que deux véhicules du Service de Soutien Opérationnel (un camion d'intervention spécialisé et véhicule de tractage).

[22] Selon l'instruction n° 0-35460-2017/ARM/DPMM/PRH du 13 novembre 2017 relative aux normes médicales d'aptitude d'admission et révisionnelles aux emplois du personnel navigant de l'aéronautique navale.

À 21h33 : atterrissage et prise de brin du Rafale n°39. Les véhicules d'intervention roulent à ses cotés sur la parapiste à partir de la bretelle Charlie. L'équipe de sécurité ne note aucun élément anormal sur l'avion, ni de fumée ni de feu détecté.
À 21h42 : le Rafale et les véhicules d'intervention arrivent au parking, une fois son aéronef immobilisé le pilote coupe le moteur gauche. Après l'autorisation accordée par la tour de contrôle, l'équipe du SSIS retourne en caserne.
À 21h47 : les secours signifient la fin de l'alerte.
L'antenne médicale est prévenue le lendemain de l'incident.

1.16. Essais et recherches

Les analyses de l'huile et du carburant prélevés sur le Rafale M39, les expertises des copeaux métalliques retrouvés dans la vanne de prélèvement d'air et des dépôts métalliques présents sur les volets de la tuyère moteur, sont réalisées par DGA EP.
L'expertise du moteur est réalisée par l'AIA de Bordeaux.
L'expertise des aubes turbines est réalisée par l'AIA de Bordeaux et SAE.
L'analyse des facteurs organisationnels et humains est réalisée par le BEA-É.

1.17. Renseignements sur les organismes

La Flottille 11F est l'une des trois flottilles de Rafale Marine de l'aéronautique navale basée à Landivisiau. Elle a vocation à embarquer sur le porte-avions « Charles-de-Gaulle » pour assurer des missions d'intervention, de protection et de dissuasion.

1.18. Moteur M88-2

Le moteur Snecma M88-2 est un moteur conçu et développé par le motoriste français Safran Aircraft Engines (SAE). Le premier exemplaire a été produit en 1989.
Le M88-2 a été spécialement conçu pour équiper les différentes versions du Rafale. Il est capable de délivrer une poussée de 50 kN en plein gaz sec et une poussée de 75 kN en postcombustion. Il est constitué de 21 modules indépendants. L'architecture de ce moteur est à double flux et à double corps. Les corps basse pression (BP) et haute pression (HP) sont constitués respectivement de compresseurs à trois et six étages et de turbines à un étage.
Les aubes de la turbine HP sont au dernier standard (coût global de possession CGP) déployé sur M88-2. Ce dernier a été déployé à partir de 2012 dans les forces et a notamment pour but d'améliorer la disponibilité du moteur. Ainsi, les pas de contrôle des aubes ont été allongés dans le plan recommandé d'entretien (PRE).

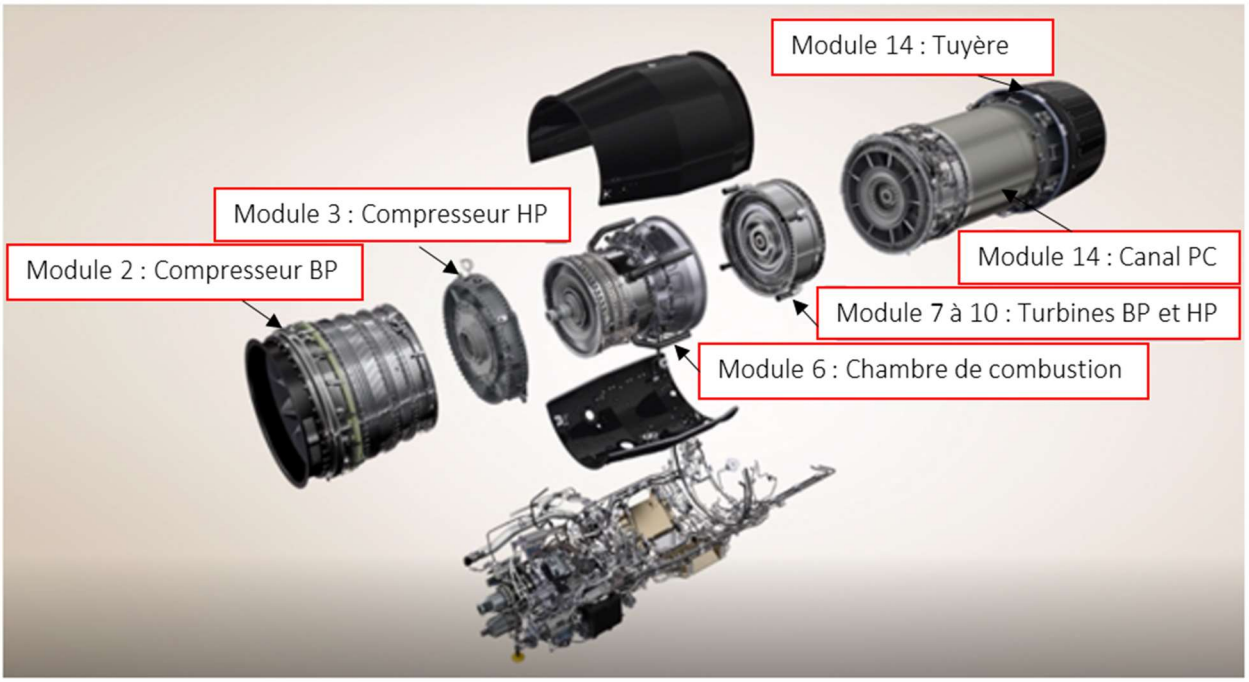

Figure 10 : présentation des modules du moteur M88-2 mentionnés dans le rapport

2. ANALYSE

2.1. Expertises techniques

2.1.1. Analyses des fluides

2.1.1.1. Analyse de l'huile

L'analyse montre que l'huile moteur prélevée correspond bien à une huile synthétique de type O-156 et ne met pas en évidence de pollution organique.
Dans le carter du support équipement, l'huile prélevée est de couleur foncée et a un aspect inhabituel révélateur d'une dégradation significative des pièces mécaniques internes au moteur.
L'analyse des crépines du circuit d'huile montre la présence de copeaux métalliques, de morceaux de carbone et de particules, signes d'une dégradation interne importante du moteur.

L'huile est fortement polluée, ce qui témoigne d'une dégradation interne importante du moteur.

2.1.1.2. Analyse du carburant

Le carburant prélevé correspond bien à un carburéacteur de type F-34 en usage sur l'aéronef.
Le prélèvement effectué dans la purge du Rafale met en évidence l'absence de pollution et/ou de dégradation organique.
Le carburant prélevé dans l'échangeur huile/carburant a un aspect clair et limpide. Le carburant ne présente pas d'anomalie.
Pour celui prélevé en sortie de l'échangeur avant la pompe, l'analyse met en évidence la présence d'huile synthétique de type O-156, ce qui est une des conséquences de la dégradation du moteur.

La présence d'huile dans le carburant est une conséquence de la dégradation du moteur

2.1.2. Analyse des dépôts sur les volets chauds et dans la vanne de prélèvement d'air

L'analyse des résidus prélevés sur les volets chauds et de ceux retrouvés dans la vanne de prélèvement d'air met en évidence la présence très majoritaire de nickel. Ce métal rentre dans la composition de plusieurs pièces du moteur qui ont été détruites lors de l'évènement.

Les dépôts retrouvés sur les volets chauds et dans la vanne de prélèvement d'air sont des résidus de certaines pièces du moteur qui ont été détruites lors de l'évènement.

2.1.3. Analyses des données de vol

L'analyse des données de vol enregistrées avant l'évènement ne montre aucune anomalie.
En revanche, l'analyse des données enregistrées par le calculateur du moteur droit met en évidence l'apparition d'un pompage du moteur alors que le régime moteur est au plein gaz. Le pompage survient au niveau du compresseur HP et est aussitôt suivi de la perte de vitesse rapide de rotation de l'arbre HP du moteur. Consécutivement à cette chute de régime, le calculateur moteur tente plusieurs rallumages, conformément aux lois de régulation moteur, sans succès. L'analyse seule des données de vol ne permet pas de déterminer si les dégradations constatées sont la cause ou la conséquence du pompage.
Par ailleurs, l'analyse ne montre pas de dysfonctionnement de l'asservissement de la tuyère jusqu'à l'arrêt du moteur.

L'analyse des données du moteur met en évidence un phénomène de pompage du moteur droit à partir du compresseur HP conduisant à son arrêt.

2.1.4. Expertises du moteur M88-2

Le moteur montre de forts endommagements sur de nombreux modules. Les expertises moteur ont pour but de déterminer si le pompage du compresseur est une cause ou une conséquence d'une détérioration interne au moteur. Le pompage étant survenu en premier sur le corps HP du moteur, les expertises se sont donc focalisées sur cette partie du moteur. Un premier contrôle endoscopique montre que les aubes du compresseur HP sont beaucoup moins abîmées que celles de la turbine HP, la recherche de l'origine de l'évènement se concentre donc sur cette dernière.

2.1.4.1. Expertises de la turbine haute pression (module 8)

Après démontage du module turbine haute pression (TuHP), de nombreux endommagements sont visibles. Le corps HP est bloqué en rotation. Les 60 aubes qui composent la turbine HP sont rompues :

- les aubes 4 à 27 le sont en base de pale ;
- les aubes 3 à 1 et 60 à 28 sont rompues à des hauteurs croissantes.

L'endommagement de la turbine HP est en forme d'« escargot ». Cette forme est caractéristique de la perte d'une aube qui entraîne la rupture des aubes voisines.

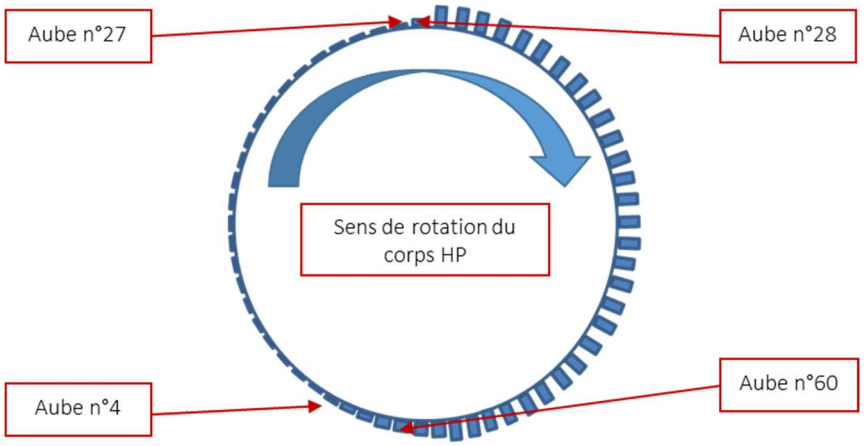

Figure 11 : schéma de l'endommagement en escargot de la turbine HP (vue depuis l'arrière du moteur)

La première aube à se rompre est la n°27. Les débris de celle-ci détruisent, en base de pale, les aubes suivantes dans le sens de la rotation du moteur. À partir de l'aube n°4, l'énergie de ces débris diminue et les aubes sont de moins en moins endommagées jusqu'à la dernière aube (n°28). Ce mode de dégradation est caractéristique d'une rupture d'aube de turbine HP.

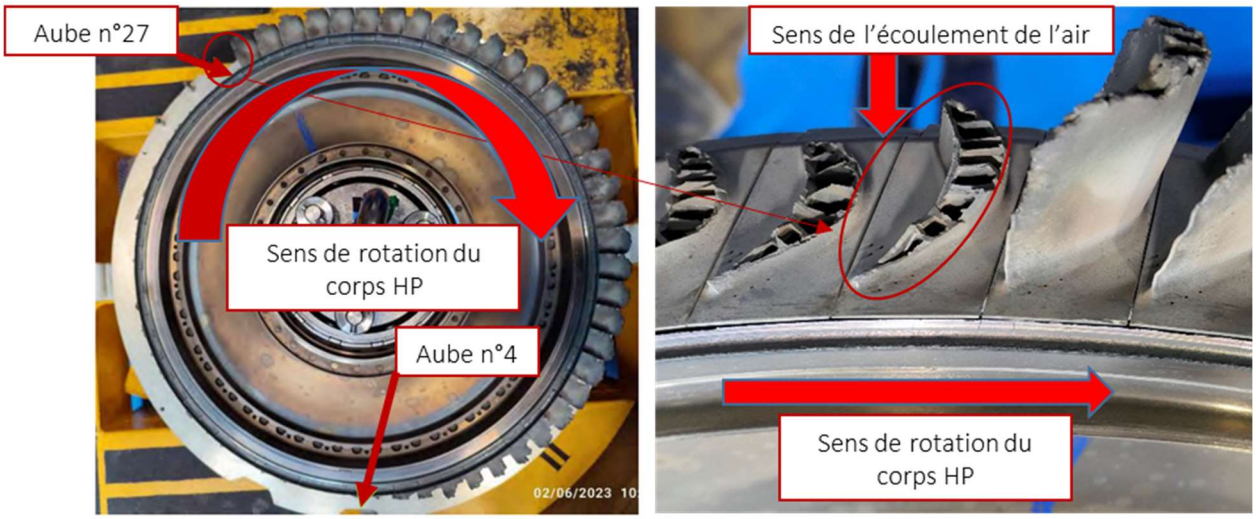

Figure 12 turbine HP endommagée et aube n°27 rompue (vue depuis l'arrière du moteur)

L'expertise de la turbine HP montre une destruction en escargot des aubes de la turbine HP initiée par la rupture de l'aube n°27 en base de pale.

2.1.4.2. Expertises de l'aube n°27 de la turbine HP

L'examen laboratoire de l'aube n°27 permet de conclure que la rupture est due à une crique (ou fissure) qui s'est initiée (zone d'amorçage) en base de pale, en paroi extrados et côté bord de fuite. L'aube présente deux zones avec des faciès[23] de ruptures différents : une zone avec un faciès de rupture dû à des efforts thermomécaniques alternés et une zone avec un faciès de rupture en arrachement.

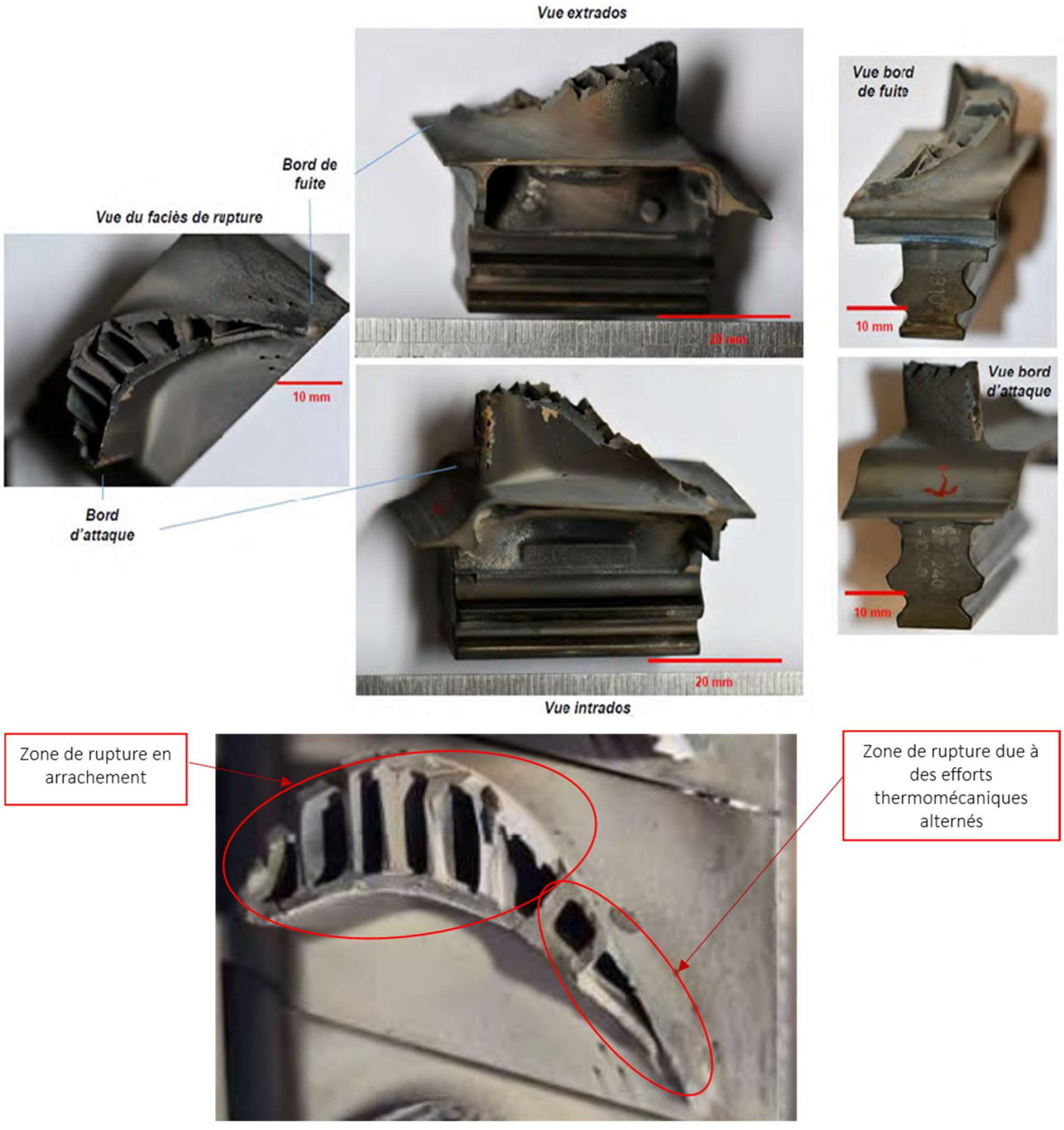

Figure 13 : aube TuHP n°27

La rupture de l'aube n°27 de la turbine HP est due à la propagation d'une crique sous l'action d'efforts thermomécaniques alternés.

[23] Le faciès correspond au profil de rupture d'une pièce.

2.1.4.3. Origine de la crique de l'aube n°27 de la turbine HP

Depuis la zone d'amorçage, l'aube n°27 de la TuHP du moteur droit s'est fissurée de manière progressive jusqu'à la cloison située entre les cavités 6 et 7 puis s'est rompue de manière brutale sur le reste de la section.

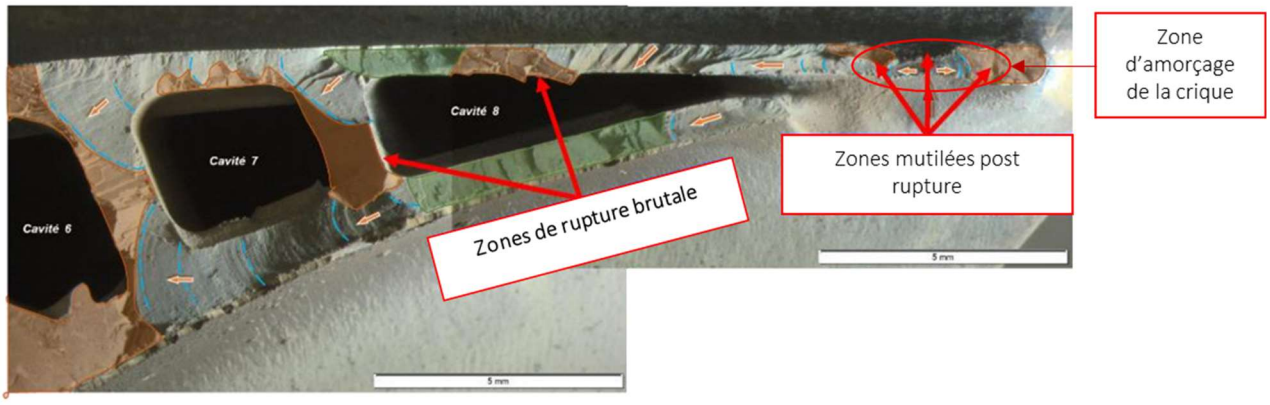

Figure 14 : faciès de la base de la pale rompu de l'aube TuHP n°27

La concentricité des lignes frontales de propagation dans les parois extrados et intrados indique un amorçage situé dans une zone mutilée post-rupture.
Le faciès de rupture de l'aube est similaire à d'autres constats réalisés sur des moteurs en service. La localisation et la forme de ce faciès correspond à une crique de type C[24]. Celle-ci est référencée dans la documentation certifiée avec des critères de tolérance associés.

La zone d'amorçage en base de pale de l'aube, sur la paroi intérieure de l'extrados, au niveau du bord de fuite correspond à une crique de type C.

2.1.4.4. Caractérisation de la dimension de la crique

L'aube TuHP est soumise à des efforts thermiques et mécaniques successifs, ce chargement alterné est appelé cycle thermomécanique.
Lorsqu'une crique est initiée, ces cycles thermomécaniques peuvent être comptés sur le faciès de rupture, ainsi chaque strie correspond à l'avancement du front de propagation pour chaque cycle.
Un comptage du nombre de stries réalisé sur le plan de fissuration à partir de la zone exploitable (à 2,4 mm de l'extrémité du bord de fuite) côté paroi extrados et intrados révèle 1 308 stries côté extrados et 932 côté intrados correspondant à autant de fronts de propagation ou de cycles.

[24] Une crique de type C dans une aube de turbine est une crique initiant en bas de pale côté bord de fuite.

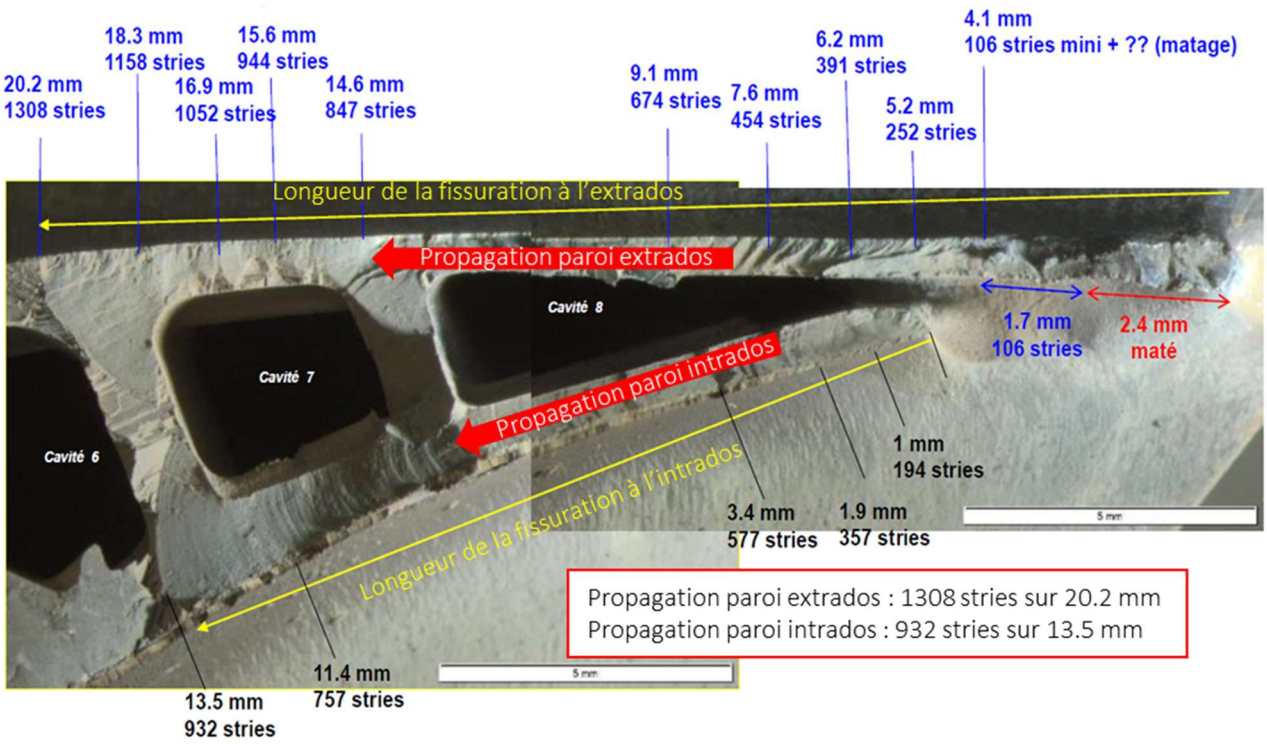

Figure 15 : comptage de stries de l'aube TuHP n°27

Les valeurs issues de l'expertise du faciès de rupture sont *a minima* car la zone d'amorçage de la crique a été dégradée par les conséquences de l'évènement. Ainsi la longueur de la crique est au minimum de 20.2 mm avant la rupture à l'arrachement ce qui correspond à un minimum de 1 308 fronts de propagation.

2.2. Séquence de l'évènement

A 21h20, alors que la Rafale n°39 est en montée vers 5 000 ft en plein gaz sec, l'aube n°27 de la turbine HP se rompt consécutivement à la propagation d'une crique de type C en base de pale entraînant la destruction de l'ensemble de la turbine HP. Le moteur perd du régime, commence à vibrer et un pompage moteur s'initie. Les alarmes « R.ENG VIB » puis « R.ENG FLAMEOUT » s'affichent sur le tableau d'alarme.
Le calculateur moteur tente plusieurs rallumages en automatique sans succès.
Le pompage a pour effet d'inverser le flux dans la veine d'air, provoquant les autres dégâts constatés sur le moteur et l'aéronef, notamment :

- la déformation de la tapette d'air ;
- l'expulsion de la trappe de visite de l'arbre de la prise de mouvement avion (PMA) ;
- la désolidarisation des commandes des volets de la roue directrice d'entrée, qui, une fois libres, tapent contre les bras de l'entrée d'air ;
- l'évacuation de débris métalliques dans la vanne d'appoint d'air.

La détérioration de la turbine HP génère un fort balourd, ayant pour conséquence la rupture des vis du cône de dilution, provoquant sa chute au fond du moteur.
Une partie des débris des pièces rompues est fondue dans la chambre de combustion, certains étant retrouvés sur les volets de la tuyère.

2.3. Recherche des causes de l'évènement

Les causes de l'évènement sont recherchées dans le domaine technique et dans le domaine des facteurs organisationnels et humains.

2.3.1. Cause de l'origine de la crique de l'aube de la turbine HP

La base d'une pale d'aube TuHP est une zone où les contraintes mécaniques sont fortes et les variations de température y sont très importantes. Une crique peut s'y initier et se propager à partir d'une zone d'amorçage sous l'effet des contraintes thermiques et mécaniques alternées.

Cette zone d'amorçage peut survenir pour différentes raisons :

- un défaut métallurgique ou géométrique survenu lors de la fabrication ;
- un corps étranger ingéré dans le circuit de ventilation interne de l'aube ;
- un corps étranger dans le flux moteur impactant l'aube ;
- un choc lors d'une opération de maintenance (montage, démontage, stockage, contrôle, etc…) ;
- un endommagement de l'aube soumise à des contraintes variables et fréquemment répétées appelé fatigue.

Tout au long du processus de fabrication les aubes TuHP sont contrôlées afin de s'assurer de leur conformité, par rapport à la définition du constructeur. Elles sont radiographiées en fin de production. L'enquête qualité menée après l'évènement chez SAE concernant la fabrication et le montage de cette pièce ne révèle aucune non-conformité.
La nature des endommagements (absence de brûlure et de perte partielle d'aube) n'est pas compatible avec l'ingestion d'un corps étranger dans le circuit de ventilation de l'aube.
L'aube TuHP étant située derrière le distributeur HP, après la chambre de combustion, il est très improbable qu'un corps étranger puisse l'atteindre et provoquer par impact une zone d'amorçage de crique au bord de fuite moins exposé que le bord d'attaque ou l'intrados.
Lors des opérations de maintenance, une attention particulière est apportée à la manipulation de ces pièces. Des moyens de stockage et de transport dédiés existent pour protéger les aubes. Ainsi, les opérateurs des Forces sont fréquemment formés sur ces sujets lors des ateliers « chocs et rayures » organisés par le SIAé. Un choc non détecté lors d'une opération de maintenance ne peut cependant pas être écarté.

Les aubes ont été dimensionnées pour résister aux différentes contraintes (mécaniques et thermodynamiques) auxquelles elles sont soumises. Néanmoins et très exceptionnellement, une crique en fatigue peut survenir en raison des fortes sollicitations exercées sur cette pièce. Ainsi, sur les plus de 36 000 contrôles binoculaires réalisés en dix ans sur des aubes TuHP au standard CGP, dix ont été écartées en raison d'une crique type C. Pour ces aubes rebutées, lorsque les expertises ont permis d'identifier l'origine des criques, celle-ci était un amorçage en fatigue.
Les examens du plan de rupture de l'aube n°27 ont mis en évidence en extrémité du bord de fuite, la présence de mutilations suite à de multiples impacts post-rupture, rendant l'origine de la crique indéterminable.

En raison de l'état de la pièce, il est impossible de déterminer avec certitude l'origine de la crique. Cependant une amorce en fatigue est l'hypothèse la plus probable.

2.3.2. Causes de la non-détection de la fissuration de l'aube de la turbine HP

Le plan recommandé d'entretien (PRE) établi par le constructeur et approuvé par l'autorité technique prévoit un plan de contrôle de ces aubes en fonction du nombre de cycles comptés par le calculateur moteur avec un critère associé à la longueur des criques de type C. À ce jour, dix aubes TuHP CGP en utilisation dans les forces ont été écartées pour ce motif.
Ainsi selon le PRE:

- tous les 1 800 cycles, un contrôle est fait à l'aide d'un microscope binoculaire, libérant en cas de conformité aux critères d'admissibilité de l'aube, un nouveau potentiel de 1 800 cycles ;
- au bout de 1 370 cycles après un contrôle binoculaire, un contrôle endoscopique doit être réalisé avec des critères d'acceptabilité spécifiques et adaptés au moyen de contrôle. Si l'aube satisfait aux critères d'admissibilité, elle repart en service jusqu'au prochain pas de contrôle binoculaire.

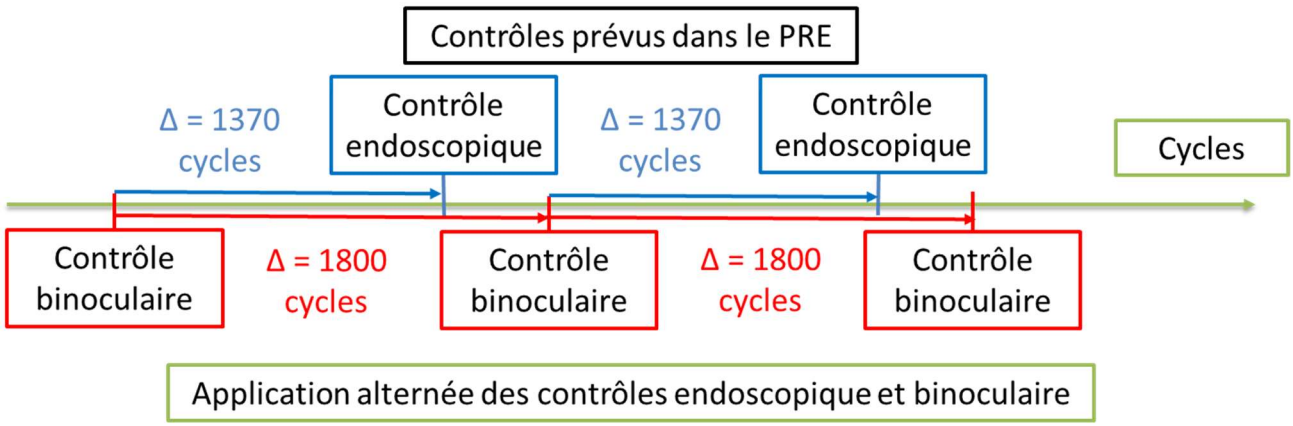

Figure 16: schéma représentant les pas d'inspection prévus dans le PRE de la turbine HP

Les critères d'acceptabilité de criques dans la zone concernée sont les suivants :

- lors d'un contrôle endoscopique les criques ne doivent pas excéder 9 mm ;
- lors d'un contrôle binoculaire les criques ne doivent pas excéder 1 mm.

Si une crique hors critère est détectée, la pièce doit être remplacée.

Une analyse du PRE et des derniers contrôles réalisés sur l'aube n°27 permet de déterminer si la crique était déjà présente lors des derniers contrôles et si sa dimension rentrait ou non dans les critères d'acceptabilité.

2.3.2.1. Historique de maintenance de l'aubage de turbine HP n°27

L'analyse de l'historique de maintenance de l'aubage révèle que le dernier contrôle binoculaire, enregistrée dans la docuementation, a été réalisé conformément aux spécifications du plan recommandé d'entretien à 3 611 cycles à bord du porte-avions « Charles de Gaulle ».
Le calculateur moteur a compté 1 219 cycles entre ce dernier contrôle binoculaire et la rupture de l'aube n°27, soit 151 cycles avant le prochain contrôle endoscopique.
Le comptage du nombre de front de propagation montre que la crique s'est propagée durant au moins 1 308 cycles.

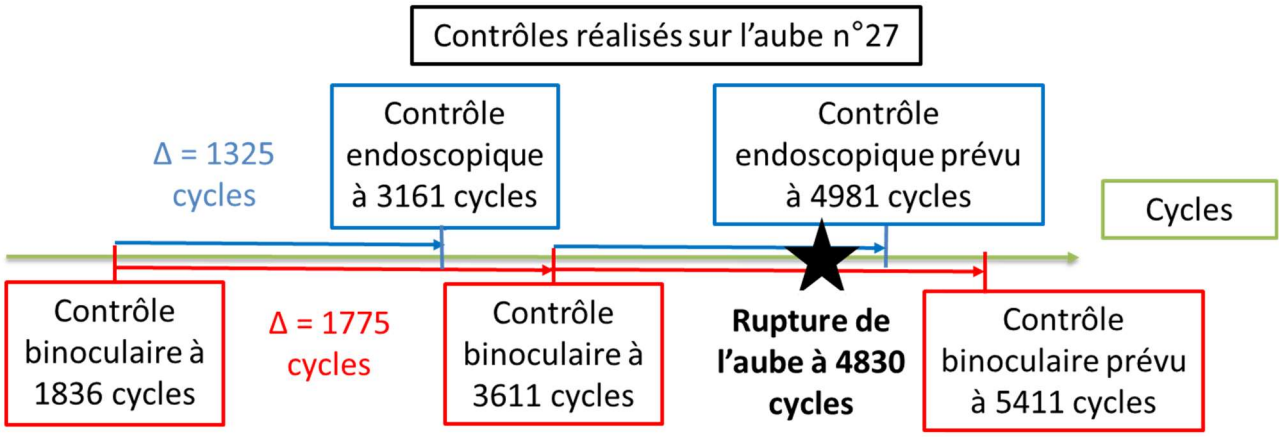

Figure 17: schéma représentant les pas d'inspection réalisés de la turbine HP

L'analyse de ce comptage permet de dire que la crique était déjà présente lors du dernier contrôle binoculaire. Par comparaison du nombre de fronts de propagation avec des criques de type C observées sur d'autres aubes TuHP, la taille de cette crique lors du dernier contrôle binoculaire était au minimum de 1.58 mm.
L'écart entre chaque front est un indicateur de la vitesse de propagation. Celle constatée sur l'aube n°27 est cohérente avec l'expérience du constructeur sur ce sujet et dans la moyenne des vitesses de propagation observées sur d'autres aubes ayant criqué. Ainsi, cette analyse de la vitesse de propagation permet d'établir que la longueur de cette crique lors du dernier contrôle binoculaire était plus probablement de l'ordre de 3.8 mm.
Lors du dernier passage en contrôle binoculaire, la crique avait donc une longueur au-delà des critères d'acceptabilité mais n'a pas été détectée. Cette crique a continué de se propager durant les cycles ultérieurs jusqu'à atteindre 20.2 mm lors de la rupture de l'aube.

La crique sur l'aube n°27 était déjà présente lors du dernier contrôle binoculaire, mais n'a pas été identifiée par l'opérateur en charge du contrôle. De plus, sa longueur dépassait la norme acceptable selon la documentation de maintenance en vigueur.

2.3.2.2. Probabilité de détection de la crique lors du contrôle binoculaire

Les pas de contrôle des aubes TuHP spécifiés dans le PRE et les critères d'admissibilité décrits dans la documentation de maintenance, sont établis en s'appuyant sur des critères de vitesse de propagation des criques et de leur détection par les opérateurs. Pour les criques de type C, en 2013, lors de l'introduction des aubes TuHP au standard CGP, une campagne de mesure par SAE auprès du personnel de l'armée de l'Air et de l'Espace et de la Marine nationale avait eu notamment pour résultat qu'un opérateur avait 92 % de chance de détecter une crique supérieure à 1.18 mm. A l'occasion de cette campagne, les opérateurs ont été formés, sur un lot d'aubes rebutées, à la détection de ce type de crique.

Les expertises ont déterminé que la longueur de la crique présente sur l'aube n°27 lors du dernier contrôle était probablement de l'ordre de 3.8 mm ; or le PRE est construit selon l'hypothèse qu'une crique de cette taille doit être détectée par les opérateurs.

Cette dernière opération de contrôle binoculaire a été réalisée sur le porte-avions « Charles de Gaulle ». Le matériel et les opérateurs y sont les mêmes qu'à terre et les opérateurs en charge du contrôle des aubes ne sont pas soumis au service de quart de nuit la veille d'un contrôle. En revanche, les conditions et rythmes de travail n'y sont pas les mêmes. De plus, alors que ce travail au microscope exige un fort niveau attentionnel (l'opérateur doit, en plus de la vérification de la présence de criques de type C, contrôler plus de 20 autres critères sur les 60 aubes que comptent la turbine HP), le local où il se situe est bruyant et est susceptible d'être évacué selon les opérations et exercices du bord pouvant générer des interruptions de tâche. La détection d'une crique de type C dans cet environnement en est possiblement affectée.

Depuis la campagne menée par SAE en 2013, sur les plus de 36 000 contrôles binoculaires réalisés sur des aubes CGP, seulement 10 criques de type C de longueur supérieur à 1 mm ont été détectées. Parmi ces 10 criques, 9 mesuraient entre 1 et 1.5 mm, la dixième mesurait 1.6 mm. Il est donc exceptionnel pour un opérateur (24 actuellement au sein de la Marine nationale, de l'armée de l'Air et de l'Espace et du SIAé) d'avoir déjà détecté une crique de ce type. L'opérateur ayant réalisé le précédent contrôle binoculaire (bien qu'il soit expérimenté) n'a possiblement jamais vu de crique C sur une aube de turbine HP. La faible exposition des opérateurs aux criques de type C a possiblement contribué à la non-détection de cette dernière.

L'opérateur ayant effectué le dernier contrôle de l'aube n'a pas été formé *ab-initio* par SAE.

Lors de la campagne initiale de SAE (2013) qui consistait à l'évaluation de la capacité par les opérateurs à détecter des criques de type C sur des aubes TuHP, la formation s'appuyait sur l'observation réelle de ces dernières.

Depuis, la formation des opérateurs dispensée par le SIAé repose principalement sur l'étude de la documentation et l'analyse de photographies de criques issues de la documentation technique.

Le contenu de la formation reçue par l'opérateur a donc probablement réduit la probabilité de détecter ce type de crique.

En conditions opérationnelles, la probabilité de détecter une crique hors tolérance, pour un opérateur à bord du porte-avions est possiblement plus faible que ce qui est attendu par le plan d'inspection déterminé par SAE en 2013. **Par ailleurs, le manque d'exposition aux criques en situation réelle et le contenu de la formation dispensée ont probablement contribué à réduire la capacité de détecter ce type de crique.**

2.4. Recherche des causes annexes n'ayant pas contribué directement à l'évènement

2.4.1. Décision de poursuite de la mission

2.4.1.1. Évaluation du risque

D'après les instructions de l'exploitant[25], un aéronef en difficulté doit être ramené, dans la mesure du possible, vers un terrain accessible à vue. Dans le doute, il est demandé de toujours agir comme si cet avion ne disposait que d'un minimum de moyens. Bien que le pilote se soit posé en monomoteur sans incident, la perte d'un moteur associée à une explosion est une situation aux conséquences imprévisibles. De plus, l'évènement survient de nuit, complexifiant la gestion globale de l'évènement. Enfin, le pilote de l'avion en panne annonce qu'il n'entend pas le directeur des vols sur la fréquence dédiée. Les conditions de retour vers le terrain ne sont donc pas optimales. Ainsi, l'assistance et la surveillance de l'aéronef en panne par un autre aéronef jusqu'au posé aurait été une garantie de sécurité supplémentaire.
Cette mission a par ailleurs nécessité une organisation contraignante avec la mise en vol au total de six Rafale. Conscient des contraintes d'un tel exercice, le pilote n°2, responsable de la patrouille et commandant de la flottille, a certainement développé une forte motivation pour réaliser l'exercice. De plus, la proposition de changement de plan d'action s'effectue après plusieurs minutes de vol en direction de Landivisiau sans dégradation de la situation. La situation est alors perçue comme maitrisée par le responsable de la patrouille. Ces conditions ont probablement contribué à sa décision de poursuivre la mission malgré le risque induit pour le pilote n°3 de rentrer seul à Landivisiau. Si l'accompagnement du n°3 jusqu'au posé avait été décidé, un accompagnement par le n° 1 ou le n°2 de la patrouille n'aurait pas permis de poursuivre la mission de formation du pilote n°1.

La décision de laisser rentrer seul de nuit un chasseur en panne moteur à 25 Nm du terrain, soit 7 minutes de vol, et alors que le contact avec le DV n'est pas établi, s'écarte des recommandations de l'exploitant.
Cette décision, qui induit une prise de risque pour l'aéronef en panne, est motivée par une volonté de mener à bien un exercice nécessitant une préparation complexe et avec un nombre conséquent d'aéronefs.

[25] Instruction permanente N° 81.1.12 ALAVIA/MRA/NP – Édition 03– Ind. B.

2.4.1.2. Changement du plan d'action

Le vol est une mission d'entraînement en vue de l'obtention de la qualification de chef de patrouille au profit du pilote n°1. Durant la totalité du début du vol, le leadership de la patrouille est assuré, comme attendu, par ce dernier.

Le changement de plan d'action est initié par le pilote n°2 qui intervient sur la fréquence inter-patrouille en tant que responsable de la patrouille. Cette proposition n'a fait l'objet d'aucune discussion en amont avec le leader à l'entraînement marquant ainsi un changement de leadership au sein de la patrouille. Aucun des pilotes ne remet en question cette proposition. En tant que responsable de la patrouille et par ailleurs commandant de l'unité, cette intervention soudaine est perçue comme un ordre par les autres pilotes de la patrouille.

La prise du leadership par le numéro 2 a certainement contribué à la non-remise en question de sa proposition par les pilotes de la patrouille bien que cette décision s'écarte des recommandations.

2.4.2. Radio au sol

Sur le transit retour, le pilote n°3 n'entend pas le DV sur la radio, seul le pilote n°1 a le DV en fréquence. Les quatre aéronefs n'ont pas tous les mêmes radios. Mais ce critère n'est pas discriminant, car un autre appareil ayant la même configuration radio que celle du leader à l'entraînement n'a pas réussi à communiquer avec le DV.

En revanche, la radio utilisée par le DV est dix fois moins puissante que celle de la tour de contrôle et la longueur de sa liaison coaxiale (entre la station VHF à la Flottille 11F et l'antenne sur le toit du bâtiment) est 20 mètres plus longue. De plus, les antennes émettrices de la tour sont dégagées de tout obstacle, alors que les antennes des moyens radios de la flottille sont situées sur le toit du bâtiment à une faible hauteur.

La puissance de l'émetteur, la longueur du câble et le positionnement de l'antenne émettrice influent fortement sur la portée en émission des moyens radio du directeur des vols en flottille et peuvent entraîner une perte de contact radio avec un aéronef évoluant à faible altitude.

Lors de l'évènement, les caractéristiques de la station radio utilisée par le DV ne lui permettent pas d'établir le contact avec tous les membres de la patrouille.

3. CONCLUSION

L'évènement est l'extinction d'un moteur sur un Rafale Marine au cours d'un vol d'entraînement en patrouille à quatre appareils.
#SCF-PP[26]

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

Le 4 avril 2023 à 21h20 lors d'un vol d'entraînement de nuit en basse altitude, après avoir accéléré vers 480 kt en légère montée, le pilote n°3 d'une patrouille de quatre Rafale ressent des fortes secousses, perçoit une détonation et un flash lumineux, suivis de l'allumage d'alarmes indiquant des vibrations et l'extinction du moteur droit. L'aube n°27 de la turbine HP vient de rompre, les débris de l'aube endommagent à leur tour les autres aubes de la turbine HP. La destruction de la turbine HP provoque le pompage du moteur, celui-ci a pour effet d'inverser le flux d'air dans le moteur, d'initier les vibrations et d'éteindre la chambre de combustion. Ce pompage moteur est la cause de l'éjection de la trappe de visite sous le capot avant et de la déformation de la tapette d'air additionnelle du moteur droit. Les débris de la turbine HP se retrouvent dans les dépôts sur les volets de la tuyère ainsi que dans la vanne de prélèvement d'air.
Le pilote annonce immédiatement un stop combat et décide de ne pas rallumer le moteur droit. Son équipier lui confirme avoir vu une longue flamme sortir de l'arrière de l'aéronef.
La patrouille monte à l'altitude de sécurité de 5 000 ft en prenant la direction de Landivisiau. L'ensemble de la patrouille passe sur la fréquence du directeur des vols et le leader assiste l'avion en panne en lui lisant la check-list.
Le Rafale vidange son carburant et se présente dans l'axe de la finale. Une fois en bon contact radio avec le contrôle local d'aérodrome et à 25 Nm, soit à 7 minutes de vol du terrain, la décision est prise par le responsable de la patrouille, en coordination avec le pilote n°3, que les appareils restants fassent demi-tour pour poursuivre la mission.
La finale et l'atterrissage avec prise de brin se déroulent sans encombre, le pilote roule en autonomie jusqu'au parking.

3.2. Causes de l'évènement

La cause de l'évènement est une panne moteur en vol due à la rupture d'une aube de la turbine haute pression, faisant suite à une crique de type C sur l'aube n°27.
En raison de l'état de la pièce, il est impossible de déterminer avec certitude l'origine de cette crique, cependant il est probable que celle-ci se soit amorcée en fatigue.
Cette crique était déjà présente lors du dernier contrôle binoculaire et sa longueur était non acceptable selon les critères du PRE. La non-détection de la crique de type C lors du précédent contrôle a conduit à l'évènement.

En conditions opérationnelles, la probabilité de détecter une crique hors tolérance, pour un opérateur à bord du porte-avions est possiblement plus faible que ce qui est attendu par le plan d'inspection déterminé par SAE en 2013. Par ailleurs, le manque d'exposition aux criques en situation réelle et le contenue de la formation ont probablement contribué à réduire la probabilité de détecter ce type de crique.

D'autres éléments ayant trait à la sécurité aérienne ont été identifiés.
La décision de laisser de nuit rentrer seul un chasseur en panne s'écarte des recommandations de l'exploitant. Cette décision est le fruit d'un compromis entre une volonté de mener à bien un exercice nécessitant une préparation complexe et un nombre conséquent d'aéronefs, et l'accompagnement du n°3 par pilote dûment qualifié. La prise du leadership par le responsable de la patrouille a certainement contribué à la non-remise en question de sa décision par les pilotes de la patrouille.
Par ailleurs, les caractéristiques de la station radio du directeur des vols ne lui permettent pas d'établir le contact avec tous les membres de la patrouille.

[26] *Powerplant failure or malfunction* Panne ou mauvais fonctionnement d'un circuit ou d'un composant (faisant partie du groupe motopropulseur) selon la taxonomie du système de déclaration des données sur les accidents et incidents aériens de l'organisation de l'aviation civile internationale (OACI).

PAS DE TEXTE

4. RECOMMANDATIONS DE SÉCURITÉ

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

4.1.1. Adéquation du plan recommandé d'entretien

L'extinction du moteur droit du Rafale est due à la rupture d'une aube de la turbine HP suite à la propagation d'une crique de type C en base de pale.
Lors du dernier contrôle binoculaire, la longueur de cette crique était hors critère et n'a pas été détectée par l'opérateur.
Le plan recommandé d'entretien du M88-2 a été construit sur des hypothèses de détection lors du contrôle binoculaire. Dans le cas présent, la crique n'ayant pas été détectée, ces hypothèses pourraient être remises en question.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'autorité technique en coordination avec SAE, de vérifier l'adéquation entre le plan recommandé d'entretien et ses conditions d'application pour ce qui concerne le contrôle des aubes de la turbine HP.

R1 – [M-2023-04-I] *Destinataire : DGA AT*

4.1.2. Formation à la détection des criques de type C

Lors de la campagne de 2013 de construction du PRE, SAE a formé les opérateurs de l'armée de l'Air et de l'Espace, de la Marine nationale et du SIAé à la détection des criques de type C sur les aubes de turbine HP. Depuis, le SIAé (qui est en charge de former les opérateurs) n'a pas reproduit ces sensibilisations sur des cas réels.
Ainsi, les opérateurs en charge des contrôles des aubes de turbine HP n'ont pour la plupart jamais vu de crique de type C.

En conséquence, le BEA-É recommande :

au SIAé de s'assurer du niveau de formation initiale et continue des opérateurs en charge du contrôle sur les aubes de turbines HP et de les sensibiliser sur les risques associés aux criques de type C, à partir de l'examen de pièces rebutées et de façon complémentaire d'étudier l'apport d'outils numériques tel que la réalité virtuelle.

R2 – [M-2023-04-I] *Destinataire : SIAé*

4.1.3. Documentation et aides à la détection

Les opérateurs du SIAé, de l'armée de l'Air et de l'Espace et de la Marine nationale lors des contrôles des aubes de turbine HP n'ont pas facilement accès à toute la documentation décrivant les criques de type C.
Par ailleurs, l'aspect des criques de type C et la criticité liée à leur survenue ne sont pas suffisamment explicites dans la documentation certifiée.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à SAE de détailler, dans la documentation de maintenance, plus clairement l'aspect d'une crique de type C sur une aube de turbine HP et souligner l'importance de sa détection.

R3 – [M-2023-04-I] *Destinataire : SAE*

4.2. Mesures n'ayant pas trait directement à l'évènement

Lors du vol retour une partie de la patrouille n'arrive pas à entrer en contact avec le directeur des vols. Les caractéristiques de l'installation radio en sont la cause. Depuis lors, l'installation radio du directeur des vols de la Flottille 11F a été rénovée et les portées observées sont désormais satisfaisantes.