

BEAD-air

Bureau enquêtes accidents défense air

RAPPORT D'ENQUÊTE DE SÉCURITÉ



BEAD-air T-2016-010-A

Date de l'évènement 1^{er} août 2016

Lieu Tessalit (Mali)

Type d'appareil SA 342 M1 - Gazelle Viviane

Immatriculation FMGBZ / n°4151

Organisme Armée de terre – opération Barkhane

Unité GTIA-A « HOMBORI XIII » (Gao)

AVERTISSEMENT

COMPOSITION DU RAPPORT

Les faits, utiles à la compréhension de l'évènement, sont exposés dans le premier chapitre du rapport. L'analyse des causes possibles de l'évènement 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 heure légale malienne.

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-Terre¹

Photos :

- Page 7 : *Google earth* / BEAD-air
- Page 13 : BEAD-air
- Page 14 : ALAT
- Pages 15 et 16 : BEAD-air
- Pages 39 à 56 : DGA EP

Illustrations :

- Page 18 : Safran Helicopter Engines / BEAD-air
- Pages 20 à 23 : BEAD-air
- Pages 24 et 26 : *Google earth* / BEAD-air
- Pages 27 et 37 : BEAD-air
- Haut pages 49 et 50 : Safran Helicopter Engines / BEAD-air

¹ SIRPA-Terre : service d'information et de relations publiques de l'armée de terre.

TABLE DES MATIERES

AVERTISSEMENT	2
CREDIT PHOTOS ET ILLUSTRATIONS	2
TABLE DES MATIERES	3
GLOSSAIRE	4
SYNOPSIS	5
1. RENSEIGNEMENTS DE BASE	6
1.1. Déroulement du vol	6
1.2. Dommages aux personnes	8
1.3. Dommages à l'aéronef	8
1.4. Autres dommages	8
1.5. Renseignements sur le personnel	9
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'impact et sur l'aéronef	13
1.13. Renseignements médicaux et pathologiques	16
1.14. Incendie	17
1.15. Questions relatives à la survie des occupants	17
1.16. Essais et recherches	17
1.17. Renseignements sur les organismes	17
1.18. Renseignements supplémentaires	18
2. ANALYSE	19
2.1. Expertises	19
2.2. Scénario de l'évènement	21
2.3. Recherche des causes de l'accident	25
3. CONCLUSION	31
3.1. Éléments établis utiles à la compréhension de l'évènement	31
3.2. Causes de l'évènement	31
4. RECOMMANDATIONS DE SECURITE	33
4.1. Mesures de prévention ayant trait directement à l'évènement	33
4.2. Mesures de prévention n'ayant pas trait directement à l'évènement	34
ANNEXES	36
ANNEXE 1 LES DIFFERENTS NIVEAUX DE PUISSANCES NECESSAIRES AU VOL DE L'HELICOPTERE	37
ANNEXE 2 EXTRAIT DE L'EXPERTISE MOTEUR	38

GLOSSAIRE

BTA	boîte de transmission arrière
BTP	boîte de transmission principale
CEMPN	centre d'expertise médicale du personnel navigant
DDJ	déviateur de jet
DES	dans l'effet de sol
EALAT	école de l'aviation légère de l'armée de terre
FAS	filtre anti-sable
GTIA-A	groupement tactique interarmes à dominante aéromobile
GTM	groupe turbomoteur
HDF	heures de fonctionnement
ISA	<i>international standard atmosphere</i>
MEB	microscope électronique à balayage
PCB	pilote commandant de bord
PCIAT	poste de commandement interarmées de théâtre
PF	pilote en fonction
PfDR	plateforme désert relais
RAC	rotor anti couple
RHC	régiment d'hélicoptères de combat
SHE	Safran Helicopter Engines
SITALAT	système d'information terminal de l'ALAT

SYNOPSIS

Date de l'évènement : 1^{er} août 2016

Lieu de l'évènement : 3 km au sud-est de la plateforme désert relais (PfDR) de Tessalit (Mali)

Organisme : armée de terre

Commandement organique : aviation légère de l'armée de terre / opération Barkhane

Unité : groupement tactique interarmes à dominante aéromobile (GTIA-A) « HOMBORI XIII »

Aéronef : Gazelle Viviane² - SA 342 M1

Nature du vol : opérationnel

Nombre de personnes à bord : 2

Résumé de l'évènement selon les premiers éléments recueillis

Lundi 1^{er} août 2016 à 17h25, la Gazelle Viviane n°4151 effectue une mission de reconnaissance de points aux alentours de la PfDR de Tessalit.

L'équipage est composé d'un pilote commandant de bord (PCB) en place gauche et d'un pilote en place droite.

Après avoir détecté sur le sol un objet suspect, l'équipage est confronté à très faible hauteur à un problème moteur, applique la procédure d'autorotation basse hauteur, basse vitesse et réalise un poser dur. L'appareil bascule et s'immobilise sur le côté droit.

L'hélicoptère est très fortement endommagé ; l'équipage est légèrement commotionné.

Composition du groupe d'enquête de sécurité

- Un directeur d'enquête de sécurité du bureau enquêtes accidents défense air (BEAD-air).
- Un officier pilote ayant une expertise sur Gazelle.
- Un officier mécanicien ayant une expertise sur Gazelle.

Autres experts consultés

- Direction générale de l'armement essais propulseurs (DGA EP).
- Direction générale de l'armement essais en vol (DGA EV).
- Safran Helicopter Engines (SHE).
- Airbus Helicopters.
- Météo France.

Déclenchement de l'enquête de sécurité

Le BEAD-air a été informé téléphoniquement le 1^{er} août 2016 à 21h30 par le bureau de prévention et de maîtrise des risques aéronautiques du commandement de l'aviation légère de l'armée de terre (COMALAT). Le directeur d'enquête s'est rendu sur place le 2 août 2016. Le groupe d'enquête s'est réuni au sein du GTIA-A « HOMBORI XIII » implanté à Gao (Mali) le matin du 3 août 2016.

² Viseur valorisé par intégration d'une adaptation de nuit avec écartométrie.

1. RENSEIGNEMENTS DE BASE

1.1. Déroulement du vol

1.1.1. Mission

Indicatif mission : VICTOR 33

Type de vol : CAM-T³

Type de mission : vol d'entretien machine et reconnaissance secteur

Dernier point de départ : PfDR de Tessalit

Heure de départ : 17h25

Point d'atterrissage prévu : PfDR de Tessalit

1.1.2. Déroulement

1.1.2.1. Contexte du vol

Le poste avancé de Tessalit est souvent la cible de tirs de roquettes issus des points hauts situés à l'est et au sud-est du site. Les aéronefs sont en régime d'alerte, principalement pour appuyer ou soutenir les troupes au sol au nord Mali. Les machines sur le parking demeurent bâchées jusqu'à l'arrivée des pilotes.

Depuis dix mois, le PCB et le pilote volent en équipage constitué lors des exercices du niveau bataillon et des stages préparatoires au déploiement. Ils sont affectés au GTIA-A de Gao depuis leur arrivée au Mali, le 10 mai 2016. Il s'agit du troisième mandat sur le théâtre pour le commandant de bord.

1.1.2.2. Préparation du vol

Le matin du 1^{er} août 2016, l'équipe qui assure la maintenance des aéronefs informe le commandant de bord qu'il serait utile de faire voler la Gazelle n°4151 afin de recharger sa batterie et d'entretenir la lubrification des ensembles tournants. Le commandant de bord planifie donc un vol qu'il met à profit pour reconnaître les sites probables de tir de roquettes. Il informe le commandement de sa décision et adapte l'heure de décollage afin que la température soit en dessous de 40 °C⁴ et que l'atterrissage s'effectue de jour. Il informe son pilote et convient d'un décollage vers 17h30. L'équipage récupère les éléments météorologiques du théâtre et réalise un briefing standard.

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

À 17h10 la température devient inférieure à 40 °C. L'équipage réalise les vérifications avant vol et avant mise en route. Le pilote effectue la procédure de démarrage et décolle à 17h26. Il réalise un stationnaire dans l'effet de sol (DES), relève un couple de 80 %, puis prend de la vitesse face au vent qui vient du sud. Il reste en basse hauteur et se dirige à l'est du terrain à une vitesse de 120 km/h. Après avoir reconnu les reliefs à l'est, il infléchit sa trajectoire vers le sud. Arrivé à 3 km dans le sud-est de Tessalit, le commandant de bord repère au sol ce qui semble être un tube lance-roquette.

³ CAM-T = circulation aérienne militaire tactique.

⁴ Limite fixée par le PCB.

S'étant assuré que personne ne se trouvait à proximité, il fait signe à son pilote de réaliser un passage stabilisé en première allure au travers du petit plateau où repose le tube. Le pilote réalise un large virage par la gauche en descente et stabilise la Gazelle à 10 m/sol en première allure.

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

Le pilote en fonction (PF) poursuit son virage à gauche afin de préserver la vue du PCB sur l'objet observé.



Reconstitution des dernières minutes de vol

Le voyant couple clignote puis s'allume brièvement fixe, avant d'être remplacé par l'allumage continu du voyant alarme. Trop près du sol, le pilote ne peut baisser le pas général. Sentant la machine s'enfoncer, il la soutient au collectif de manière douce et progressive. L'équipage affirme sentir la machine s'enfoncer légèrement et le nez de la machine partir à gauche, mouvement que le pilote contre instinctivement sans obtenir d'effets alors que son palonnier se rapproche de la butée. Craignant de tomber dans le talweg accidenté qui s'ouvre devant eux, le pilote vire à gauche et se dirige vers une aire plane au travers de l'objet observé. Plusieurs détonations retentissent alors. Elles sont analysées par l'équipage comme le signe d'un pompage moteur. Le pilote, assisté par son commandant de bord, applique la procédure d'autorotation basse hauteur, basse vitesse, qui aboutit à un poser dur au cours duquel l'appareil bascule et s'immobilise sur le côté droit.

1.1.3. Localisation

- Lieu :
 - pays : Mali
 - commune : Tessalit
 - coordonnées géographiques : N 20°14'35", E 001°00'50"
 - altitude : 515 m
- Moment : jour
- Aéroport le plus proche au moment de l'évènement : Tessalit

1.2. Dommages aux personnes

Blessures	Membres d'équipage	Passagers	Autres personnes
Mortelles			
Graves			
Légères	2		
Aucune			

1.3. Dommages à l'aéronef

Aéronef	Disparu	Détruit	Endommagé	Intègre
Gazelle N°4151			X	

1.4. Autres dommages

Néant.

1.5. Renseignements sur le personnel

1.5.1. Commandant de bord

- Age : 37 ans
- Unité d'affectation et fonction : PCB sur le théâtre au GTIA-A de Gao et au sein du 3^{ème} régiment d'hélicoptères de combat (RHC) d'Étain dont il est originaire.
- Formation :
 - qualification : chef de patrouille hélicoptère depuis 2013
 - école de spécialisation : école d'application de l'aviation légère de l'armée de terre (EALAT)
 - année de sortie d'école : 2000
- Heures de vol comme pilote :

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	sur tout type	sur Gazelle	sur tout type	sur Gazelle	sur tout type	sur Gazelle
Total (h)	3 414	3 400	95	93	29	29

- Date du précédent vol comme pilote : 22 juillet 2016 de jour sur Gazelle

1.5.2. Pilote

- Age : 25 ans
- Unité d'affectation et fonction : pilote de combat sur le théâtre au GTIA-A de Gao et au sein du 3^{ème} régiment d'hélicoptères de combat (RHC) d'Étain dont il est originaire.
- Formation :
 - qualification : pilote d'hélicoptère
 - école de spécialisation : EALAT
 - année de sortie d'école : 2014
- Heures de vol comme pilote :

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	sur tout type	sur Gazelle	sur tout type	sur Gazelle	sur tout type	sur Gazelle
Total (h)	620	449	107	105	29	29

- Date du précédent vol comme pilote : 22 juillet 2016 de jour sur Gazelle

1.6. Renseignements sur l'aéronef

- Organisme : armée de terre
- Commandement opérationnel : poste de commandement interarmées de théâtre (PCIAT) opération Barkhane
- Lieu de stationnement : PfDR Tessalit (Mali)
- Unité d'affectation : GTIA-A « HOMBORI XIII »
- Type d'aéronef : Gazelle Viviane – SA 342 M1
 - configuration : viseur Viviane + SITALAT⁵ + poste PR4G⁶ + filtre antisable (FAS) et déviateur de jet (DDJ) + plancher et sièges blindés
 - armement : 1 missile HOT position interne à gauche
- caractéristiques :

	Type - série	Numéro	Heures de vol totales	Heures de vol depuis	Heures de vol depuis
Cellule	SA 342 M1	4151	3153	OHVN ⁷ : 211	VP ⁸ : 677
Moteur	Astazou XIV M	8339/7281	469	VP 800 h : 88	OHV ⁹ 50 : 43
Régulateur	-	109B	1903	VP 800 h : 88	-

1.6.1. Maintenance

1.6.1.1. Généralités

La maintenance Gazelle s'articule autour des entretiens de la cellule et du moteur. La sévérité des conditions dans lesquelles est employé cet hélicoptère est prise en compte au travers du programme des opérations d'entretien lié aux zones particulières (OEZP). Ce programme prévoit des vérifications toutes les 25 heures de vol.

1.6.1.2. Historique de l'entretien du groupe turbomoteur (GTM)

- le 28 janvier 2015 : passage au banc test chez Safran Helicopter Engines (SHE) après réparation et VP 800 h (dossier de travail de SHE XSE-0240100126) à 381 heures de fonctionnement (HDF) soit 2 879 HDF depuis neuf ;
- le 26 avril 2016 : pose du GTM sur la Gazelle N° 4151 à Gao (Mali) à 381 HDF ;
- le 22 mai 2016 : échange de la vanne de décharge à 405 HDF ;
- le 20 juin 2016 : vérifications vieillissement moteur conforme à 427 HDF (OHV50).

⁵ SITALAT : système d'information terminal de l'aviation légère de l'armée de terre.

⁶ PR4G : poste radio de 4^{ème} génération.

⁷ OHVN : opération d'entretien hors visite annuelle.

⁸ VP : visite périodique.

⁹ OHV : opération d'entretien hors visite 50 heures.

1.6.1.3. Historique de l'entretien du régulateur

- En janvier 2015 : envoi en réparation chez SHE pour limite calendaire (VRF 10 ans).
- Le 28 janvier 2015 : pose du régulateur sur le GTM N°8339/7281 à 1815 HDF. Le filtre régulateur a été changé lors de la VP 800 H du moteur (cette opération fait partie des échanges systématiques prévus lors de la VP 800 H).

1.6.1.4. Synthèse des constatations concernant la maintenance

L'examen de la documentation confirme que l'entretien de l'aéronef est conforme au programme d'entretien en vigueur.

1.6.2. Performances

Le domaine en température de la Gazelle Viviane ne doit pas excéder 50 °C et/ou ISA +35° C.

Dans les conditions de l'évènement, les performances de la Gazelle Viviane sont :

- plafond stationnaire DES (avec 4 missiles + DDJ)¹⁰ : 1 450 m ;
- plafond stationnaire HES¹¹ (avec 4 missiles + DDJ) : 900 m.

1.6.3. Masse et centrage

- Masse maximale autorisée au décollage : 2 100 kg.
- Masse estimée à la mise en route : 2 100 kg.
- Masse estimée au moment du posé dur : 2 075 kg.
- Le centrage longitudinal est resté dans le domaine prévu par le constructeur.

1.6.4. Carburant

- Type de carburant utilisé : F-35.
- Quantité de carburant au décollage : 400 L.
- Quantité de carburant estimée restante au moment de l'évènement : 370 L.

1.6.5. Autres fluides

- Huile moteur : O-150.
- Huile des ensembles tournants type boîte de transmission principale (BTP) ou boîte de transmission arrière (BTA) : O-155.
- Liquide hydraulique : H-515/9.

¹⁰ Abaques définis pour une configuration au plus proche de celle employée lors de l'évènement.

¹¹ Hors effet de sol.

1.7. Conditions météorologiques

1.7.1. Prévisions

Instabilité à l'ouest de la PfDR avec une visibilité à 5 km. Vent prévu du nord-ouest de 9 à 18 km/h, température 35 °C.

Aucun phénomène dangereux n'est signalé.

1.7.2. Observations

L'équipage impliqué et ceux présents sur le site lors de l'évènement relèvent une visibilité à 4 km, un vent estimé de secteur sud de 10 à 20 km/h avec des rafales à 30 km/h et une température de 39 °C.

1.8. Aides à la navigation

Les instruments d'aide à la navigation disponibles à bord de l'appareil sont opérationnels.

L'équipage dispose :

- d'un radio compas ;
- du navigateur autonome directionnel indicateur de route (NADIR) ;
- d'une carte géo référencée issue du SITALAT ;
- du compas magnétique ;
- du compas gyromagnétique ;
- d'un chronomètre ;
- d'un transpondeur IFF¹².

1.9. Télécommunications

Les moyens de communication de l'aéronef sont tous utilisables. L'équipage est en contact permanent avec la PfDR de Tessalit.

1.10. Renseignements sur l'aérodrome

Les hélicoptères décollent directement du camp situé à une altitude de 1 621 ft soit 494 m.

1.11. Enregistreurs de bord

La Gazelle n'est pas équipée d'enregistreur de bord. Elle dispose cependant du système SITALAT¹³ dont les enregistrements ont pu être exploités.

¹² *Identification friend or foe.*

¹³ Le système d'information terminal de l'ALAT fourni entre autres des enregistrements vidéo, audio et GPS.

1.12. Renseignements sur l'impact et sur l'aéronef

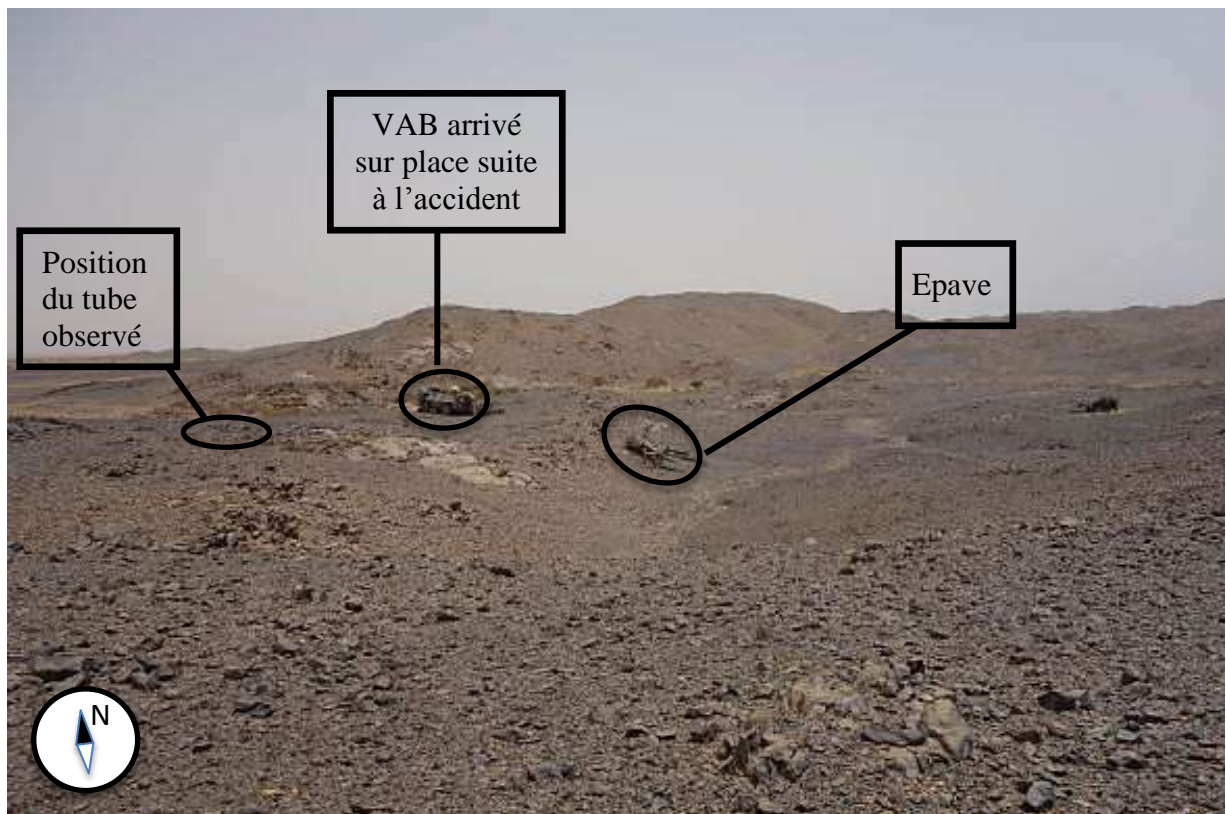
1.12.1. Examen de la zone

La zone de l'accident est désertique et légèrement vallonnée. Dans les reliefs, la roche est de couleur noire saupoudrée d'une très fine couche de poussière ocre. Les éclats de pierre sont tranchants.



Vue panoramique de la zone centrée au cap 330°

La zone de l'impact se trouve à une altitude de 20 m supérieure à celle de la plaine où se situe la PfDR de Tessalit. L'hélicoptère repose sur le flanc gauche d'un talweg débutant par un cirque.



Vue générale du lieu d'impact prise depuis l'axe d'arrivée

¹⁴ VAB : véhicule de l'avant blindé.

L'hélicoptère est entier. Seuls quelques éléments de mousse issus des pales jonchent le sol.



Vue générale de l'épave

Les traces laissées par les pales au sol et l'état général de ces dernières témoignent d'une faible vitesse de rotation du rotor lors du basculement.



Trace d'impact des deux patins

Les traces relevées au sol indiquent un poser non glissé de la machine.

1.12.2. Examen de l'épave

L'hélicoptère est couché sur le flanc droit avec les principaux dommages suivants :

- tube polyvalent désolidarisé de la cellule ressortant côté gauche ;
- patin gauche affaissé et replié sous la cellule, rompu dans sa partie arrière ;
- patin droit disloqué et désolidarisé de la cellule ;
- sabot du fenestron légèrement endommagé ;
- poutre de queue présentant une pliure ;
- dérive droite endommagée ;
- dessous de la cellule griffé modérément ;
- bielles de commande de pas cyclique rompues ;
- pales en tulipe :
 - pale jaune pliée à proximité de sa zone d'attache ;
 - pale bleue pliée à 1.6 m de sa zone d'attache ;
 - bord de fuite pale rouge endommagé à son extrémité.



Vue arrière de l'épave orientée au cap 290°



Sabot du fenestron



Pliure jonction poutre de queue - cellule



BTA et RAC

Entrée d'air du FASRadiosonde affichant 12 mTuyère du DDJ

Les traces et dégâts constatés montrent que la perte de l'aéronef n'est pas due à un fait de guerre.

Aucun débris métallique ou calciné n'a été observé dans la tuyère du DDJ. La surface d'entrée d'air du FAS n'était obstruée par aucun élément de grande taille. L'impact avec le sol a été suffisant pour endommager sévèrement le train d'atterrissage, ouvrir les portes de l'aéronef et fragiliser la poutre de queue. La caméra Viviane ne s'est pas désolidarisée. La balise de détresse ne s'est pas activée.

1.13. Renseignements médicaux et pathologiques

Les aptitudes des deux personnels navigants obéissent aux normes médicales définies dans l'instruction N° 3300/DEF/EMAT/OAT/BEMP du 8 octobre 2014.

1.13.1. Commandant de bord

- Dernier examen médical :
 - type : expertise en centre d'expertise médicale du personnel navigant (CEMPN)
 - date : 3 mai 2016
 - résultat : apte sans restriction
 - validité : 2 ans
- Examens biologiques : effectués
- Blessures : légères

1.13.2. Pilote

- Dernier examen médical :
 - type : expertise en CEMPN
 - date : 2 mai 2016
 - résultat : apte sans restriction
 - validité : 2 ans
- Examens biologiques : effectués
- Blessures : légères

1.14. Incendie

Néant.

1.15. Questions relatives à la survie des occupants

1.15.1. Abandon de bord

Dès l'immobilisation de la Gazelle sur son côté droit, le pilote tire le coupe-feu, coupe la pompe de gavage avant de mettre l'interrupteur démarreur sur arrêt. Les deux pilotes évacuent sans difficulté l'aéronef par la porte gauche. Dès la sortie, le commandant de bord utilise son téléphone pour prévenir les secours. Ensuite, l'équipage rassemble ses affaires et s'organise pour défendre la position.

1.15.2. Organisation des secours

Quinze minutes après l'appel téléphonique, une autre Gazelle armée arrive et assure la protection du site. Près d'une heure après l'évènement un Puma SA 330 réalise l'extraction et ramène l'équipage sur la PfDR de Tessalit. Les deux pilotes sont dirigés vers le rôle 1¹⁵ où ils subissent une batterie d'exams médicaux.

1.16. Essais et recherches

Des expertises ont été réalisées sur les points suivants :

- moteur (SHE/DGA EP) ;
- régulateur (SHE/DGA EP) ;
- enregistrements SITALAT (RESEDA) ;
- trajectoire 3D (RESEDA) ;
- analyse spectrale des enregistrements (RESEDA, BEAD-air) ;
- chaîne d'acquisition et d'affichage du couple (Zodiac Aerospace/DGA EP) ;
- chaîne d'acquisition et d'affichage de la température, turbine T4 (DGA EP) ;
- météorologique (Météo-France) ;
- trajectoire et paramètres de vol (DGA EV, Airbus Helicopters, BEAD-air).

1.17. Renseignements sur les organismes

Le GTIA-A de Gao est placé sous les ordres du PCIAT de Ndjamena (Tchad). Le détachement temporaire de la PfDR de Tessalit appartient au GTIA-A.

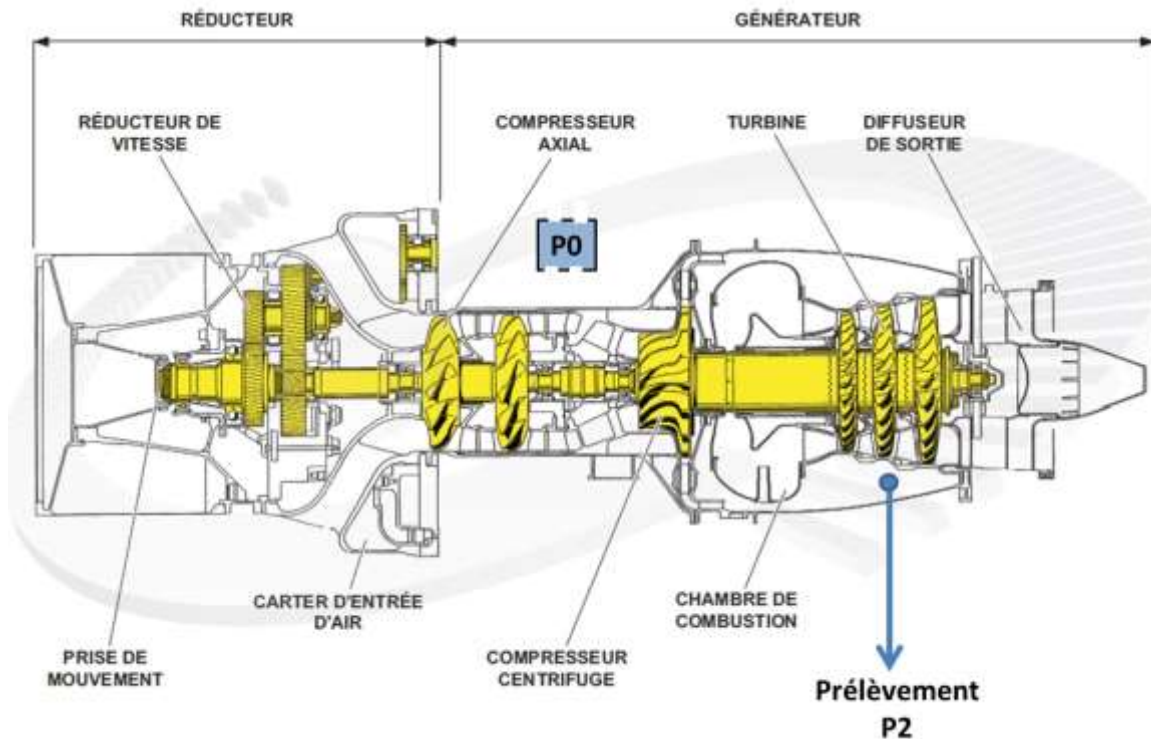
Les ordres de vols du détachement sont rédigés en application des OMA¹⁶ produits par le GTIA-A dans le cadre de la mission qui lui a été confiée.

¹⁵ Rôle 1 : poste médical avancé.

¹⁶ OMA : ordre de mission aérienne.

1.18. Renseignements supplémentaires

L'ASTAZOU XIV M est un turbomoteur de type « turbine liée » équipant les Gazelle Viviane dites SA 342 M. Le générateur de gaz tourne à 43 000 tr/min et son arbre de sortie à 6334 tr/min. Ce turbomoteur est capable de développer 640 kW, il est bridé à 440 kW en utilisation dans les forces.



Ecorché de l'ASTAZOU XIV M

Le système de régulation est de type tachymétrique avec une limitation de la charge thermique réalisée à partir de la surveillance du Delta $P2/P0$ ¹⁷ où P2 est prélevé dans la veine d'air entourant la chambre de combustion (cf. illustration ci-dessus, détails page 49 en annexe 2).

¹⁷ P0 : pression statique : pression du fluide à l'arrêt.

2. ANALYSE

L'analyse qui suit est articulée en trois parties. La première présente le résultat des différentes expertises, la deuxième décrit le scénario de l'évènement et la troisième recherche les causes de l'accident.

2.1. Expertises

2.1.1. Synthèse des expertises techniques concernant la machine

2.1.1.1. La veine d'air

Cet hélicoptère employé en zone poussiéreuse est équipé d'un filtre anti sable (FAS) en mesure de filtrer des particules aussi fines que la poussière. Lorsqu'il n'y a pas de poussière ou d'autre aérosol soulevé par le vent ou par le souffle du rotor (comme dans la phase de vol précédent l'évènement), il n'y a pas d'utilité à le mettre sur marche. Il a été constaté sur arrêt dans l'épave.

Les limitations sur le domaine de vol dues au montage du FAS sur l'hélicoptère sont connues de l'équipage. Elles n'ont joué aucun rôle dans cet évènement.

Lors des inspections externes et du démontage du filtre, seul un très faible dépôt de poussières particulièrement fines a pu être observé en aval du système.

Aucun élément suspect n'a été relevé sur cet organe.

L'alimentation en air du moteur est nominale lors de l'évènement.

2.1.1.2. Carburant et fluides

Tous les contrôles effectués sur les divers échantillons de fluides prélevés et sur les bouchons magnétiques sont conformes à l'attendu. En dépit de l'accident, un très faible niveau de particules a été retrouvé dans le lubrifiant de la BTP.

Les échantillons de carburant et lubrifiants analysés présentent des qualités conformes à l'attendu.

2.1.1.3. Le moteur et son régulateur

L'état général du moteur est satisfaisant à l'exception de la fusion partielle des deux premiers étages de la turbine, provoquée par une surchauffe de quelques secondes.

Les essais puis le démontage du régulateur ont démontré son bon fonctionnement.

Lors du démontage du moteur et de ses périphériques, il a été observé une grande quantité de fines poussières comblant l'enceinte et le tube d'alimentation P2 du limiteur de débit carburant décrit dans le paragraphe 1.18. Si elle avait été plus compacte, cette accumulation aurait pu être à l'origine d'un manque de puissance du moteur, mais en aucun cas d'un débit carburant trop élevé induisant la surchauffe.

Cette accumulation de poussière n'est donc pas à l'origine de la surchauffe constatée.

Un extrait du rapport d'expertise est consultable en annexe 2.

Les expertises montrent que le moteur était correctement alimenté en air et en carburant, que son régulateur était fonctionnel. La surchauffe observée a donc été provoquée par un élément extérieur.

Le régulateur est fonctionnel. Le moteur a subi une surchauffe due à des causes externes.

2.1.1.4. Ensembles tournants contribuant à la sustentation

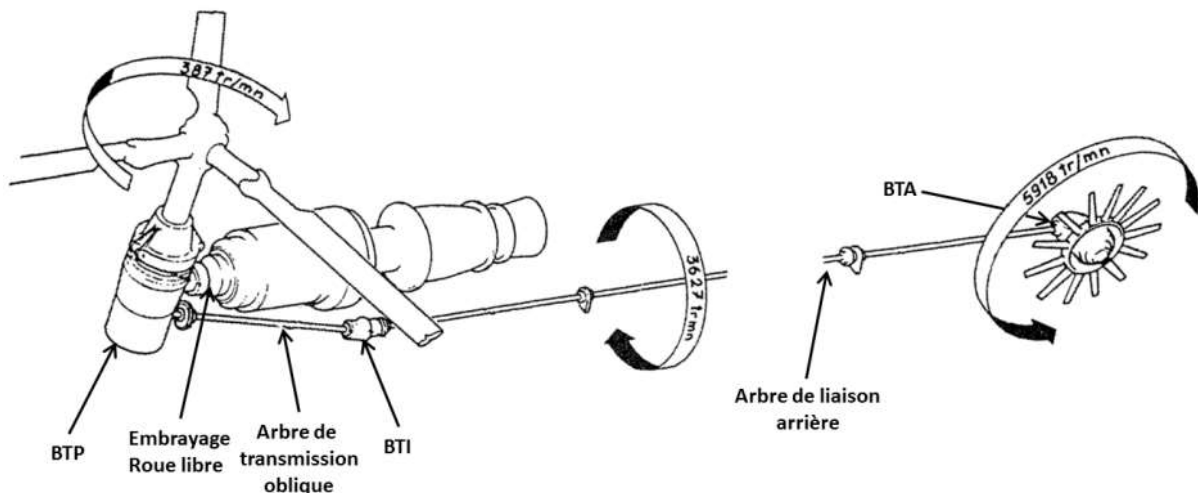


Schéma de principe de la chaîne de transmission de puissance de la Gazelle

L'examen de la documentation et les constatations réalisées sur le lieu de l'évènement montrent que les pales du rotor principal sont en bon état avant l'accident. Les pales du rotor anti couple sont intactes. Aucun phénomène d'érosion n'a été mis en évidence sur ces dernières. L'ensemble embrayage et roue libre est en bon état. La BTA, la boîte de transmission intermédiaire et la BTP ne présentent pas de dommage. Les différents flectors¹⁸ et les paliers de la transmission horizontale ne présentent pas de signe de détérioration.

La transmission de puissance était assurée.

2.1.1.5. Chaîne d'acquisition du couple moteur

L'expertise de la chaîne d'acquisition et d'affichage du couple n'a révélé aucune anomalie. Seule la présence de quelques poussières ne gênant pas le fonctionnement a été observée.

Aucune défaillance n'a été constatée sur la chaîne d'acquisition et d'affichage du couple.

¹⁸ Flector : pièce en matière élastique assurant la transmission d'un mouvement (ici la rotation).

2.1.1.6. Chaîne d'acquisition de la température turbine

L'expertise de la chaîne d'acquisition de la température T4 n'a révélé aucune anomalie.

L'affichage de la température moteur était fonctionnel au moment de l'évènement.

2.1.2. Extraction des données de vol du système SITALAT

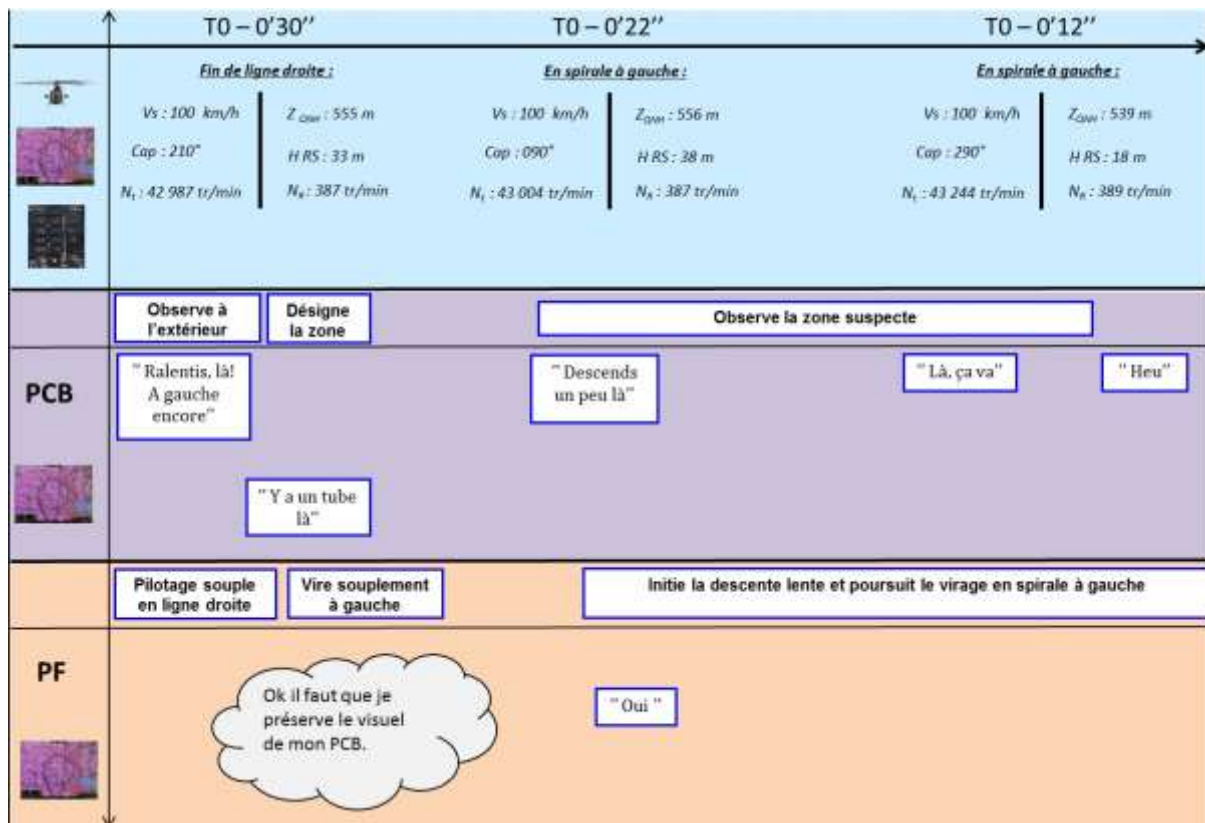
Il a été possible de reconstituer en trois dimensions la totalité du vol grâce à l'exploitation des données contenues dans le SITALAT. L'analyse spectrale des enregistrements audio a permis d'élaborer la vitesse de rotation du moteur.

2.2. Scénario de l'évènement

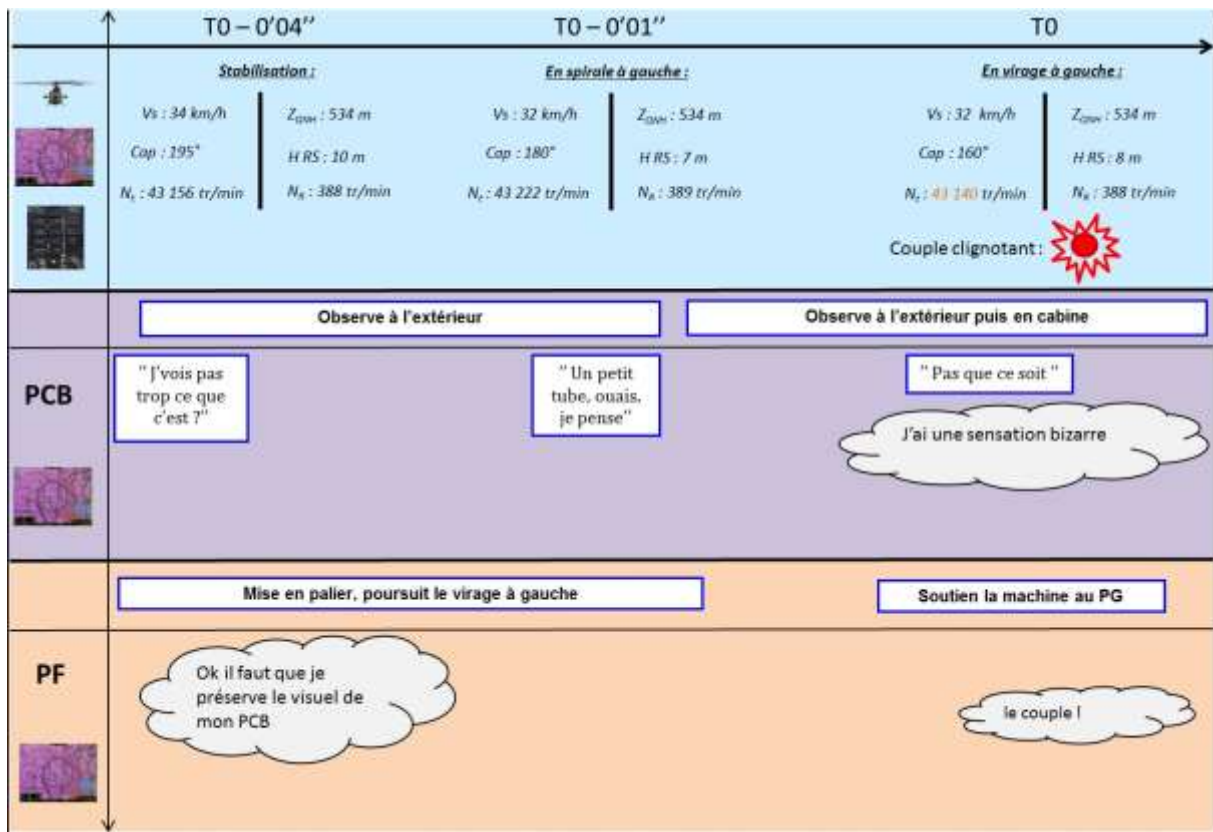
Un STEP (*sequential timed events plotting procedure*) correspondant aux 30 dernières secondes du vol est établi à partir des données du SITALAT croisées avec les témoignages de l'équipage et les constatations réalisées sur le lieu de l'évènement.

Les rectangles bleus matérialisent les actions, les paroles sont entre guillemets et les nuages matérialisent ce que l'équipage rapporte avoir pensé ou ressenti. La référence de temps (T0) correspond au moment où le régime moteur commence à chuter sous le régime de régulation de 43 000 tr/min. Dans le bandeau supérieur, les abréviations Vs désignent la vitesse sol, Z_{QNH} indique l'altitude de l'hélicoptère, HRS sa hauteur radiosonde, N_t la vitesse de rotation du moteur et N_r indique la vitesse de rotation du rotor principal.

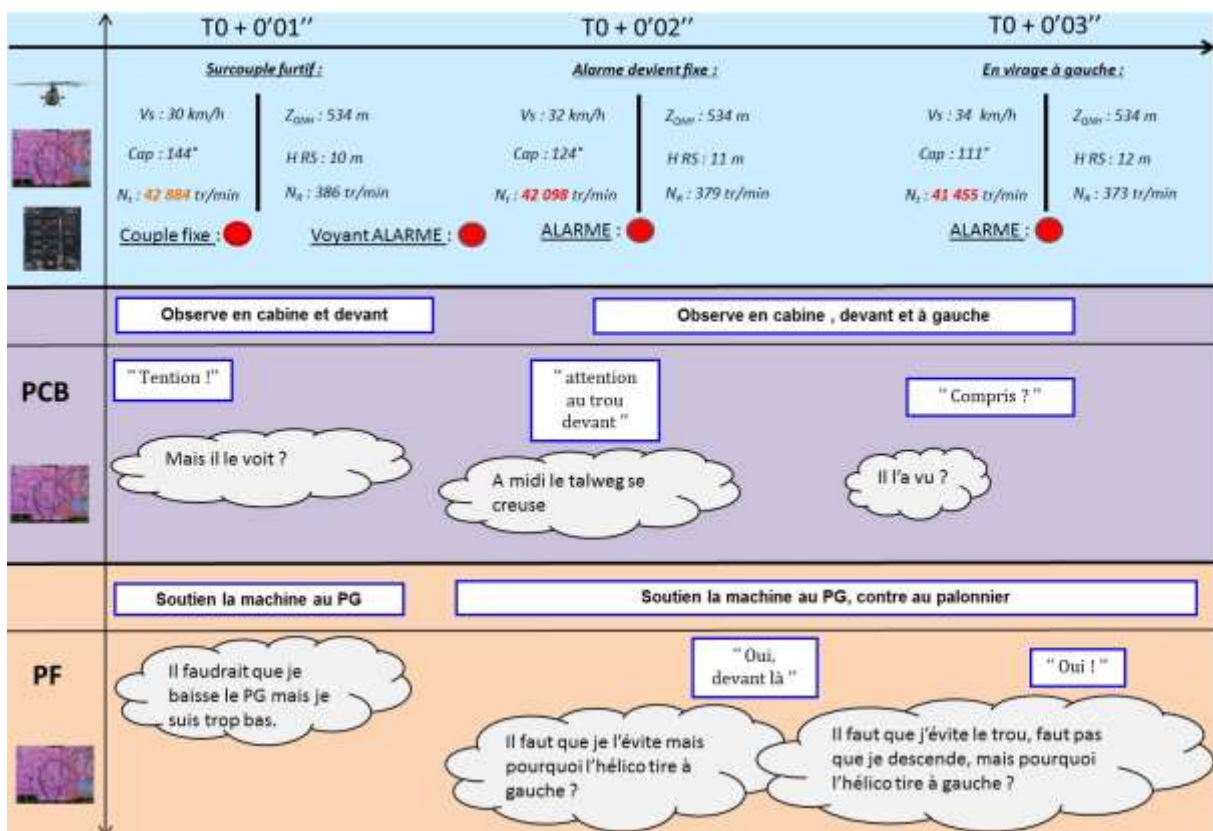
Le vent rapporté par l'équipage souffle du sud pour 30 à 40 km/h.



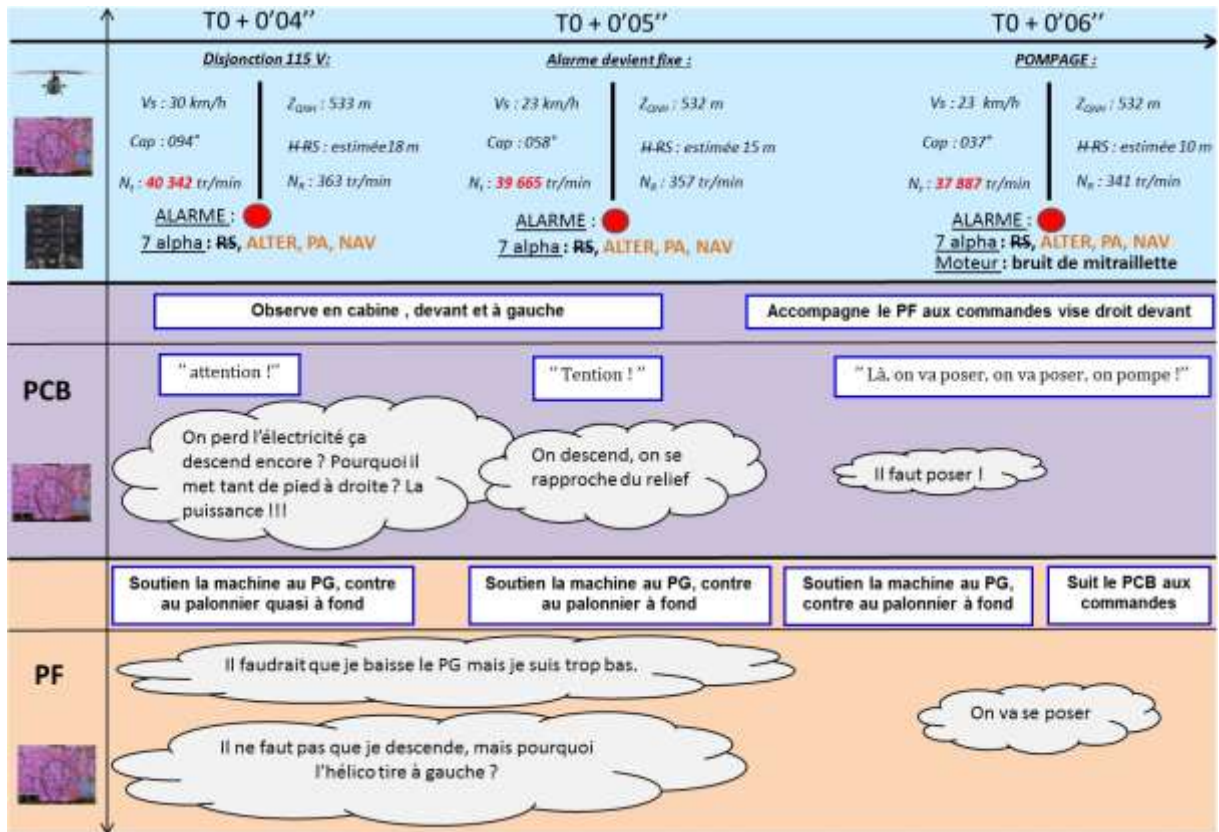
STEP séquence 1/5



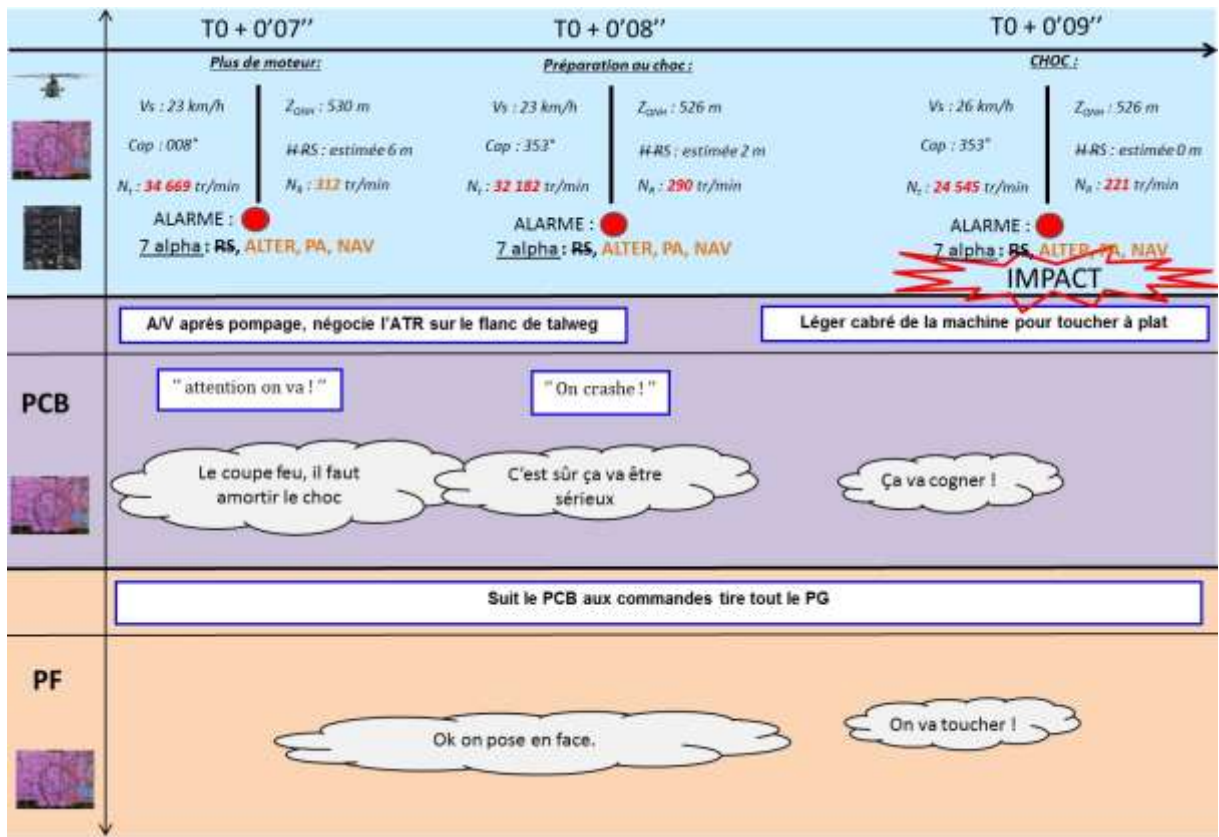
STEP séquence 2/5



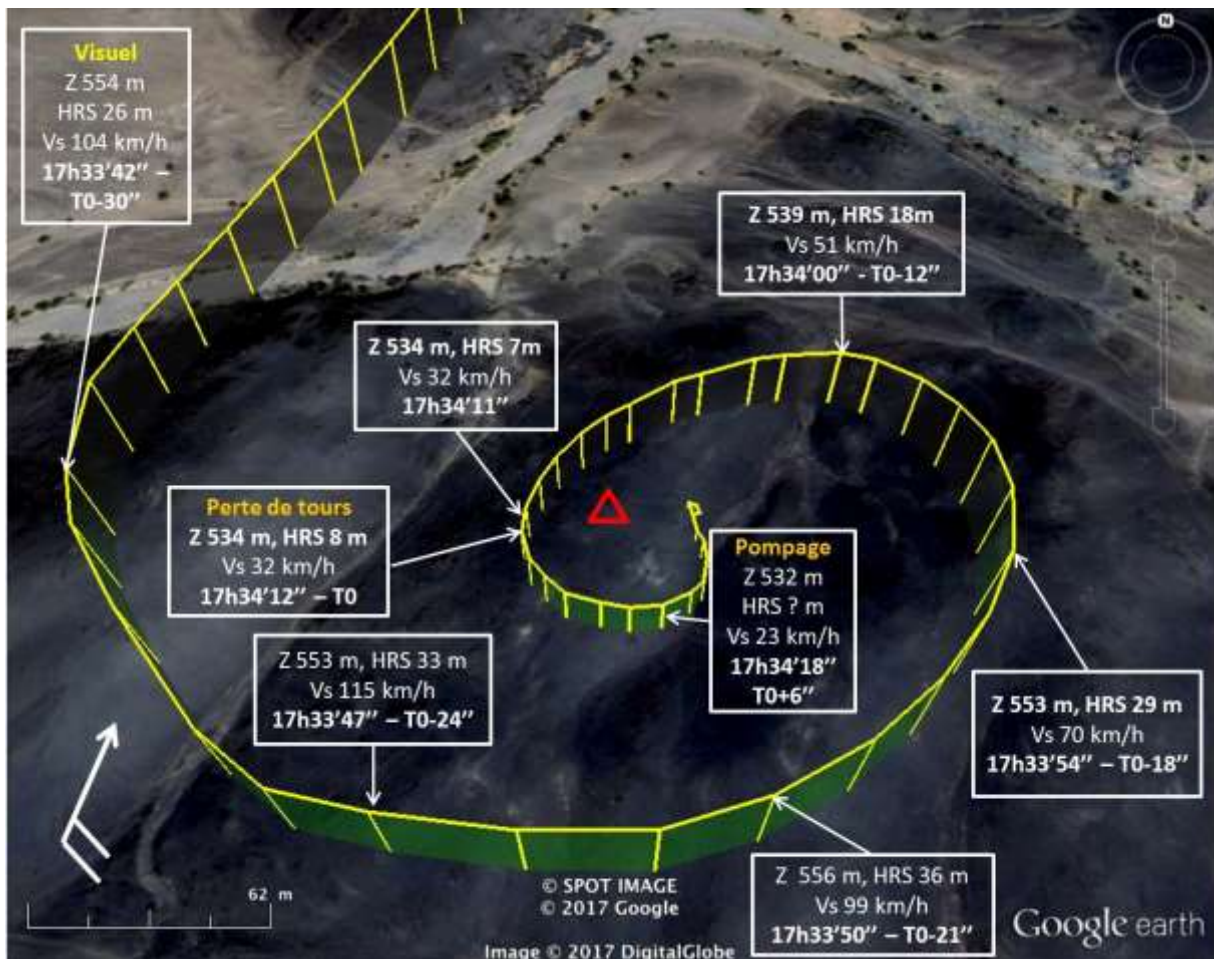
STEP séquence 3/5



STEP séquence 4/5



STEP séquence 5/5



Trajectoire des 30 dernières secondes de vol

2.2.1. Scénario d'endommagement de l'appareil

Les endommagements constatés sont consécutifs à l'impact à l'exception de ceux relevés sur la turbine. Alors que l'appareil est en vol, à T0 le régime moteur chute. La régulation ne peut contrer ce dévissage. Elle commande en réaction la pleine ouverture de l'arrivée carburant, ce qui a conduit à une surchauffe importante au niveau de la turbine. A T0+4'' le régime passant sous 41 000 tr/mn, l'alternateur disjoncte et la radio sonde se fige à 12 m. A T0+6'' de fortes détonations retentissent. Le PCB applique la procédure pompage¹⁹ et le moteur s'éteint. Suite à l'action conjointe du PCB et du PF sur le pas collectif, le régime rotor chute rapidement, entraînant une baisse importante de la portance. L'accroissement de la vitesse verticale liée à la chute de l'appareil combinée à l'augmentation d'incidence des pales et à la chute des tours rotor conduit à une élévation excessive des pales (« mise en conicité »). Cette mise en conicité entraîne l'effacement des butées hautes de battement des pales du mât rotor principal.

Lors du contact avec le sol, le patin gauche se fracture et se replie sous la cellule. Le patin droit est complètement disloqué.

Les endommagements sur la chaîne de transmission de puissance montrent que le régime et le niveau de puissance sont relativement faibles lors de l'impact. Une fois l'hélicoptère couché

¹⁹ Procédure pompage : coupe-feu fermé, manette de débit sur réduit et arrêt de la pompe de gavage.

sur le flanc droit, la fin de rotation des pales les met en « tulipe », ce qui arrache la plaque de levage du mât rotor principal.

La vitesse horizontale très faible et l'attitude de l'appareil à l'impact n'ont pas généré une décélération longitudinale suffisante pour provoquer le déclenchement de la balise de détresse²⁰.

L'analyse des endommagements confirme un poser dur non glissé avec dérive faible à gauche. Le moteur a cessé de fonctionner en vol.

2.3. Recherche des causes de l'accident

Les causes de l'évènement sont recherchées dans le domaine technique, le domaine environnemental et celui des facteurs organisationnels et humains (FOH).

2.3.1. Domaine technique

Les expertises techniques n'ont pas révélé de dysfonctionnement de l'aéronef.

Aucune défaillance technique n'est à l'origine de cet évènement.

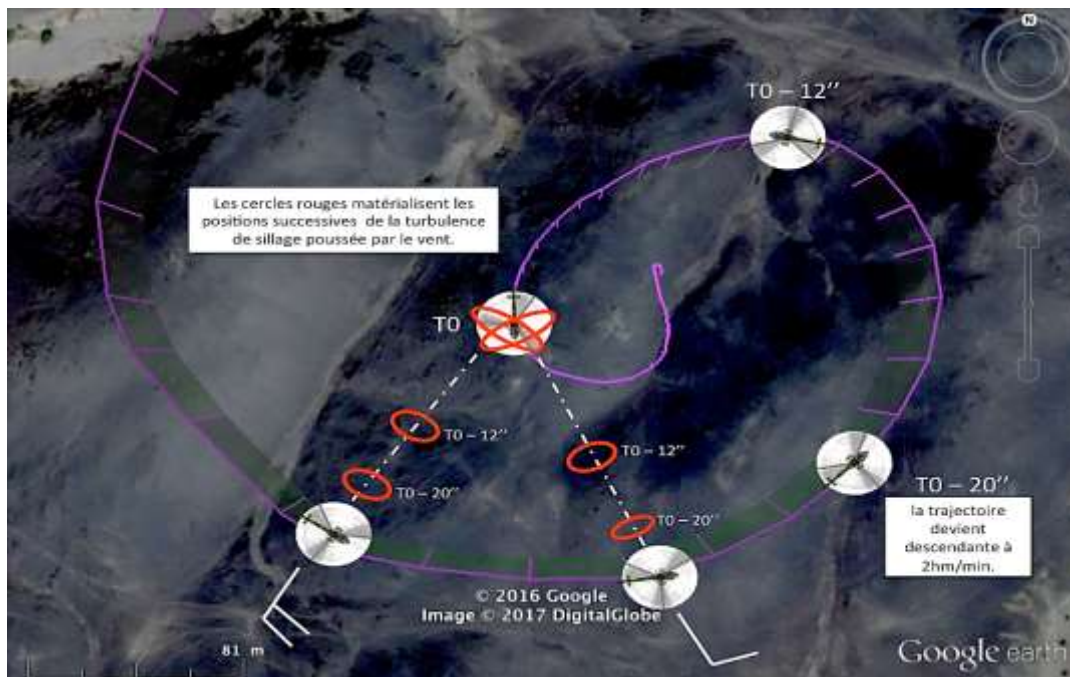
2.3.2. Domaine environnemental

2.3.2.1. Turbulences de sillage

Lors de l'approche finale vers l'objet à identifier, le PF confie avoir conscience que le vent souffle du sud, mais sa force jusque-là ne l'a pas perturbé. Comme le présente la figure ci-contre, la trajectoire est en spirale à gauche.

Sans vent, une turbulence de sillage se déplace vers le sol parallèlement à la trajectoire de l'hélicoptère à une vitesse proche de 2 m/s. Lorsqu'elle arrive à proximité du sol, elle donne naissance à un tourbillon secondaire plus puissant au niveau du sol qui va finir par disparaître. Il est donc pertinent de vérifier si l'hélicoptère a pu repasser dans son sillage. En effet, les calculs montrent que si le vent souffle dans une direction comprise entre 160° et 225° pour une vitesse moyenne de 15 à 20 km/h (observations météorologiques), l'hélicoptère repasse dans son sillage entre T0-2'' et T0.

²⁰Critères d'activation de la balise de détresse : facteur de charge > 3 G ou vitesse d'impact > 2,44 m/s.



Trajectoire finale

Cet hélicoptère est équipé d'un déviateur de jet dont le but est de renvoyer les gaz chauds d'éjection au travers du disque des pales afin de les diluer. Cette particularité fait que ses turbulences de sillages sont chargées d'un air légèrement pauvre en oxygène et mélangé à des produits de combustion, plus chaud que l'air environnant.

Compte tenu du vent et de la trajectoire empruntée, l'hélicoptère est repassé dans ses turbulences de sillage.

2.3.2.2. Masse d'air

Au moment où l'hélicoptère quitte la plate-forme de Tessalit située à 500 m d'altitude, la température relevée par l'équipage est de 39 °C. Rapportée à l'atmosphère standard, cette température correspond à un ISA +27 °C. Il est 17h30, l'hélicoptère décolle à sa masse maximale. L'aéronef est dans son domaine de vol.

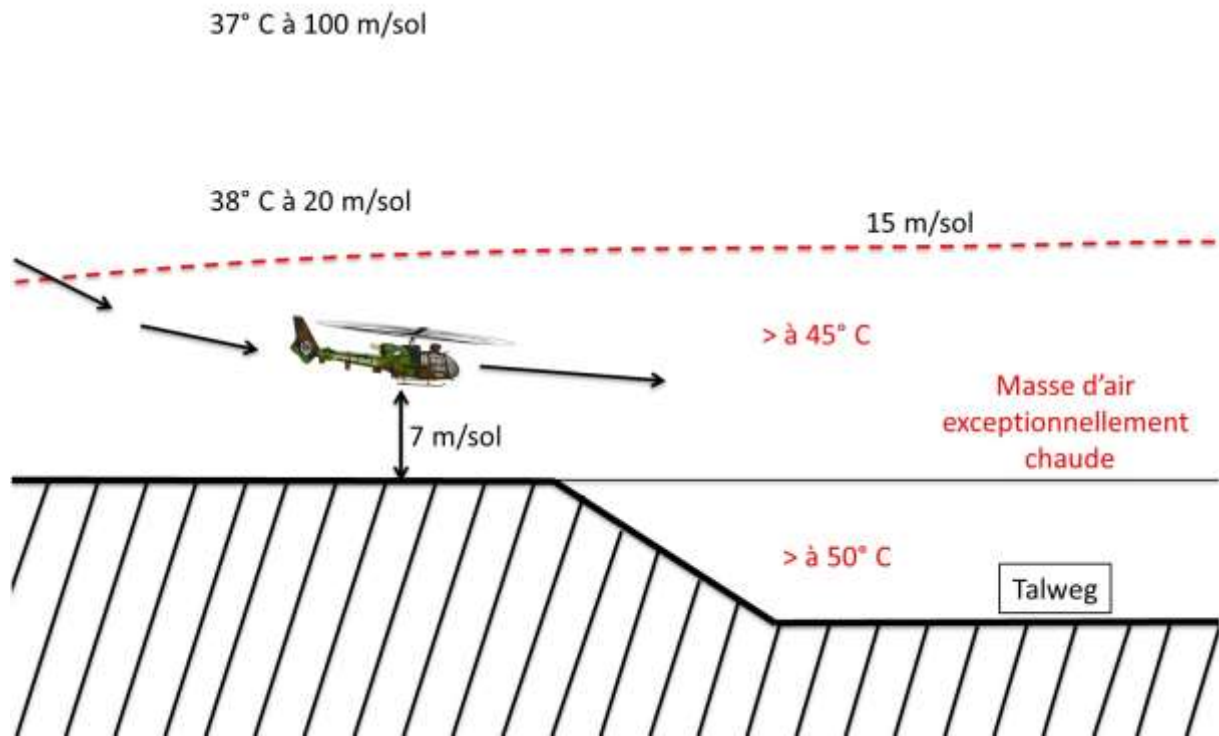
Lors des premières minutes de vol, l'hélicoptère évolue à une trentaine de mètres du sol au-dessus du sable ocre et clair du désert du Sahara. Dans la deuxième partie du vol jusqu'à l'impact, il survole les reliefs érodés des collines noires appartenant au massif de l'Adrar des Ifoghas. Ces reliefs sont constitués de roches magmatiques très sombres.

Ces deux surfaces possèdent des caractéristiques réfléchives et d'accumulation thermique très différentes. Le sable sec et clair reflète trois fois plus d'énergie solaire que la roche sombre qui en absorbe une grande partie et est capable chaque jour de la restituer tout au long de la nuit suivante.

A partir de T0-4'' la trajectoire de l'hélicoptère passe sous 10 m/sol pour arriver à 7 m/sol à T0.

Dans cette tranche de hauteur au-dessus des roches surchauffées, l'hélicoptère se déplace dans un air extrêmement chaud.

Dans des déserts comparables où se trouvent des massifs rocheux sombres de nature magmatique (désert du Lut en Iran), la NASA a observé des températures de surfaces allant jusqu'à 70 °C.



Représentation schématique du phénomène rencontré

Au-dessus d'un sol clair et à l'altitude de vol empruntée (550 m), l'hélicoptère aurait dû évoluer théoriquement dans une masse d'air à la température de 38 °C. En réalité à une dizaine de mètres du sol au-dessus de la roche noire et du talweg, la température rencontrée par l'hélicoptère pourrait être de l'ordre de 45 °C à 50 °C, ce qui, rapporté à l'atmosphère standard, donne un ISA +33 °C à ISA +38 °C.

Or le constructeur ne garantit le fonctionnement nominal du moteur que jusqu'à l'ISA +35° C.

Dans les conditions aérologiques extrêmes régnant à cette hauteur et à cet endroit, l'hélicoptère évolue en marge voire au-delà du domaine d'emploi du moteur.

2.3.2.3. Synthèse pour le domaine environnemental

Les conditions aérologiques extrêmes régnant à cet endroit, combinées au passage de l'hélicoptère dans ses turbulences de sillage, expliquent la perte progressive de tours du moteur.

2.3.3. Domaine des facteurs organisationnels et humains

2.3.3.1. Nature de la mission

Le matin de l'évènement, le vol est programmé par le PCB après une demande de l'équipe technique qui entretient l'aéronef. L'objectif est de recharger la batterie et d'entretenir la lubrification des ensembles tournants. La durée du vol prévue est d'une trentaine de minutes.

Comme il est d'usage sur la plateforme, le PCB a décidé de mettre à profit ce vol afin de mener une reconnaissance des sites probables de tirs de roquettes sur les hauteurs à l'est et au sud-est du camp.

Les températures extrêmes (désert et massif de roches sombres) et la masse de l'aéronef proche de la masse maximale sont des contraintes fortes susceptibles de rendre particulièrement délicat le pilotage de l'hélicoptère. Si l'équipage connaît les contraintes thermiques dues au désert, il n'a cependant pas conscience des conséquences du survol d'un sol noir.

Les conditions climatiques, la nature du sol et le relief rendent la mission particulièrement délicate sans que l'équipage ait conscience de toutes ces contraintes.

2.3.3.2. Synergie au sein de l'équipage

Le pilote a 620 heures de vol, dont 450 sur Gazelle. Il est considéré comme « jeune pilote » (moins de 1 000 heures de vol).

Le PCB a 3 414 heures de vol, dont 3 400 sur Gazelle. Il est considéré comme « pilote expérimenté » (plus de 2 000 heures de vol).

Les deux hommes volent en équipage constitué depuis plusieurs mois. Cependant, il y a une différence significative d'expérience entre le pilote et le PCB. Dans les enregistrements audio du vol, les dialogues entre les membres d'équipage ont révélé une forte dissymétrie des échanges (cockpit de type autocratique).

Le pilote aux commandes lors de la mission réalise les actions demandées par le PCB sans toujours analyser la situation et sans s'interroger sur les manœuvres effectuées.

Lors des premiers instants du vol, le PF demande la hauteur à adopter. Le PCB lui répond de voler à une hauteur basse.

Lors de la manœuvre pour identifier l'objet, le PF, concentré sur les attentes du PCB, ne prend pas conscience qu'il réalise une spirale continue sur la gauche, réduisant progressivement sa vitesse et sa hauteur jusqu'à 32 km/h et 8 m/sol.

La grande dissymétrie d'expérience combinée à une communication pauvre a entraîné un manque de synergie, ce qui est un facteur contributif de l'évènement.

2.3.3.3. Méthode de reconnaissance

Lors de la mission, la détection d'un petit objet blanc sur une crête dans le désert amène l'équipage à adopter une procédure dite d'observation rapprochée ($d < 1\,500$ m). En effet, la configuration des lieux ne leur permet pas une observation efficace à distance de sécurité.

Les procédures applicables présentées dans la notice d'emploi²¹ prennent en compte le risque lié à la proximité de l'ennemi et de la portée de ses armes. Dans tous les cas, le passage proche du point à observer s'effectue une seule et unique fois.

²¹ Notice d'emploi de la patrouille HA/V ALAT 602/OPS approuvée le 5 mars 2009.

Aucune procédure de reconnaissance ne prévoit de réaliser une spirale logarithmique en rapprochement de l'objet.

Cette trajectoire, qui a pour conséquence de réduire de façon continue la distance entre l'aéronef et le point observé, est particulièrement périlleuse si elle n'est pas arrêtée à temps.

La méthode utilisée par le PF et le PCB pour l'observation rapprochée d'un objet suspect est dangereuse à exécuter.

2.3.3.4. Analyse des marges de manœuvre

Lors de l'évènement, plusieurs paramètres sont proches des limites de fonctionnement.

L'appareil décolle à sa masse maximale de 2 100 kg.

La température limite de fonctionnement de la Gazelle est de 50 °C (ou ISA +35 °C).

La mission est retardée en fin de journée afin que la température extérieure soit inférieure à 40 °C. Le décollage intervient donc à 17h25. La décision de ne pas attendre davantage la baisse des températures est motivée par la volonté du commandant de bord de ne pas voler de nuit. Or, la nuit est prévue aux alentours de 18h30 et le risque de prolonger la mission est réel.

De plus, au-dessus de 6 m et en dessous de 90 m de hauteur de vol, l'adoption d'une vitesse de 60 km/h conduit l'appareil à évoluer dans la zone d'insécurité du domaine hauteur/vitesse qui ne laisse aucune marge de manœuvre en cas d'incident.

L'équipage évolue aux limites de fonctionnement de la machine (masse élevée, vitesse et hauteur faibles et température extrême). Dans ces conditions, en cas de défaillance du moteur, la récupération est très délicate.

2.3.3.5. Focalisation de l'attention

Les sites isolés alliés de cette région sont exposés aux tirs de roquettes dont les sites artisanaux de lancement se trouvent généralement sur des points hauts. Cette menace latente entraîne une forte motivation des équipages pour les localiser lors des vols de reconnaissance.

L'équipage inspecte minutieusement les alentours à la recherche d'un de ces sites ou de toute autre menace. Son attention est alors exclusivement portée vers l'extérieur.

Le PCB identifie sur une crête un tube blanc qu'il associe instantanément à une menace potentielle. Il invite alors son pilote à réduire sa vitesse et à s'en rapprocher afin de faciliter l'identification de l'objet suspect. La motivation est ici à son paroxysme.

Les manœuvres réalisées par l'équipage (vitesse, hauteur) démontrent une réelle volonté d'identifier le danger potentiel que représente ce tube. Son attention est donc fortement orientée vers l'identification de l'objet suspect. C'est à partir de cet instant que l'hélicoptère, sans que l'équipage en ait conscience, entame une spirale logarithmique à gauche.

Le PCB expérimenté a normalement un rôle de supervision durant le vol. Lors de l'évènement, l'appareil évolue aux limites de son domaine de vol, ce qui nécessiterait une plus grande attention sur les instruments de contrôle moteur.

Focalisés sur leur reconnaissance, le PCB et le PF ne prennent pas conscience de l'évolution en spirale de la machine ni de la diminution importante de la vitesse et de la hauteur. Le PCB délaisse son rôle de supervision et n'identifie pas la dangerosité de la situation.

Se focalisant exclusivement sur la reconnaissance de l'objet détecté et méconnaissant le phénomène thermique rencontré, le PCB ne prend pas conscience de l'évolution de plus en plus risquée de l'aéronef.

2.3.3.6. Gestion de l'évènement par l'équipage

Lorsque le PF ressent un enfoncement de l'hélicoptère, il tire légèrement sur le pas collectif. Il perçoit ensuite un cadencement vers la gauche et cherche à compenser en agissant au palonnier à droite.

Le voyant couple clignote, devient fixe, et presque instantanément le voyant « ALARME » s'allume.

Malgré un pas collectif tiré au maximum, la descente ne peut être arrêtée et une série de détonations retentit. Le pompage est annoncé par le PCB et la check-list est appliquée. L'équipage parvient à maintenir un certain contrôle de son hélicoptère et réussit à le poser sur le flanc du talweg.

L'équipage est confronté à une situation inattendue alors qu'il est proche du sol. Il réagit par automatisme en fonction des effets successifs qu'il perçoit. Il parvient ainsi à garder un contrôle résiduel de l'hélicoptère et parvient à se poser sur le flanc du talweg.

3. CONCLUSION

L'évènement est un poser dur lors d'un vol à très basse hauteur dû à un passage dans des turbulences de sillage dans un contexte climatique extrême.

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

L'équipage a l'habitude de voler ensemble et présente des profils d'expérience contrastés. Pendant toute la mission, les communications au sein de l'équipage sont rares et peu opérantes.

Les conditions de température sont sévères et incitent le PCB à retarder au plus tard l'heure de décollage pour bénéficier d'une relative fraîcheur, sans déborder sur la nuit.

Au cours du vol, l'équipage localise un objet susceptible d'être un tube lance-roquettes et commence à orbiter autour de lui tout en se rapprochant.

Soudain, alors que la hauteur par rapport au sol est inférieure à 10 m, le voyant ALARME s'allume, mais le PF ne peut pas baisser le pas général au regard de la proximité du sol.

Six secondes plus tard, le moteur pompe et le PCB ferme le coupe-feu, réduit la manette de débit, le moteur s'éteint puis il coupe la pompe de gavage.

L'équipage réalise un atterrissage sans moteur à faible hauteur et parvient à limiter les dégâts.

3.2. Causes de l'évènement

En se rapprochant du sol constitué de roches noires restituant les fortes températures du désert, l'hélicoptère rentre dans une masse d'air surchauffée à l'extrême.

Les conditions climatiques, la nature du sol et le relief rendent la mission particulièrement délicate, sans que l'équipage ait conscience de toutes les contraintes.

La trajectoire empruntée par l'équipage amène l'hélicoptère à repasser dans ses turbulences de sillage qui, combinées à l'élévation exceptionnelle de la température environnante, contribuent à la perte de régime observée.

La grande dissymétrie d'expérience combinée à une communication pauvre entre le PCB et le PF (cockpit de type autocratique) a entraîné un manque de synergie dans un moment critique.

La trajectoire d'approche en spirale logarithmique utilisée par le PF et le PCB pour observer un objet au sol est inadaptée.

L'équipage évolue aux limites de fonctionnement de la machine dans plusieurs domaines simultanément (masse élevée, vitesse et hauteur faibles, et température extrême).

L'attention du PCB est focalisée sur la reconnaissance d'un site probable de tir de roquettes, ce qui l'empêche de prendre conscience de l'évolution de plus en plus risquée de l'aéronef.

PAS DE TEXTE

4. RECOMMANDATIONS DE SECURITE

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

4.1.1. Vol en conditions climatiques chaudes

Au cours de cet évènement l'équipage n'a pas anticipé l'élévation considérable de la température à proximité des roches noires du désert. Combinée au passage dans son propre sillage, cette température extrême a conduit l'hélicoptère à une perte de régime irréversible. Il est important de faire connaître les conséquences d'un survol à très basse hauteur de ce type de roche.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande :

à l'armée de terre, à l'armée de l'air et à la marine nationale de diffuser et de commenter rapidement ce rapport afin d'avertir les équipages sur les dangers encourus au-dessus de ce type de reliefs en zones chaudes.

R1 – [T-2016-010-A]

4.1.2. Etude des phénomènes aérologiques complexes

Le phénomène aérologique rencontré par l'équipage à l'aplomb des roches noires en zone désertique est complexe et méconnu. Les contraintes de limite de puissance rencontrées dans les pays chauds sont comparables aux limites atteintes lors des vols en montagne. Or, contrairement à la montagne, les spécificités du vol dans les pays chauds sont peu étudiées et enseignées.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande :

à l'armée de terre, à l'armée de l'air, à la marine nationale et à DGA EV d'étudier avec Météo-France les phénomènes aérologiques complexes spécifiques aux zones désertiques susceptibles d'être rencontrés par les équipages des forces, afin de proposer un module de formation ad hoc.

R2 – [T-2016-010-A]

4.1.3. Documentation

La Gazelle a vu son emploi et ses versions évoluer à travers le temps. Depuis de nombreuses années, elle est très utilisée par l'ALAT dans les pays chauds.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande :

à l'armée de terre de rédiger un chapitre du manuel de vol de la Gazelle consacré à son utilisation par temps chaud.

R3 – [T-2016-010-A]

4.1.4. Analyse des vols

Lors de cette enquête, les enregistrements disponibles dans le SITALAT ont été mis à profit pour la compréhension de l'évènement. Leur exploitation préventive, régulièrement ou ponctuellement peut être également utilisée dans le cadre de l'optimisation de la formation, de la composition des équipages mais aussi dans celui de l'amélioration de la sécurité des vols.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande :

à l'armée de terre de mettre en œuvre une politique d'exploitation des enregistrements SITALAT dans le but d'améliorer la sécurité des vol. Qu'elle soit systématique ou simplement ponctuelle, cette exploitation permet de fournir des informations précieuses pour la sécurité aérienne.

R4 – [T-2016-010-A]

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

4.2.1. Balise de détresse monodirectionnelle

Les balises de détresse des Gazelle sont des balises monodirectionnelles qui ne se déclenche pas lorsqu'elles sont soumises à des chocs latéraux. Lors de l'évènement, l'impact avec le sol n'a pas conduit au déclenchement de la balise. Il est cependant probable qu'une balise multidirectionnelle se serait déclenchée lors du basculement.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande :

aux autorités d'emploi en liaison avec la DGA d'équiper les hélicoptères de balises de détresse permettant de se déclencher lors de chocs latéraux.

R5 – [T-2016-010-A]

4.2.2. Enregistreur de données d'accident

L'enquête n'a bénéficié que du seul témoignage de l'équipage et des données issues du SITALAT pour analyser et comprendre l'accident. Cet équipement n'est pas prévu pour résister aux chocs et au feu.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande :

à l'armée de terre, en relation avec la DGA, d'équiper ses aéronefs d'enregistreur de données d'accidents (paramètres et voix, ou vidéo).

R6 – [T-2016-010-A]

4.2.3. Régulation

Lors des expertises techniques, il a été mis en évidence que la chambre P2 du limiteur de débit était remplie de poussière fine dont la granulométrie était nettement inférieure à la maille du filtre ad hoc. Réduire cette taille pourrait induire un colmatage et obturer l'arrivée de P2. Cette chambre n'est pas inspectée ni nettoyée entre deux visites chez l'industriel.

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

Safran Helicopter Engines en liaison avec la DGA et la SIMMAD d'étudier une solution pouvant être mise en œuvre en maintenance en ligne afin de rendre possible le nettoyage ou le soufflage de la chambre P2 du limiteur de débit à une plus grande récurrence.

R7 – [T-2016-010-A]

4.2.4. Météorologie

En opération, les équipages d'hélicoptères de l'ALAT ont vocation à se poser et à opérer à partir de terrains non préparés et non équipés. Il devient alors difficile d'évaluer avec précision les éléments météorologiques nécessaires au calcul des performances des aéronefs.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande :

à l'armée de terre d'étudier l'achat sur étagère de stations météorologiques, miniaturisées et aisées à mettre en œuvre au profit des unités tactiques aéromobiles.

R8 – [T-2016-010-A]

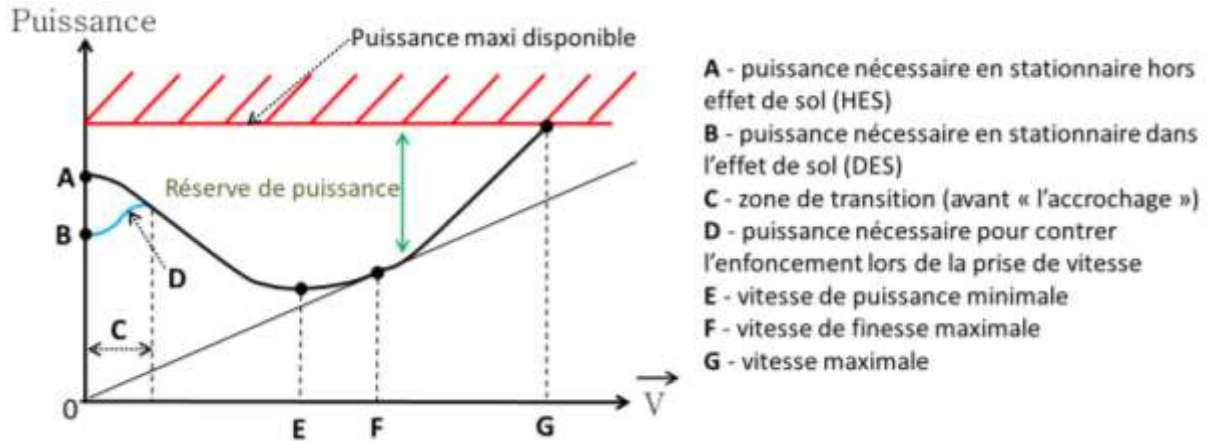
ANNEXES

ANNEXE 1 Les différents niveaux de puissances nécessaires au vol de l'hélicoptère	37
ANNEXE 2 Extrait de l'expertise moteur	38

ANNEXE 1

Les différents niveaux de puissances nécessaires au vol de l'hélicoptère

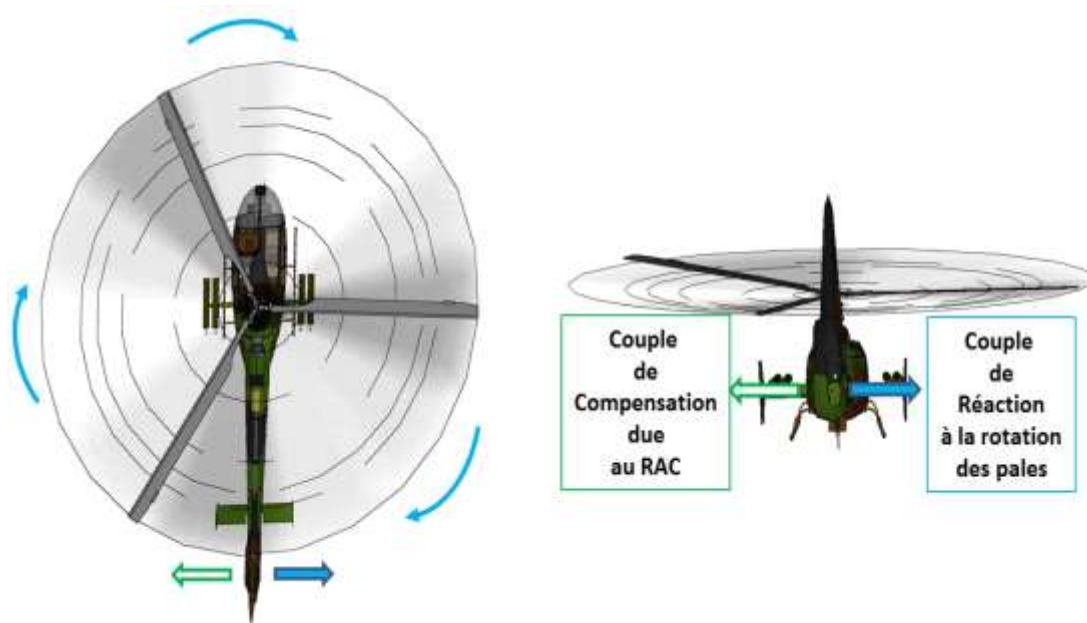
Pour se mouvoir dans les airs, comme tout aéronef, l'hélicoptère est tributaire des caractéristiques de l'atmosphère (altitude, température, densité). Par ailleurs la puissance nécessaire pour le maintenir en vol varie de manière importante en fonction de la vitesse de déplacement en palier. Les diverses vitesses caractéristiques sont rappelées ci-après.



Courbe puissance / vitesse

Sur la Gazelle Viviane – SA 342 M, la vitesse de puissance mini (E) est proche de 120 km/h. C'est une vitesse refuge en cas d'autorotation.

La Gazelle possède un rotor tournant dans le sens horaire. Le pilote aux commandes voit le rotor tourner vers la droite. Le couple de réaction tend à faire tourner la cellule à gauche. Pour contrer cet effet, le pilote doit appuyer sur la pédale droite du palonnier. Par ailleurs, à basse vitesse, cette manœuvre peut consommer jusqu'à 12% de la puissance disponible pour contrer le couple de réaction.



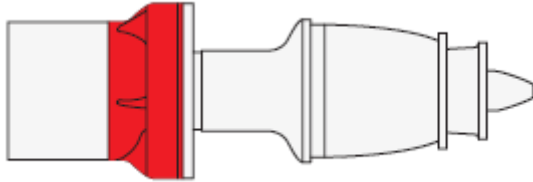
Représentation du couple de réaction

ANNEXE 2

Extrait de l'expertise moteur

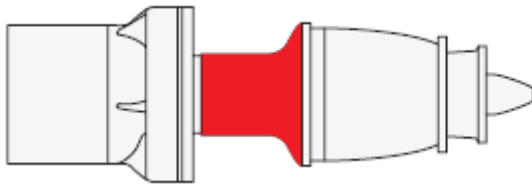
Cet extrait n'est pas exhaustif. Il rapporte ici les éléments qui ont attiré l'attention des spécialistes lors de l'expertise.

1. L'entrée d'air :



Le carter d'entrée d'air est en bon état. L'entrée d'air est poussiéreuse.

2. Le compresseur axial : (2 étages)



Un dépôt de sable et d'huile mêlés est visible sur le moyeu. Ce constat n'est pas spécifique à ce moteur.

Le compresseur axial n'a pas été entièrement démonté (séparation des roues). Cette opération nécessitant un outillage spécial n'a pas été jugée indispensable suite aux constats réalisés, notamment par endoscopie. Aucune trace d'interférence aubes / stator n'est constatée.

Un dépôt très léger de poussière sablonneuse est présent sur les aubages.

Les bords d'attaque de toutes les aubes de la roue d'entrée RM1 (roue mobile 1^{er} étage) présentent des impacts multiples sur toute leur longueur (cf. sous-chapitre suivant).



Impacts sur les bords d'attaque RM1 du compresseur axial

Le redresseur premier étage et le deuxième étage ont été inspectés par l'arrière du compresseur et par endoscopie. Ils ne présentent pas d'endommagement.

Contrôle de l'érosion du compresseur axial :

Des contrôles visuels de l'érosion ont été réalisés sur la roue RM1 (en l'état, sans ré-agréage des impacts), par SHE dans ses locaux à Tarnos, en présence de DGA EP :

- avec le gabarit prévu au manuel d'entretien (outillage à disposition des utilisateurs) :
 - critère de dépose non atteint ;
 - le résultat aurait été inchangé si le ré-agréage au niveau des impacts avait été effectué tel que prévu par le manuel d'entretien (conclusion basée sur le retour d'expérience SHE).



Contrôle de l'érosion de la RM1 avec le gabarit prévu au manuel d'entretien

Avec le gabarit prévu au manuel de réparation (ce gabarit induit des critères d'acceptation plus restrictifs, assurant la disponibilité de la roue du compresseur axial pour la durée du *Time Between Overall* du moteur) :

- critère de rebut non atteint ;
- une fois le ré-agréage effectué, ce critère aurait pu être atteint (conclusion basée sur le retour d'expérience SHE).

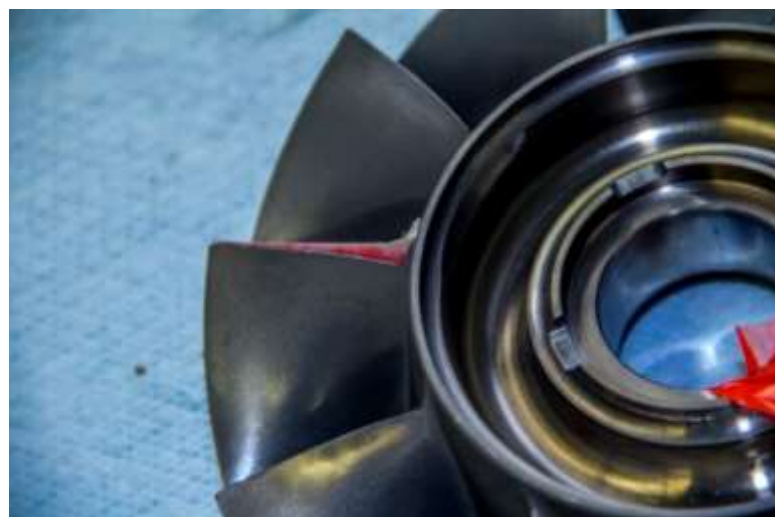


Contrôle érosion RM1 avec le gabarit prévu au manuel de réparation

D'après la documentation moteur, cette roue RM1 comptabilise 470 heures depuis sa fabrication. Elle a été réparée avant le montage du moteur sur la Gazelle n°4151, soit 89 heures avant l'accident.

La dernière inspection de cette roue a été réalisée 19 heures avant l'accident. Elle est réalisée toutes les 25 heures en zone sablonneuse, puis toutes les 10 heures lorsque l'érosion arrive proche des tolérances admises.

A titre de comparaison, la photo ci-dessous montre une roue RM1 rebutée au contrôle d'érosion avec le gabarit prévu au manuel de réparation.



Contrôle érosion RM1 avec le gabarit prévu zone rouge hors tolérance (compresseur rebuté)

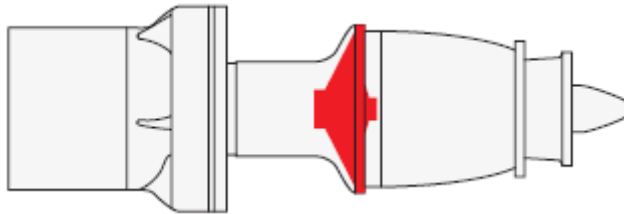
3. Vanne de décharge :

Type : V244-01, n° 3262

Le moteur a fonctionné 64 heures avec cette vanne.

Il s'agit d'une vanne bistable à papillon, actionnée par un moteur électrique via un réducteur. Elle est correctement fixée sur le carter et en bon état. Elle est ouverte (position normale suite à la décélération). Des dépôts poussiéreux de sable sont présents. Elle n'a pas été testée.

4. Compresseur centrifuge :

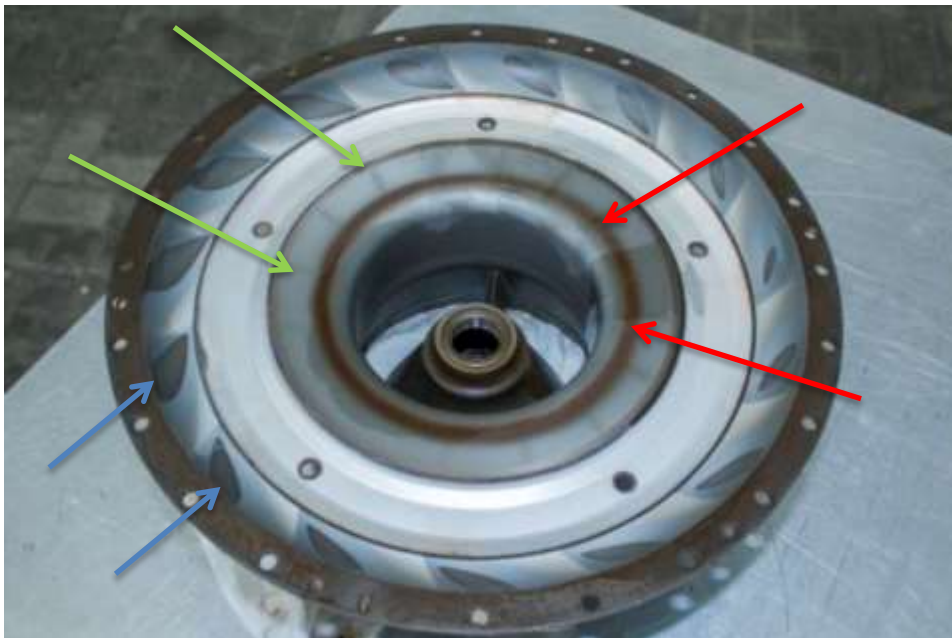


Le rouet n'a pas été séparé de l'arbre. Il est propre et en bon état.

La partie tangentielle de la volute présente en point haut 3 lignes de contact avec le rouet, alors que celui-ci était à l'arrêt. Il est possible que ce contact se soit produit lors du basculement de l'appareil.

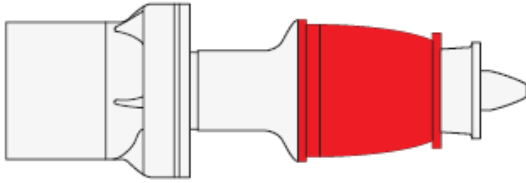
La partie radiale présente des traces peu marquées, espacées de telle façon qu'elles sont liées au rouet, mais d'une manière non déterminée (flèches vertes ci-dessous).

Une trace circulaire de couleur brune est également visible sur la volute, au droit du changement de profil (flèches rouges). Son origine n'est pas déterminée. Il ne s'agit pas d'un dépôt. Une érosion de la peinture est visible au droit de la sortie des aubages du premier diffuseur (flèches bleues).



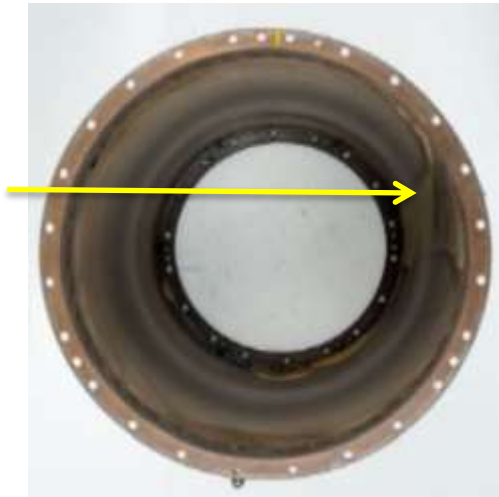
Traces sur la volute du compresseur centrifuge

5. Chambre :



La chambre est globalement en bon état.

La peinture interne du carter principal (dit carter turbine) est érodée en position haute (au niveau du trait jaune ci-dessous).



Carter principal

La dépose de ce carter a révélé la présence d'un agglomérat de sable en point bas (masse totale 12 g) : ce constat est courant vu la zone géographique d'opération de l'appareil. Aucune trace de surchauffe ou de crique n'est décelée sur le mélangeur et les tôles de turbulence. De la cokéfaction est présente sur la face interne de la tôle de turbulence avant. Un dépôt de sable est visible sur la face avant de la tôle de turbulence arrière.

6. Système d'alimentation et d'injection carburant :

Le raccord injecteur, sur la face avant du carter réducteur, et le tube carburant ont été déposés : ils sont propres. Les joints d'étanchéité sont en bon état.

Le tube à carburant comprend six joints. Le dernier (côté arrière) est coupé, les trois joints précédents sont ébréchés. Ce type d'endommagement est connu de SHE, il pourrait causer une fuite de carburant et une dilution de carburant dans l'huile. La documentation de maintenance ne fait pas mention de problème de dilution.

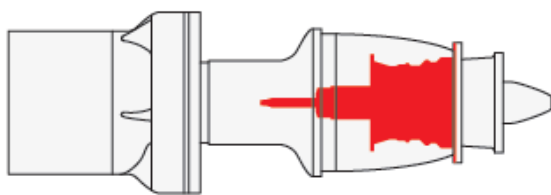
Cet endommagement est sans rapport avec l'évènement.



Endommagement des joints toriques du tube à carburant

La roue d'injection est restée accouplée, elle ne présente aucun endommagement.

7. Arbre de turbine :



Il est en bon état.

Quelques légères traces laissées par les léchettes du labyrinthe sont visibles. De la poussière de sable est présente sur les vis d'assemblage.

a. Turbine : distributeur 1er étage :

Les pales de ce distributeur sont en alliage base nickel C263.

Des agglomérats de sable sont présents sur les bords d'attaque du distributeur. Un nettoyage au chiffon suffit à les enlever.

Du sable est également présent au droit des orifices de refroidissement des pales creuses.



Vue générale du distributeur turbine 1^{er} étage



Dépôts de sable sur le bord d'attaque du distributeur turbine 1^{er} étage

Les bords de fuite présentent des fissures et des traces noires.

Des observations à la loupe binoculaire ont été réalisées afin de caractériser ces criques. Le tableau suivant présente les résultats.

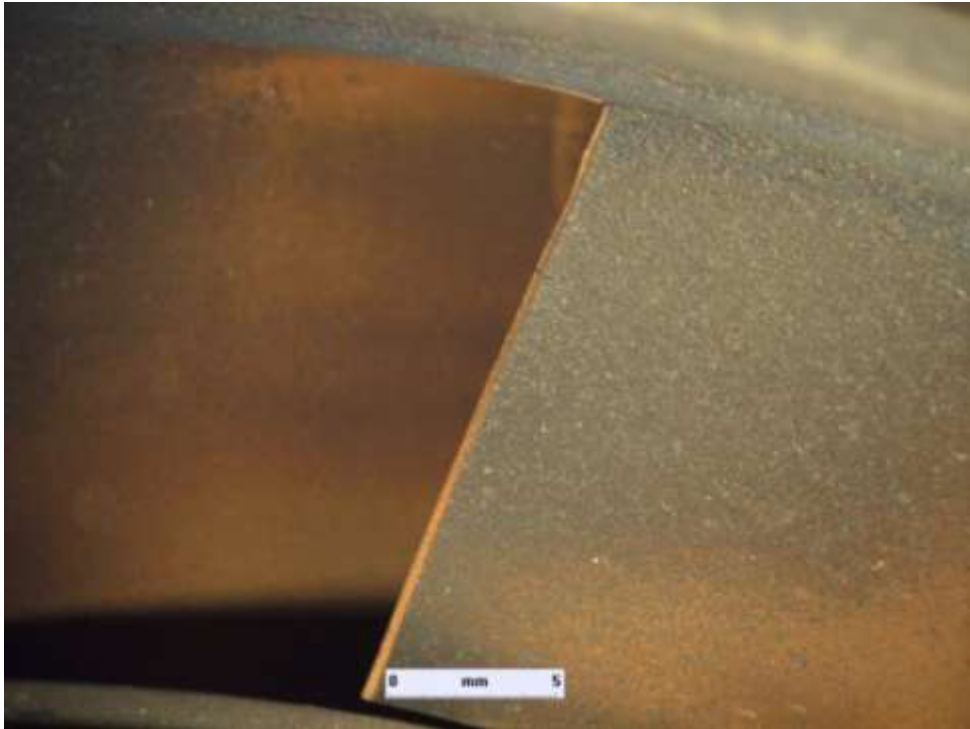
Aubes	Aubes criquées	Longueur des criques	Longueur moyenne de criques	Position des criques
19	15 (79 %)	0,90 mm – 5,44 mm	2.63 mm	Entre le milieu du BdF et l'extrémité

Compte tenu du recouvrement d'une aube par la suivante, il est difficile d'observer l'intrados et donc d'observer si toutes les criques sont traversantes : seules les plus longues sont visibles côté intrados. Il est possible que des criques soient plus importantes que révélées lors de l'observation si la crique se propage sous la surface.

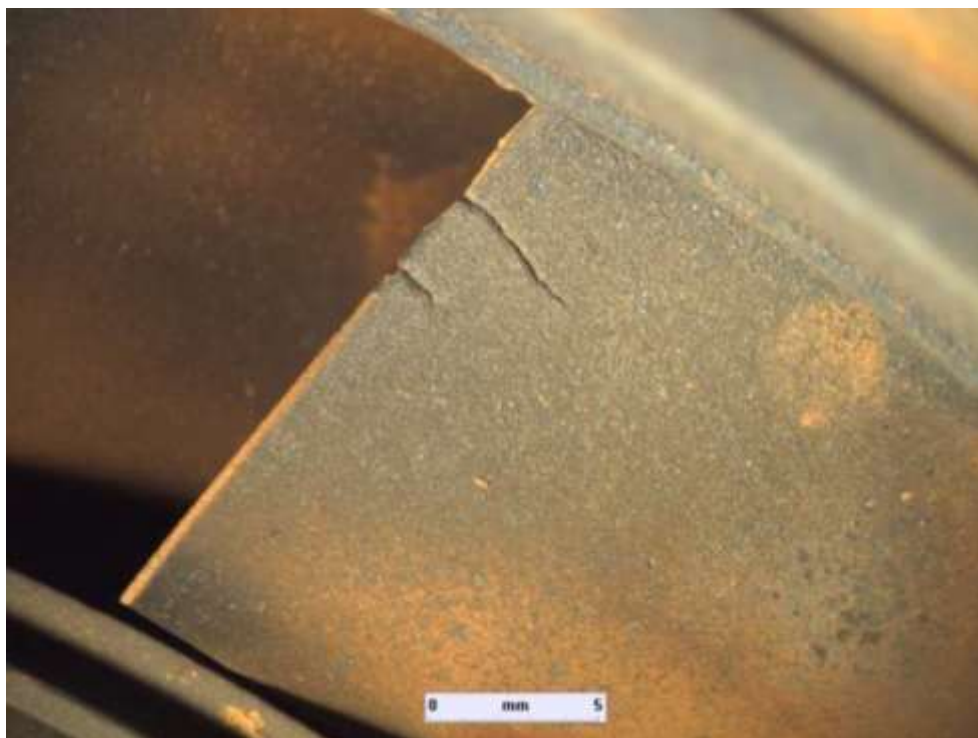
Certaines aubes présentent un écaillage en bout de crique. De plus, certaines aubes présentent plusieurs criques.



Criques en bord de fuite du distributeur turbine du 1^{er} étage



Aube présentant une crique de faible dimension en bord de fuite



Aube distributeur 1^{er} étage présentant 2 criques en bord de fuite

Ce distributeur a été remplacé (échange standard) 89 heures avant l'accident.

D'après SHE :

- ce type d'endommagement n'est pas courant, mais est rencontré en réparation ;
- l'état du distributeur au montage n'est pas connu (pas de cartographie de la répartition des criques lors de la dernière réparation), mais il est certain que des criques étaient déjà présentes ;
- étant donné les critères de réparation, des criques ont évolué et d'autres sont apparues, traduisant une utilisation à des températures élevées, mais sans lien direct avec l'évènement qui a provoqué la fusion des roues de turbine.

b. Ensemble turbine :

1. roue 1^{er} étage :

Les aubes sont constituées de l'alliage base nickel NK15CATD (IN100).

Toutes les aubes présentent une perte de matière homogène sur le pourtour, avec un profil en extrémité en « chapeau de gendarme », caractéristique d'une surchauffe subie. La perte de matière représente environ 25 % de la hauteur de l'aube.

Un dépôt granuleux est présent sur l'anneau, provenant de matière fondue des aubes projetées. Des dépôts de poussière minérale sont présents dans les pieds de sapin.



Roue turbine 1^{er} étage

2. distributeur 2^{ème} étage :

Les pales de ce distributeur sont en alliage base cobalt KC25NW (HS31).

Les aubages ne présentent pas d'endommagement apparent. Des dépôts de sable sont notés sur les aubages.

Un léger dépôt est visible sur l'intrados des aubes (provenant vraisemblablement de l'endommagement des aubes en amont).

3. roue 2^{ème} étage :

Les aubes sont constituées du même alliage que celles du premier étage (IN100).

La séparation des roues 2^{ème} et 3^{ème} étage emprisonnant le distributeur 3^{ème} étage, a nécessité d'appliquer un effort (« collage » au niveau du curvic coupling).
Les aubes présentent le même type d'endommagement que la première roue, la perte de matière étant limitée à environ 6 % de la hauteur de l'aube.



Roue turbine 2^{ème} étage

Des dépôts de poussière minérale sont présents dans les pieds de sapin.

4. 3^{ème} étage :

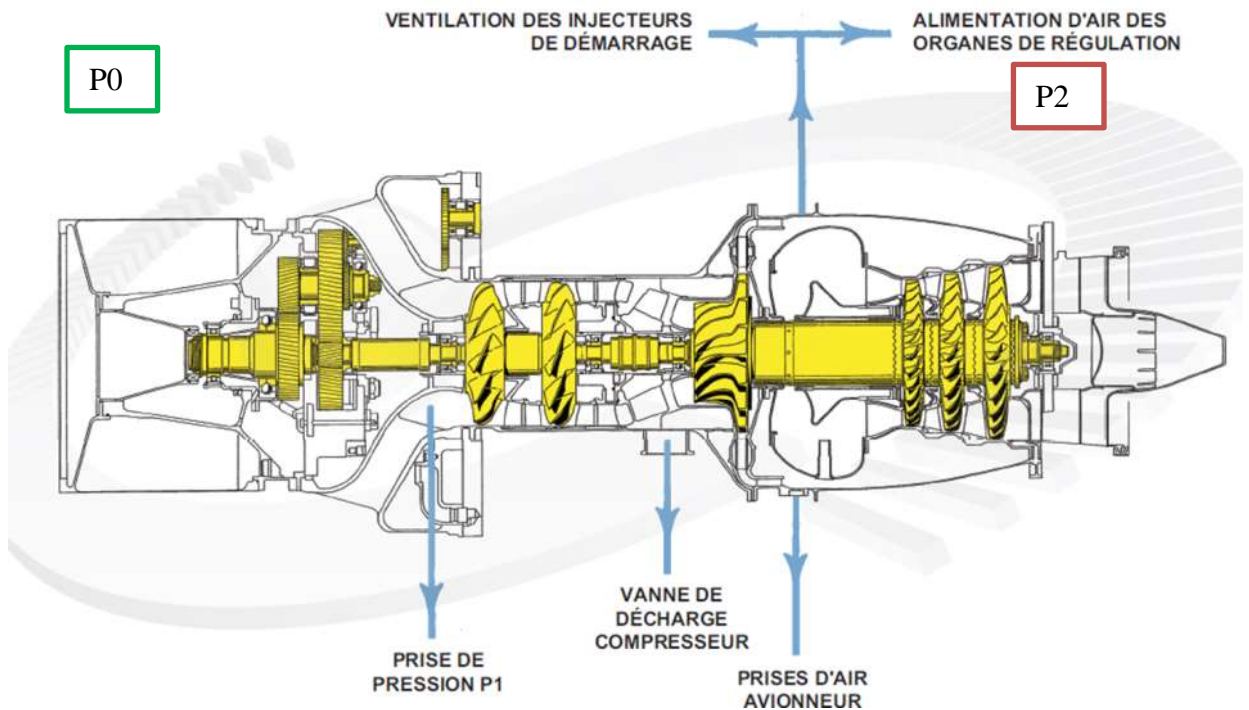
Les pales du distributeur sont dans le même alliage que celles du 2^{ème} étage (HS31).
Le disque aubagé est en alliage base nickel NCK20TA (Nimonic 90).
Cet étage est en bon état.

5. Paliers – circuit de lubrification :

Les paliers 1 à 4 n'ont pas été démontés. Ils sont humides et la rotation des roulements est normale. Aucun indice d'endommagement n'a été constaté.
L'examen du bouchon magnétique et l'analyse de l'huile moteur n'ont pas révélé d'anomalie.
Compte tenu de l'absence de défaut de lubrification, le filtre 25 microns n'a pas été inspecté.

8. Constats sur le prélèvement d'air P2 et sur le limiteur de débit :

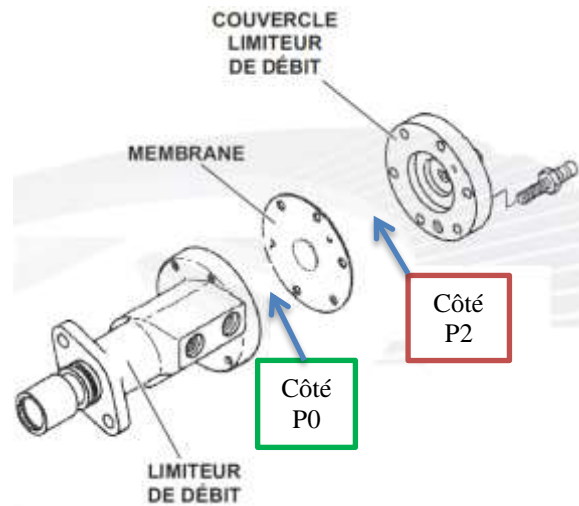
Le prélèvement d'air P2 (sortie compresseur centrifuge) assure la pressurisation d'une face de la membrane du dispositif limiteur de débit carburant, l'autre face étant à la pression ambiante (P0).



Prises d'air moteur



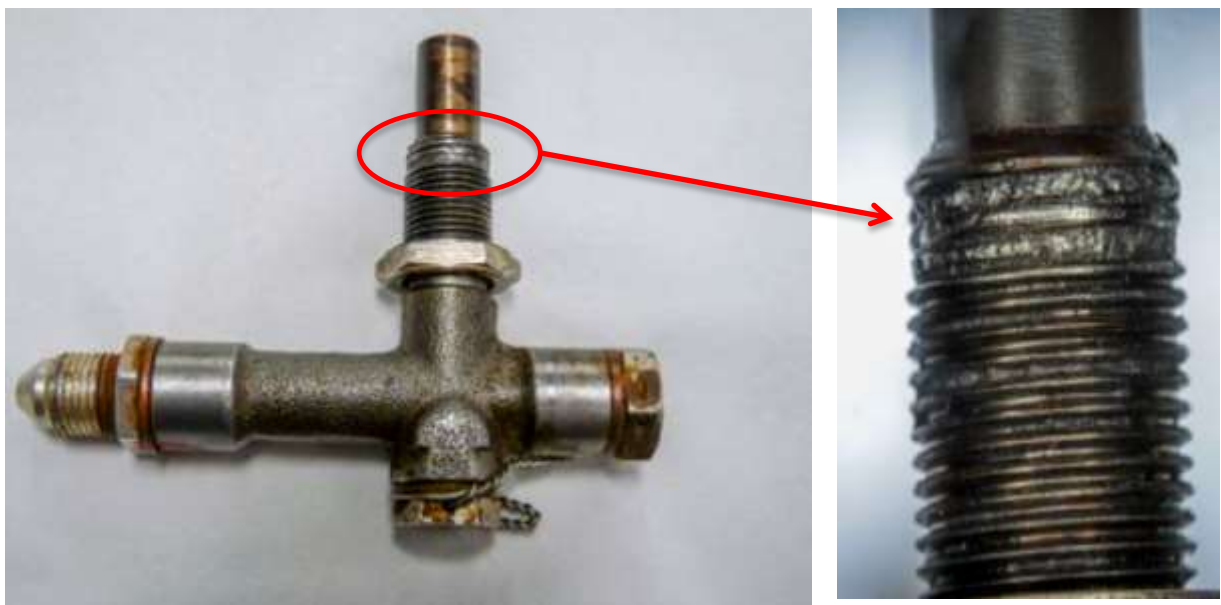
Vue du prélèvement P2 en place sur le moteur expertisé



Vue du limiteur avec le couvercle déposé

L'objectif étant de tester le régulateur au banc avec le prélèvement P2 en l'état, le démontage du prélèvement a été limité au maximum dans un premier temps. La tuyauterie a dû être déposée côté carter pour dévisser la prise sur celui-ci. La tuyauterie côté membrane a été laissée en place côté limiteur de débit.

Du dégrissant et un couple de desserrage élevé ont dû être utilisés pour dévisser la prise du carter : la partie interne du filetage est abimée (voir photo ci-dessous), vraisemblablement en conséquence d'une érosion par le sable de la partie exposée dans la veine. Le même constat a été fait sur la prise côté droit (de ventilation des injecteurs de démarrage).



Prise de prélèvement P2 : endommagement des filets internes à la veine d'air

Du sable est présent dans le logement du filtre.

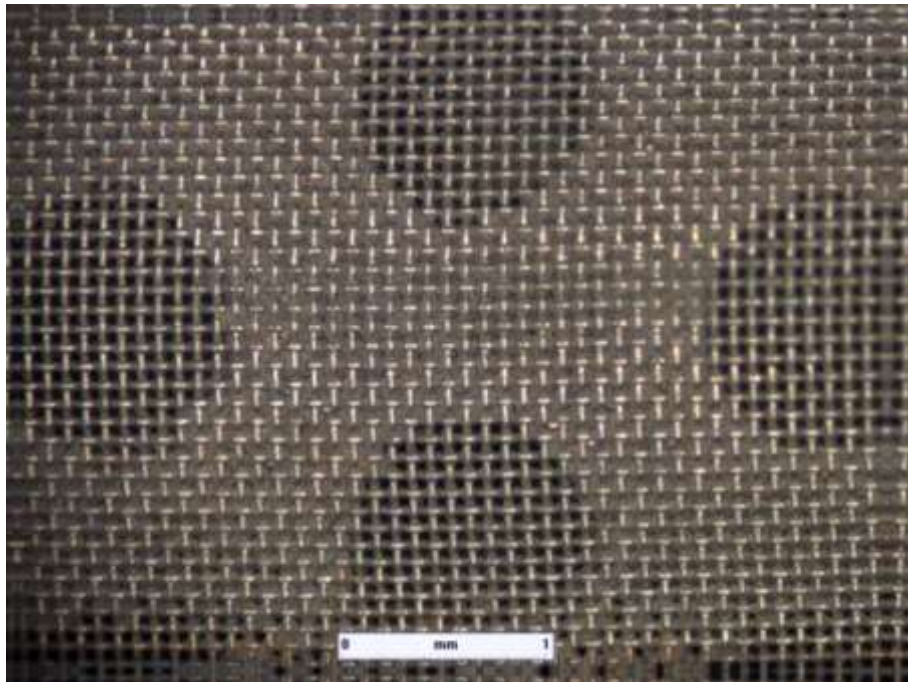


Présence de sable dans le logement du filtre

Le filtre (50 microns) a été déposé lors des opérations liées au passage au banc du régulateur (cf. chapitre suivant). Les zones du tamis en regard des orifices du tube interne retiennent peu de sable. Par contre, les autres zones apparaissent majoritairement colmatées.



Filtre d'air P2



Détail filtre d'air P2

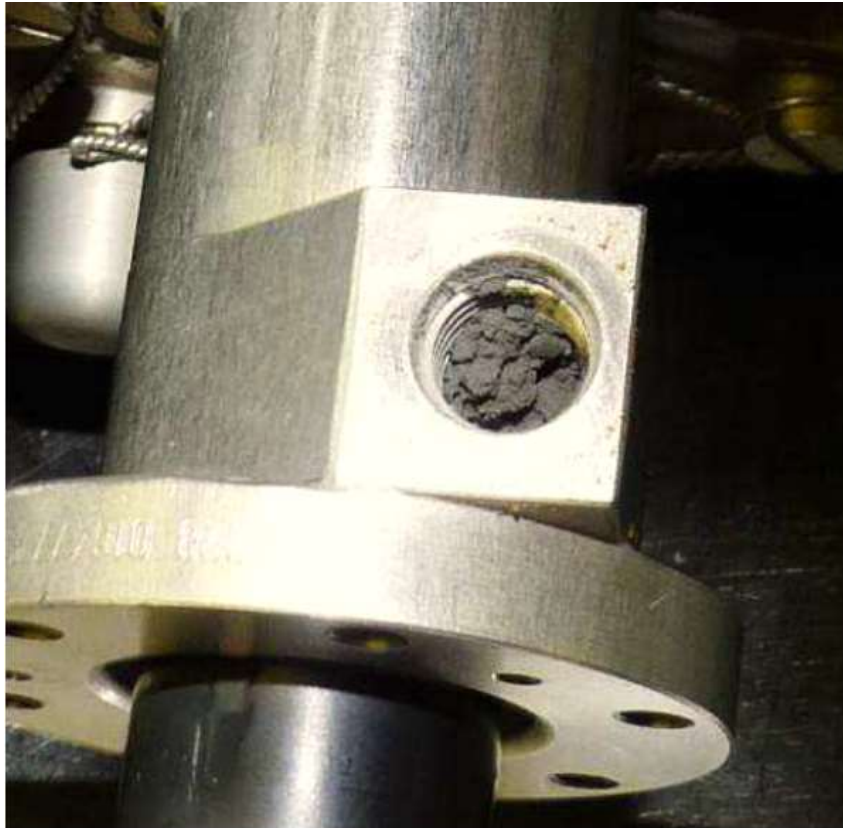
D'après la documentation de maintenance, ce filtre a été contrôlé 19 heures avant l'accident (inspection toutes les 25 heures en zone sablonneuse).

La tuyauterie elle-même ne contenait pas de sable.

Le raccord de cette tuyauterie sur le corps du limiteur contient du sable, sans qu'il soit obstrué. Une quantité relativement importante de sable, au regard de la section de passage considérée, est constatée à l'embouchure de l'alésage dans lequel vient se visser ce raccord.



Présence de sable sur le raccord de la tuyauterie de prélèvement P2 sur le corps du limiteur



Présence importante de sable dans l'alésage du raccord de fixation de la tuyauterie P2 sur le limiteur

Le couvercle et la membrane ont été déposés lors des opérations liées au passage au banc du régulateur.

Côté pression ambiante (P0), le logement et la membrane sont intacts et exempts de tout dépôt. L'étanchéité de la membrane a été vérifiée lors des contrôles préliminaires au passage au banc du régulateur.

La présence de sable est constatée à l'embouchure du conduit d'air P2 sur le plan de joint du couvercle.



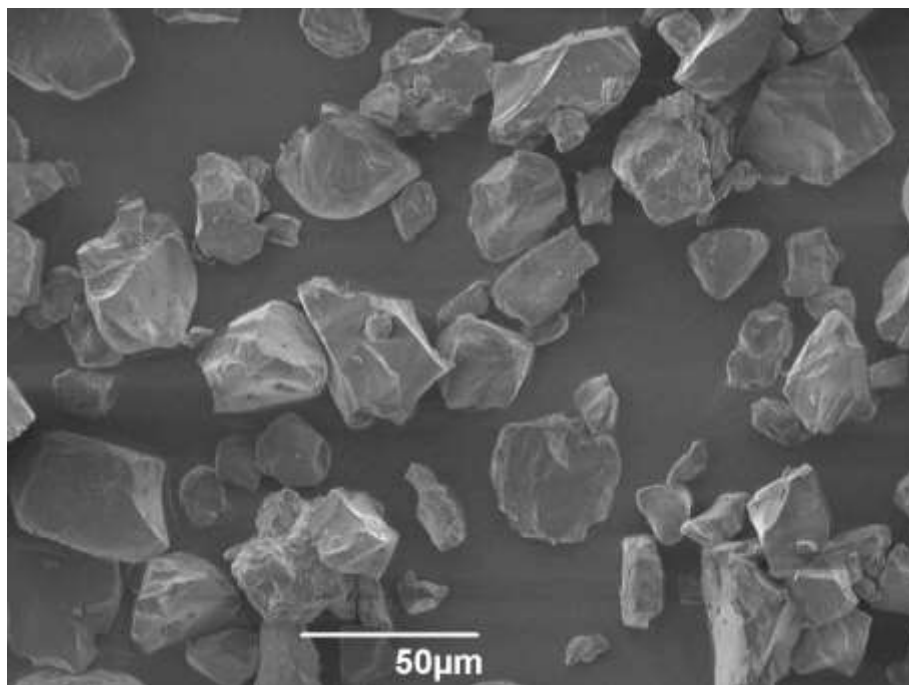
Présence de sable à l'embouchure du conduit d'air P2 sur le plan de joint du couvercle

La zone située côté air P2 de la membrane est entièrement remplie de sable très fin (le dépôt recueilli pèse 0,55 g). La poussière est directement en contact avec la membrane, elle est venue « épouser » la forme de celle-ci.

La granulométrie de ce sable apparait homogène, elle a été estimée à partir d'observations au microscope électronique à balayage (MEB) : elle est cohérente avec le niveau de filtration en amont (50 microns).

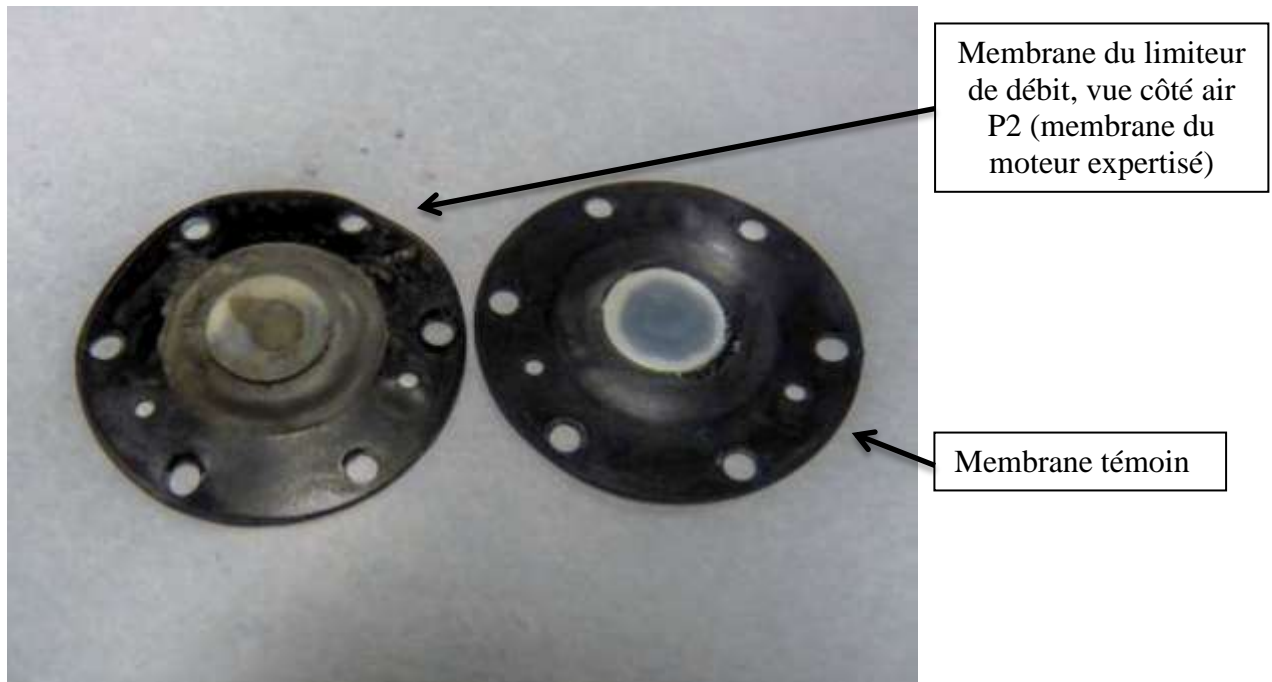


Couvercle rempli de sable côté P2



Cliché au MEB du sable retrouvé dans le couvercle P2

La membrane est intacte, non déchirée ou perforée.



9. Passage au banc et démontage du régulateur :

Le passage au banc industriel n'a révélé aucun dysfonctionnement que ce soit en régime continu ou dynamique simulé.

Après le passage au banc, le régulateur a été presque entièrement démonté à l'usine SHE de Tarnos.

Tous les composants ont été trouvés en bon état. Aucune anomalie ou blocage de sous-systèmes ou de joints, aucune rayure ou marquage significatif n'a été constaté, ainsi qu'aucune pollution interne. Le démontage n'a donc pas révélé d'endommagement de nature à perturber le fonctionnement du régulateur.

10. Analyse des conséquences possibles de la présence de sable dans le limiteur :

Le passage au banc du régulateur n'a pas mis en évidence de non-conformité avec la capsule du limiteur remplie de poussière fine.

Néanmoins, il paraît intéressant de déterminer quelles seraient les conséquences possibles sur la régulation de la présence de poussière côté P2, en considérant le cas d'une augmentation de puissance, étant donné que le moteur a subi une surchauffe de la turbine.

Cette pollution pourrait provoquer :

- une obturation partielle (cas 1) ou totale (cas 2) de la tuyauterie ou du conduit interne du limiteur, côté P2 ;
- ou un déplacement contrarié de la membrane, dans le sens d'une diminution de P2-P0 (cas 3).

La régulation de l'Astazou XIV M a deux fonctions principales :

- une régulation tachymétrique :
 - une fois le moteur démarré et accéléré au régime régulé, elle a pour objet le maintien de ce régime par dosage du carburant ;
 - toute variation de régime (rotor et moteur, celui-ci étant de type à turbine liée) est détectée par le régulateur hydromécanique et provoque le déplacement du doseur ;
 - un clapet maintient le delta P doseur constant afin que le débit carburant soit une fonction linéaire du déplacement du doseur ;
- une limitation de la charge thermique :
 - cette fonction a principalement pour but de maîtriser les augmentations de débit carburant en fonction des signaux de pression P0 et P2, pour éviter le surdébit et donc la surchauffe et le pompage ;
 - le limiteur agit par l'intermédiaire d'un ressort monté en série avec celui du clapet de delta P constant, modifiant ainsi son tarage en fonction de P2-P0.

Toute augmentation de pas général provoque une ouverture rapide du doseur carburant, mais le limiteur de débit n'autorise l'augmentation du delta P doseur et donc un surplus de débit carburant que sur la ligne de charge thermique maximum.

Dans les cas 1 et 2, la pression P2 vue par la membrane va être soit plus longue à s'établir, soit figée. Il va s'ensuivre une ouverture du clapet delta P plus faible que la normale et donc un débit et une puissance plus faibles.

Dans le cas 3, le mouvement de la membrane n'est pas limité dans le sens d'une augmentation de P2.

Remarque : la perturbation de la détection de la pression P2 pourrait créer un dysfonctionnement de la régulation, de type instabilité de régime.