Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle SUST
Service suisse d'enquête de sécurité SESE
Servizio d'inchiesta svizzero sulla sicurezza SISI
Swiss Transportation Safety investigation Board STSB

Rapport final n° 2370 du Service suisse d'enquête de sécurité SESE

concernant l'accident de l'avion de transport Ju 52/3m g4e, HB-HOT,

exploité par la compagnie Ju-Air,

survenu le 4 août 2018

à 1,2 km au sud-ouest du Piz Segnas, Flims (GR)

Service suisse d'enquête de sécurité SESE
3003 Berne
Tél.: +41 58 466 33 00, fax: +41 58 466 33 01
info@sese.admin.ch
www.sese.admin.ch

Remerciements

Le Service suisse d'enquête de sécurité (SESE) s'est largement appuyé sur les observations, les photos et les vidéos remises par des témoins dans le cadre de ses travaux et de l'élaboration du présent rapport final. Le SESE remercie toutes les personnes ayant partagé des indices et des images aux fins de l'enquête, que ce soit spontanément ou à sa demande.

Les autorités, les organisations et les entreprises suivantes ont apporté une contribution essentielle à la bonne conduite de l'enquête:

Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la sécurité de l'aviation civile (BEA)
Forensisches Institut Zürich, FOR *(Institut de police scientifique de Zurich)*
Police cantonale des Grisons
Commune de Flims
Entreprise Flims Electric AG, à Flims (GR)
Entreprise MatExpert GmbH, à Thoune (BE)
Refuge de montagne, Piz Segnas
Université des sciences appliquées de Zurich (ZHAW)

Remarques générales sur le présent rapport

Conformément

à l'art. 3.1 de la 12e édition de l'annexe 13, entrée en vigueur le 5 novembre 2020, de la convention relative à l'aviation civile internationale du 7 décembre 1944, entrée en vigueur pour la Suisse le 4 avril 1947, état au 18 juin 2019 (RS *0.748.0*);

à l'article 24 de la loi fédérale sur l'aviation du 21 décembre 1948; état au 1er janvier 2020 (LA, RS *748.0*);

à l'art. 1, ch. 1 du règlement (UE) no 996/2010 du Parlement européen et du Conseil du 20 octobre 2010 sur les enquêtes et la prévention des accidents et des incidents dans l'aviation civile et abrogeant la directive 94/56/CE, entré en vigueur pour la Suisse le 1er février 2012 sur décision du Comité mixte des transports aériens Union européenne/Suisse et en vertu de l'accord entre la Communauté européenne et la Confédération suisse sur le transport aérien conclu le 21 juin 1999 (accord aérien);

et à l'art. 2, al. 1 de l'ordonnance du 17 décembre 2014 sur les enquêtes de sécurité en cas d'incident dans le domaine des transports; état au 1er février 2015 (OEIT, RS *742.161*);

l'enquête sur un accident d'avion ou un incident grave a pour seul objectif la prévention d'accidents ou d'incidents graves. L'enquête et le présent rapport ne visent donc nullement à établir les responsabilités ni à élucider des responsabilités civiles.

En conséquence, l'utilisation de ce rapport à d'autres fins que la prévention pourrait conduire à des interprétations erronées.

Toutes les informations contenues dans ce rapport, sauf indication contraire, se réfèrent au moment où s'est produit l'accident.

Sauf indication contraire, toutes les heures indiquées dans ce rapport le sont en heure normale valable pour le territoire suisse (*Local Time* – LT), qui, au moment de l'accident, correspondait à l'heure normale d'été d'Europe centrale (CEST). La relation entre LT, CET et l'heure universelle coordonnée (*Coordinated Universal Time* – UTC) est:
LT = CEST = UTC + 2 h.

La version de référence de ce rapport est rédigée en langue allemande.

Structure du présent rapport final

Rédigé conformément aux directives de l'Organisation de l'aviation civile internationale, le présent rapport final se compose d'une partie principale et d'annexes. Le rapport a été conçu selon les principes suivants:

- La partie principale présente de manière condensée les éléments indispensables à l'élucidation de l'accident. Elle a pour but d'expliquer aussi simplement que possible le contexte global. À cet égard, les nombreux faits recueillis ont été synthétisés et analysés afin de pouvoir tirer des conclusions.
- Les chapitres 2 Analyse et 3 Conclusions de la partie principale retracent de manière concise l'ensemble des éléments clés afin de favoriser la compréhension de l'accident, des conditions antérieures et des facteurs d'influence systémiques.
- Afin d'éliminer les déficits de sécurité constatés, le Service suisse d'enquête de sécurité a formulé des recommandations et des avis qui sont présentés au chapitre 4 Recommandations de sécurité, avis concernant la sécurité et mesures prises après l'accident.

- Les neuf annexes sont rattachées aux sous-chapitres 1.1. à 1.19 de la partie principale et fournissent des informations détaillées sur les faits et les méthodes appliquées dans le cadre de l'enquête. Certaines d'entre elles contiennent des évaluations succinctes des faits présentés, afin d'aider à comprendre l'accident et à tirer de plus amples enseignements pour améliorer la sécurité.
- Les valeurs déterminées dans le rapport final et dans les annexes, telles que les altitudes de vol, les vitesses, les angles d'assiette, etc., ont été pour la plupart reproduites avec des valeurs non arrondies, indépendamment de leur précision individuelle. Cela ne vise pas à suggérer une précision accrue. Au contraire, les valeurs calculées restent compréhensibles et peuvent être attribuées aux sources correspondantes. Pour des considérations détaillées avec les fourchettes et tolérances d'erreur associées, voir l'annexe A1.19, chapitres A1.19.3, A1.19.4, A1.19.5.1 et l'annexe A1.18, chapitre A1.18.5.
- Toutes les abréviations utilisées dans le présent rapport final, ainsi que les principaux termes techniques sont explicités dans un glossaire.

Table des matières

Aperçu ... 8
Enquête ... 8
Présentation succincte de l'accident ... 9
Causes ... 9
Recommandations de sécurité et avis concernant la sécurité ... 10
1 Faits ... 11
1.1 Situation avant les faits et déroulement du vol ... 11
1.1.1 Situation avant les faits ... 11
1.1.2 Déroulement du vol ... 13
1.1.3 Lieu et heure de l'accident ... 19
1.2 Dommages corporels ... 19
1.3 Dommages à l'aéronef ... 19
1.4 Autres dommages ... 19
1.5 Renseignements sur les personnes ... 19
1.5.1 Équipage ... 19
1.5.2 Équipage de cabine ... 22
1.5.3 Personnel de l'entreprise de transport aérien ... 22
1.5.4 Personnel des ateliers de maintenance ... 23
1.5.5 Personnel de l'Office fédéral de l'aviation civile ... 23
1.6 Renseignements sur l'aéronef ... 23
1.6.1 Historique ... 23
1.6.2 Caractéristiques de vol ... 24
1.6.3 Caractéristiques de construction ... 25
1.6.4 Certificat de navigabilité et catégorie d'aéronefs ... 25
1.6.5 Maintenance ... 26
1.7 Renseignements météorologiques ... 27
1.7.1 Situation météorologique générale ... 27
1.7.2 Situation météorologique au moment et sur le lieu de l'accident ... 28
1.7.3 Données astronomiques ... 29
1.7.4 Observations météorologiques d'autres équipages ... 29
1.7.5 Indications et clarifications complémentaires ... 29
1.8 Aides à la navigation ... 30
1.9 Communication ... 30
1.10 Renseignements sur l'aérodrome ... 30
1.11 Enregistreurs de vol et appareils d'enregistrement ... 30
1.11.1 Reconstitution des trajectoires de vol ... 30
1.11.2 Analyses numériques ... 35
1.11.3 Absence d'appareils d'enregistrement ... 39

1.11.4 Recommandation de sécurité 41
1.12 Indications sur l'épave, le crash et le lieu de l'accident 41
1.12.1 Lieu de l'accident. 41
1.12.2 Crash 41
1.12.3 Épave 41
1.13 Informations médicales et pathologiques 42
1.14 Incendie 42
1.15 Aspects en lien avec la survie 42
1.15.1 Généralités 42
1.15.2 Recherche et sauvetage 42
1.16 Essais et résultats des recherches 42
1.17 Indications sur les différentes organisations et leur direction 43
1.17.1 Entreprise de transport aérien 43
1.17.2 Organisme de gestion du maintien de la navigabilité 48
1.17.3 Entreprises de maintenance 48
1.17.4 Autorité de surveillance 48
1.18 Informations complémentaires 50
1.19 Techniques d'investigation utiles ou efficaces 50
2 Analyse 52
2.1 Structure de l'analyse 52
2.2 Conditions-cadres du vol 52
2.2.1 Conditions humaines 52
2.2.2 Conditions techniques 52
2.2.3 Conditions météorologiques 52
2.2.4 Conditions opérationnelles 53
2.3 Accident 53
2.3.1 Aspects opérationnels 53
2.3.2 Aspects humains 59
2.4 Aspects systémiques 61
2.4.1 Généralités 61
2.4.2 Organisation et gestion des opérations aériennes 61
2.4.3 Organisation et réalisation de la maintenance 64
2.4.4 Activité de surveillance 65
3 Conclusions 69
3.1 Constatations 69
3.1.1 Aspects techniques 69
3.1.2 Aspects opérationnels 70
3.1.3 Équipage 71
3.1.4 Accident 71

3.1.5 Conditions-cadres 72
3.2 Causes 74
3.2.1 Cause directe 74
3.2.2 Facteurs contributifs directs 74
3.2.3 Cause Systémique 74
3.2.4 Facteurs contributifs systémiques 74
3.2.5 Autres risques 75
4 Recommandations de sécurité, avis de sécurité et mesures prises après l'accident 76
4.1 Recommandations de sécurité 76
4.1.1 Contrôle des dommages dus à la corrosion et des défauts des composantes du système 76
4.1.2 Établissement des bases nécessaires à une surveillance efficace basée sur les risques 77
4.1.3 Octroi d'autorisations exceptionnelles 77
4.1.4 Surveillance des vols d'aéronefs à caractère historique 77
4.1.5 Amélioration des modalités de la surveillance 78
4.1.6 Amélioration des compétences de l'autorité de surveillance 78
4.1.7 Détermination des données sur la performance des aéronefs entièrement remis à neuf 79
4.2 Avis de sécurité 79
4.2.1 Contrôle et amélioration des processus de maintenance 79
4.2.2 Formation complémentaire des équipages 79
4.2.3 Amélioration de la gestion des ressources d'équipage (CRM) 80
4.2.4 Amélioration du système de gestion de l'entreprise 80
4.2.5 Amélioration du système de gestion de la sécurité 80
4.2.6 Réalisation d'analyses des événements et des risques 81
4.2.7 Amélioration de l'entraînement aux conditions de vol critiques 81
4.3 Mesures prises après l'accident 82

Résumé

Aperçu

Propriétaire	Forces aériennes suisses, case postale 1072, 8600 Dübendorf
Détenteur	Association des amis des Forces aériennes suisses (VFL), Überlandstrasse 271, 8600 Dübendorf, exploitait les avions Ju-52 au nom de Ju-Air
Fabricant	Junkers Flugzeug- und Motorenwerke AG, Dessau, Allemagne
Type de l'appareil	Ju 52/3m g4e
État d'immatriculation	Suisse
Immatriculation	HB-HOT
Lieu	à 1,2 km au sud-ouest du Piz Segnas, à 2475 m/M
Date et heure	4 août 2018, 16h57
Type d'exploitation	Commercial
Règles de vol	Règles de vol à vue (*Visual Flight Rules* – VFR)
Lieu de décollage	Aérodrome de Locarno (LSZL)
Destination	Aérodrome militaire de Dübendorf (LSMD)
Phase de vol	Vol de croisière
Type d'accident	Perte de contrôle

Enquête

L'accident s'est produit le 4 août 2018 à 16h57. Le responsable du service de piquet du SESE a reçu l'annonce à 17h04. L'enquête a été ouverte le 4 août 2018 à 17h55 par le Service suisse d'enquête de sécurité (SESE), en collaboration avec la police cantonale des Grisons. Le SESE a informé l'Allemagne et l'Autriche de la survenue de l'accident. Ces deux États ont mandaté des représentants. L'autorité française en charge des enquêtes de sécurité, le Bureau d'enquêtes et d'analyses pour la sécurité de l'aviation civile (BEA), a apporté une aide considérable au SESE pour la préparation et la lecture des supports de données sécurisés sur le lieu de l'accident appartenant aux passagers et aux membres d'équipage.

Les données de référence disponibles pour les besoins de l'enquête étaient les suivantes:

- preuves conservées sur place ;
- données radar ;
- enregistrements GPS ;
- prises d'images, de vidéos et de son ;
- auditions ;
- documents des entreprises et autorités de surveillance impliquées, documents d'archive ;
- analyse technique de l'épave de l'avion ;
- examens approfondis et expertises techniques.

En dépit de l'absence de dispositif d'enregistrement résistant aux chocs à bord de l'avion, les données susmentionnées ont permis de reconstituer le déroulement de l'accident.

La reconstitution du vol en cause étant particulièrement laborieuse, les enquêteurs ont d'abord examiné l'épave en détail. Ces investigations ont fourni des informations sur les facteurs techniques à l'origine de l'accident et sur les risques systémiques en lien avec l'exploitation de vol et la maintenance de l'appareil. Elles ont révélé certains déficits de sécurité systémiques. C'est pourquoi, le SESE a publié le 20 novembre 2018 un rapport intermédiaire accompagné d'une recommandation et d'un avis de sécurité afin d'améliorer la sécurité aérienne déjà pendant l'enquête.

C'est dans le même but qu'au mois de septembre 2019, le SESE a informé les responsables de la compagnie de transport aérien Ju-Air, les organismes de maintenance et l'Office fédéral de l'aviation civile (OFAC), des résultats disponibles à ce stade de l'enquête et des déficits de sécurité constatés. Le SESE voulait ainsi offrir à ces organisations la possibilité de prendre des mesures efficaces pour améliorer la sécurité sans attendre la fin de l'enquête.

Le présent rapport final est publié par le SESE.

Présentation succincte de l'accident

L'avion de transport historique Junkers Ju 52/3m g4e, immatriculé HB-HOT et exploité par la compagnie Ju-Air, a décollé de l'aérodrome de Locarno le 4 août 2018 à 16h14 à destination de l'aérodrome militaire de Dübendorf. Environ 40 minutes plus tard, alors qu'il suivait un cap nord-nord-est, l'appareil s'écrasait dans une vallée encaissée au sud-ouest du Piz Segnas. Parvenu à l'extrémité nord de la vallée, il a effectué un virage vers la gauche, avant de s'engager dans une spirale descendante. Il a percuté le sol quelques secondes plus tard au terme d'une chute presque verticale. Les 20 personnes à bord de l'appareil sont décédées et l'appareil a été détruit.

Causes

Cause directe

L'accident est dû au fait qu'après avoir perdu le contrôle de l'avion, il n'y avait pas assez d'espace pour le redresser et il est entré en collision avec le terrain.

L'enquête a déterminé les facteurs causaux suivants:

- Les membres de l'équipage ont pris de grands risques[1] en volant dans une vallée encaissée à faible altitude et sans changement de trajectoire possible.
- Les membres de l'équipage ont opté pour une vitesse de vol dangereusement faible par rapport à la trajectoire de vol.

Ces deux facteurs ont eu pour effet que les turbulences, auxquelles il faut s'attendre dans de telles situations, ont non seulement conduit à un bref décrochage (*stall*) avec perte de contrôle, mais aussi à une situation sans issu.

Facteurs contributifs directs

L'enquête a déterminé les facteurs contributifs directs suivants:

- L'équipage était habitué à passer outre les règles de sécurité reconnues et à prendre des risques élevés.
- Le centre de gravité de l'avion se situait au-delà de la limite de centrage arrière, ce qui a favorisé la perte de contrôle.

[1] Pour la signification des termes "audacieux", "risqué" et "à haut risque" en ce qui concerne le choix de la trajectoire de vol, voir les chapitres A1.18.5 et A1.18.4.

Cause systémique

L'enquête a déterminé la cause systémique suivante:

- Les conditions requises pour une exploitation commerciale de l'appareil n'étaient pas remplies compte tenu de la base juridique applicable au moment de l'accident.

Facteurs contributifs systémiques

L'enquête a déterminé les facteurs contributifs systémiques suivants:

- Compte tenu des moyens de travail défaillants, le calcul de la masse et du centre de gravité des Ju 52 de l'entreprise de transport aérien ne pouvaient pas être réalisés correctement.
- Lors des vols sur Ju 52, les membres d'équipage de la compagnie aérienne ayant suivi une formation de pilote militaire, notamment, avaient l'habitude d'enfreindre systématiquement les règles reconnues de la navigation aérienne et de prendre des risques élevés.
- L'entreprise de transport aérien n'a pas été en mesure d'identifier et d'éliminer les défauts et risques relevés pendant les vols ainsi que les infractions aux règlements, souvent commises par ses équipages.
- Comme de nombreux incidents et plusieurs événements graves n'ont pas été signalés aux autorités et services compétents, ceux-ci n'ont pas pu introduire des mesures de renforcement de la sécurité.
- L'autorité de surveillance n'a parfois pas été en mesure d'identifier les nombreux défauts et risques liés aux opérations aériennes ainsi que d'intervenir de manière efficace en faveur de leur élimination.

Autres risques

L'enquête a déterminé les facteurs de risque *(factors to risk)* suivants. Bien que leur impact sur la survenance de l'accident n'ait pas pu être démontré, ceux-ci doivent néanmoins être éliminés pour améliorer la sécurité des opérations aériennes.

- L'état technique de l'avion n'était pas réglementaire.
- L'appareil n'atteignait plus les performances de vol initialement attestées.
- La maintenance des avions de l'entreprise de transport aérien n'était pas organisée de manière efficace.
- La formation des équipages aux exigences spécifiques des opérations aériennes et au CRM (*Crew Resource Management*) était insuffisante.
- Les équipages n'étaient pas familiers de toutes les situations critiques pouvant survenir lors d'un décrochage.
- L'autorité de surveillance n'a pas identifié et corrigé les nombreux défauts techniques.
- Les connaissances spécifiques des personnes engagées par la compagnie aérienne, les entreprises de maintenance et l'autorité de surveillance étaient partiellement insuffisantes.

Recommandations de sécurité et avis concernant la sécurité

Le rapport intermédiaire du 20 novembre 2018 a formulé une recommandation et un avis de sécurité. Le présent rapport final émet sept recommandations de sécurité et six avis concernant la sécurité.

1 Faits

1.1 Situation avant les faits et déroulement du vol

1.1.1 Situation avant les faits

Dans la matinée du 3 août 2018, la compagnie Ju-Air a entamé un voyage découverte de deux jours, au départ de Dübendorf au nord des Alpes et à destination du canton du Tessin sur le versant sud des Alpes. Le vol aller du vendredi et le vol retour du samedi devaient s'effectuer à bord de l'avion de transport historique Junkers Ju 52/3m g4e, immatriculé HB-HOT, dans le cadre d'un transport aérien commercial (*Commercial Air Transport* – CAT) et selon les règles de vol à vue (*Visual Flight Rules* – VFR). Les deux vols étaient assurés par les pilotes A et B qui assumaient alternativement les fonctions de commandant de bord et de pilote aux commandes (*Pilot Flying* – PF) d'une part, et de copilote et pilote assistant (*Pilot Monitoring* – PM) d'autre part.

Le plan de vol opérationnel (*Operational Flight Plan*) a été établi par le pilote A à l'aide du logiciel de planification des vols de la compagnie Ju-Air. Le calcul de la masse et du centre de gravité faisait partie de ce travail de préparation du vol. Il a été réalisé de manière incomplète et faussé par d'autres erreurs systémiques. Le plan de vol établi reposait pour le décollage à Dübendorf sur une masse de 9965 kg et un centre de gravité à 1,99 m derrière le bord d'attaque de l'aile. Au décollage à Dübendorf, la valeur reconstituée de la masse était de 9714 kg et le centre de gravité se trouvait à 2,098 m derrière le bord d'attaque de l'aile. Selon le constructeur de l'avion, la limite de centrage arrière se trouvait à 2,060 m derrière le bord d'attaque de l'aile (cf. annexes A1.1 et A1.6).

Une fois les passagers arrivés sur place et leurs bagages chargés dans l'avion, le HB-HOT a décollé à 8h59 de l'aérodrome militaire de Dübendorf (LSMD) pour un survol des Alpes à destination de l'aérodrome de Locarno. À bord de l'appareil se trouvaient 17 passagers, une hôtesse de l'air, le pilote B, commandant de bord et *pilote aux commandes,* et le pilote A qui l'assistait en tant que copilote/pilote assistant

Le vol au départ de Dübendorf a tout d'abord survolé Wädenswil, puis est passé à proximité du Rigi dans une direction sud-ouest et a poursuivi vers la région de Rosenlaui (cf. Figure 1). L'appareil a ensuite atteint une altitude de 2990 m/M. À 9h37, l'équipage du HB-HOT a manœuvré en direction de la paroi rocheuse du Ritzlihorn de sorte que l'appareil s'en est approché jusqu'à 30 - 50 m. Par la suite, l'avion est passé à proximité de différents reliefs lors du survol du col du Grimsel et à travers la région du Cristallina. Après une descente le long de la vallée de la Maggia, le HB-HOT s'est finalement posé à 10h13 à l'aérodrome de Locarno (cf. annexe A1.1).

Les deux pilotes avaient accepté de réaliser les vols de ce voyage de deux jours à la condition que la compagnie aérienne prenne en charge leur transport aérien le 3 août 2018 vers le nord de la Suisse, puis le 4 août 2018 vers Locarno. La direction de la compagnie Ju-Air ayant accepté ces conditions, le pilote A qui, en qualité d'instructeur, avait commencé à initier un élève-pilote au type d'appareil Robin DR400 le 1er août 2018, a saisi cette occasion pour poursuivre cette formation. C'est ainsi que l'élève-pilote du pilote A a décollé seul à bord d'un avion à moteur Robin DR400/140 B le 3 août 2018 à 9h00 depuis l'aérodrome de Lommis dans le nord-est de la Suisse (LSZT) à destination de Locarno, où il a atterri peu avant l'arrivée de l'appareil HB-HOT.

À 10h52, l'élève-pilote du pilote A, le pilote A en tant qu'instructeur, et le pilote B en tant que passager, ont décollé pour un vol à vue à destination de Lommis où ils ont atterri à 11h45.

Les deux pilotes du HB-HOT ont passé le reste de la journée dans le nord de la Suisse. Pendant ce temps, les 17 passagers et l'hôtesse de l'air, qui leur a également servi de guide touristique, ont suivi le programme de leur voyage découverte au sol.

Selon les indications de leurs familles, les deux pilotes ont passé une bonne nuit de sommeil et se sont levés vers 7h00 le 4 août 2018.

Le pilote B s'est ensuite rendu à l'aérodrome militaire de Dübendorf où il a effectué pour la compagnie Ju-Air trois vols touristiques aux commandes d'un avion jumeau du HB-HOT, entre Dübendorf et les Alpes. Lors de ces trois vols, l'équipage a manœuvré l'avion de manière à voler dans les montagnes plusieurs fois bien en dessous de la surélévation de sécurité d'au moins 1000 ft AGL (300 m/G). En outre, les principes essentiels pour un vol en montagne en toute sécurité n'ont pas été respectés. À ce moment-là, ce n'était pas le pilote A qui assurait la fonction de copilote, mais un autre pilote de la compagnie Ju-Air.

Le pilote A et son élève-pilote ont décollé à 13h30 de Lommis à bord d'un avion à moteur Robin DR400/140 B pour rejoindre Dübendorf, où ils ont atterri à 13h42. Sur place, ils ont récupéré le pilote B qui venait d'achever son troisième vol touristique et ont décollé à 13h55 de Dübendorf à destination de Locarno. Ils ont survolé les Alpes en direction du sud via la vallée de la Muota et le col du Lukmanier à une altitude de 9500 pieds AMSL[2] (2900 m/M). Pendant le vol, les pilotes A et B ont discuté de l'itinéraire pour le retour avec le HB-HOT. Ils se sont entendus sur un itinéraire d'une longueur correspondant à la durée indiquée dans les consignes de vol. Les pilotes A et B ne sont pas davantage rentrés dans les détails. À 14h38, le Robin DR400/140 a atterri à Locarno. Ensuite, les pilotes A et B se sont rendus dans les bureaux de la direction de l'aérodrome où ils se sont assurés que le décollage du HB-HOT s'effectuerait sur la piste en dur, afin de tenir compte des obstacles en bout de piste et de la température élevée de l'air ambiant. Ensuite, les deux pilotes ont préparé l'appareil pour le vol retour vers Dübendorf. Vers 15h45, les passagers sont arrivés à l'aérodrome de Locarno et les pilotes ont réparti leurs bagages à différents endroits de l'avion.

Le pilote A avait d'ores et déjà établi la veille le plan de vol opérationnel pour le vol de retour. Ce calcul de la masse et du centre de gravité a également été réalisé de manière incomplète et faussé par d'autres erreurs systémiques.

Le plan de vol établi pour le décollage à Locarno reposait sur une masse de 9737 kg et sur un centre de gravité à 1,98 m derrière le bord d'attaque de l'aile. Au décollage à Locarno, la valeur reconstituée de la masse était de 9387 kg et le centre de gravité se trouvait à 2.077 m derrière le bord d'attaque de l'aile. La limite de centrage arrière se trouvait à 2,060 m derrière le bord d'attaque de l'aile (cf. annexes A1.1 et A1.6).

Le HB-HOT disposait d'environ 1140 litres de carburant dans ses réservoirs, ce qui correspond à une autonomie (*endurance*) d'environ trois heures.

[2] AMSL: *Above mean sea level*, au-dessus du niveau moyen de la mer

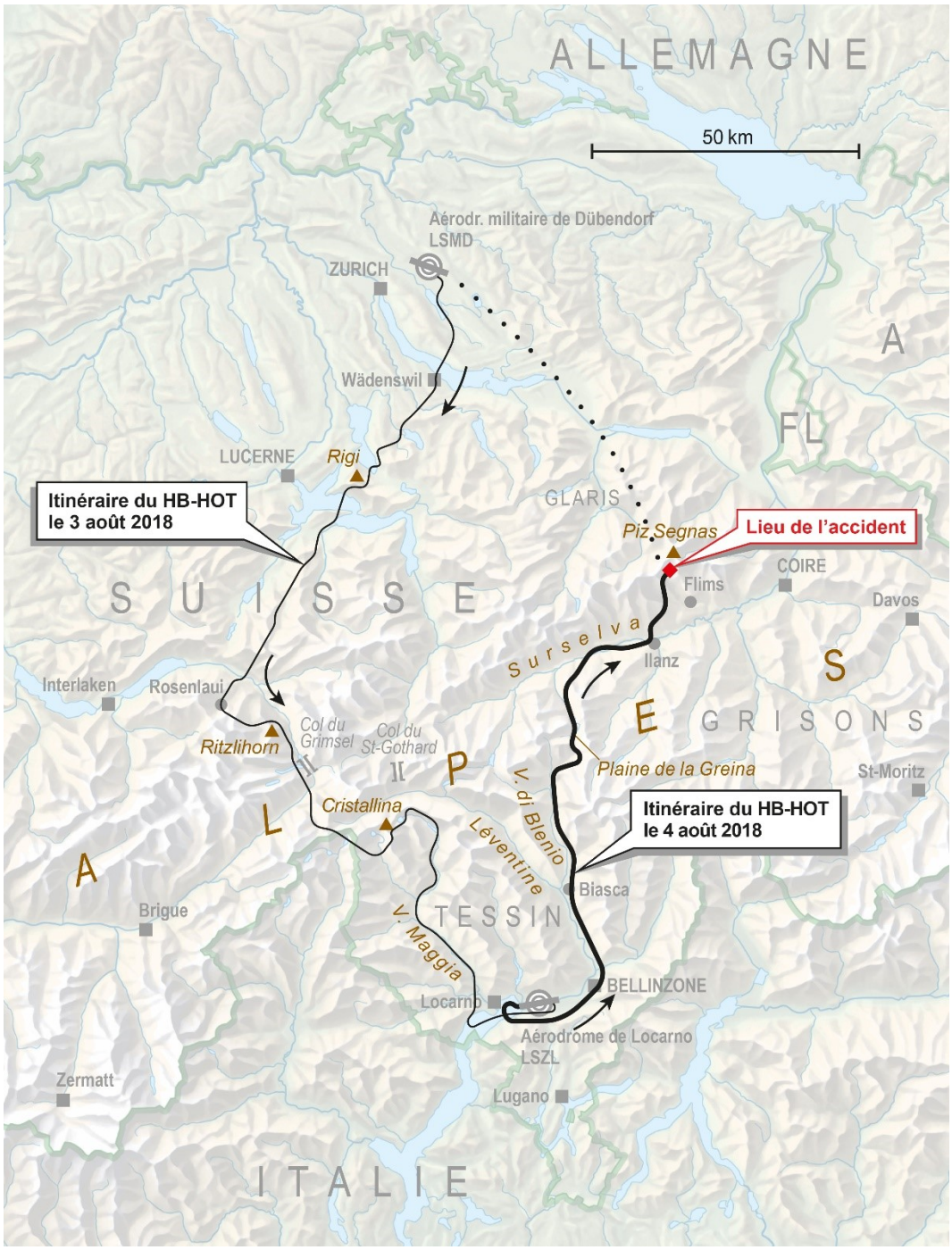

Figure 1: aperçu du déroulement du vol le 3 août 2018 de l'aérodrome militaire de Dübendorf à l'aérodrome de Locarno et du vol analysé le 4 août 2018. Source de la carte de base: carte du relief de l'Office fédéral de topographie.

1.1.2 Déroulement du vol

L'avion de transport historique Junkers Ju 52/3m g4e, immatriculé HB-HOT et exploité par la compagnie Ju-Air, a décollé de l'aérodrome de Locarno (LSZL) le 4 août 2018 à 16h14 pour un vol à vue commercial à destination de Dübendorf (LSMD). Au cours de ce vol, le pilote A était aux commandes sur le siège gauche du cockpit, tandis que le pilote B l'assistait en tant que copilote sur le siège de droite.

Après le décollage sur la piste en dur 26R vers l'ouest et un demi-tour au-dessus du Lac majeur, l'avion a poursuivi son vol vers la vallée de Blenio via Bellinzone et Biasca, ne cessant de gagner en altitude. Au nord d'Olivone, l'avion a tourné vers la vallée du lac de Luzzone, entrant ainsi dans la zone de calme Adula/Greina/Medels/Vals. Il a survolé cette dernière à une altitude oscillant entre 120 et 300 m au-dessus du sol et, dans certaines phases, à faible distance latérale du relief.

À 16h45, alors que l'avion survolait l'alpage de Nadels, l'hôtesse de l'air a envoyé un SMS à une amie à Ruschein (commune d'Ilanz) pour lui indiquer qu'elle s'apprêtait à survoler la localité en question à bord du Ju 52/3m g4e. Ensuite, le vol s'est poursuivi dans la région de Survelva vers l'est, à une d'altitude d'environ 2500 m/M. À 16h51, l'avion a survolé, dans la région d'Ilanz, la vallée du Rhin antérieur sur un cap nord-est, puis a amorcé un virage vers la gauche, relativement serré jusqu'à la localité de Ruschein. Par la suite, il a continué sa route vers le nord, longeant le Crap Sogn Gion en direction de la vallée encaissée au sud-ouest du Piz Segnas. L'avion s'est approché de la vallée encaissée tout d'abord dans la direction du vol par la gauche, le long de son versant ouest . À ce stade, le HB-HOT se trouvait en phase de montée jusqu'à atteindre une altitude de 2833 m/M dans la région de Nagens.

Lors du passage à proximité du refuge de montagne de Nagens (cf. figure 2), l'avion avait amorcé un virage légèrement à droite. Au cours de cette phase, à 16h55, l'un des deux pilotes s'est adressé aux passagers via les haut-parleurs en cabine et leurs écouteurs personnels pour les inviter à contempler le paysage.

À ce moment-là, l'avion volait à une vitesse de 165 km/h au-dessus du sol. Il a ensuite ralenti à 135 km/h jusqu'au point F2 et s'est maintenu à peu près à cette vitesse quasiment jusqu'au point F3.

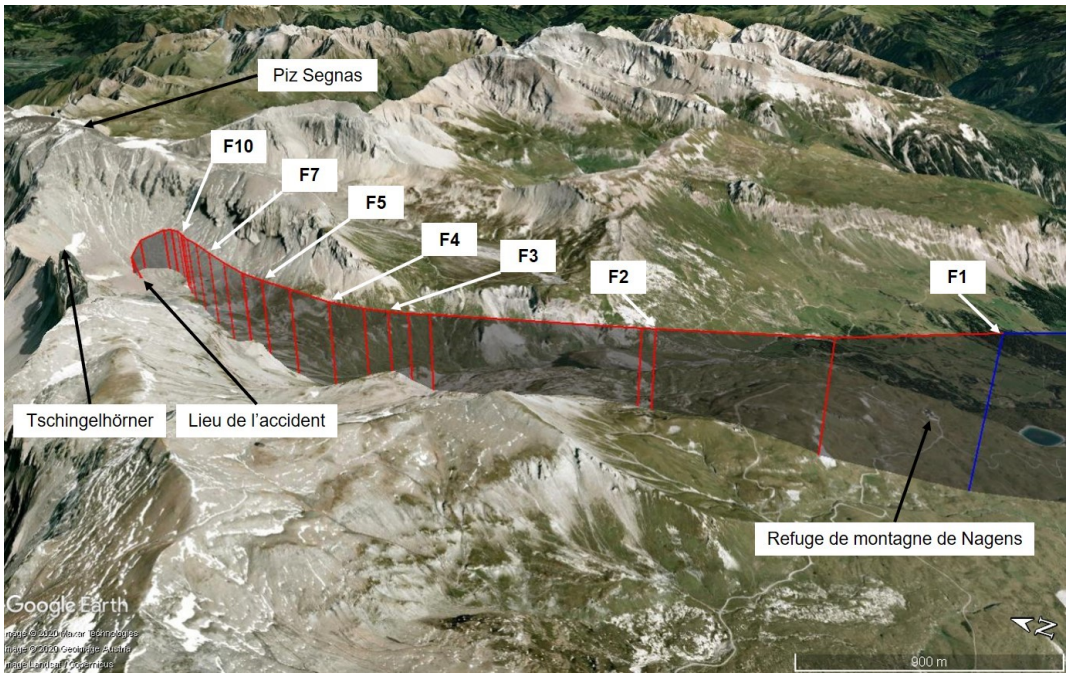

Figure 2: trajectoire reconstituée du HB-HOT (en rouge) lors du vol du 4 août 2018, du refuge de montagne de Nagens jusqu'au lieu de l'accident, représentée dans Google Earth. Le point F1 représente le premier des 29 points au total déterminés par photogrammétrie. Au point F1, l'avion volait à une altitude de 2833 m/M.

Alors qu'il se dirigeait vers le point F3, l'avion a légèrement perdu de l'altitude et augmenté brièvement sa vitesse au-dessus du sol d'environ 65 km/h pour atteindre 200 km/h. L'assiette[3] se trouvait à ce moment-là entre 5 et 7 degrés. Vers la fin de cette phase, peu avant le point F4, la pente[4] est passée de - 3 degrés à env. - 1 degré et le régime des trois moteurs n'a cessé de baisser à raison de 20 tours par minute. Au niveau du point F4, l'appareil se trouvait à une altitude de 2742 m/M.

À 16:56:02, juste après le point F4, le régime des trois moteurs a augmenté à raison de 40 tours par minute. À 16:56:09, le HB-HOT a pénétré dans la vallée encaissée au sud-ouest du Piz Segnas (point F5, cf. également figure 14) à une altitude de 2755 m et se trouvait donc à 130 m au-dessus du col. L'avion a ensuite suivi une ligne quasiment centrale orientée nord/nord-est. Au cours de cette phase, le HB-HOT est légèrement remonté, avec une pente d'environ 2 degrés et une assiette toujours comprise entre 5 et 7 degrés. À 16:56:17, au niveau du point F7, l'avion a atteint une altitude de 2767 m/M et se trouvait ainsi à 140 m au-dessus du col de Segnas.

Le HB-HOT longeait les Tschingelhörner lorsqu'il a amorcé une descente, à raison de plus de 15 m en 6 secondes. Pendant cette phase, la puissance des moteurs a été rapidement réduite de 30 à 50 tours par minute, ce qui signifie que les régimes des moteurs se situaient de plus en plus dans une fourchette étroite [5]. Au cours de cette opération, l'assiette a augmenté tandis que la pente a baissé en continu jusque dans le négatif.

L'équipage a amorcé un virage vers la droite pendant la descente, alors que l'avion occupait une position à peu près perpendiculaire au Martinsloch et se trouvait à une altitude d'environ 2766 m/M (point F8), puis un virage vers la gauche (point F109, cf. figure 5). La vitesse de vol avoisinait alors les 170 km/h et la différence entre l'assiette et la pente a augmenté à environ 15 degrés pendant le virage vers la droite. Au moment d'engager le virage vers la gauche (entre les points F9 et F10), l'assiette était d'environ 11 degrés et la pente d'environ - 10 degrés. À ce moment précis, l'avion se trouvait environ 125 m au-dessus du col de Segnas (cf. figure 3).

[3] Assiette (*pitch attitude, pitch angle, pitch*): angle formé par l'axe longitudinal de l'avion et l'horizontale dans le système de coordonnées géodésiques. Des valeurs positives correspondent à un angle supérieur à l'axe horizontal (*angle nose-up*), tandis que des valeurs négatives correspondent à un angle inférieur à l'axe horizontal (*angle nose-down*). Cf. figures 22 et 23. Les valeurs de mesure détaillées figurent dans les graphiques au chapitre 1.11.2.

[4] Pente (*flight path angle* – FPA): angle formé par la trajectoire de l'avion et l'horizontale dans le système de coordonnées géodésiques. Des valeurs négatives correspondent à un angle inférieur à l'axe horizontal, soit une trajectoire descendante; des valeurs positives correspondent à un angle supérieur à l'axe horizontal, soit une trajectoire ascendante. Cf. figures 22 et 23. Les valeurs de mesure détaillées figurent dans les graphiques au chapitre 1.11.2.

[5] Cette opération est typique lorsque les régimes moteurs doivent être synchronisés.

Figure 3: image fixe d'un enregistrement vidéo au point F10, réalisé par un passager du HB-HOT dans l'axe visuel du Martinsloch (flèche rouge). L'assiette est de 11,0 degrés, l'angle d'inclinaison latérale de 4,8 degrés vers la gauche et l'altitude de 2749 m/M. La différence entre la pente et l'assiette est de 20,6 degrés.

Pendant les quatre secondes qui ont suivi, l'avion est descendu de 25 m et l'angle négatif de la pente s'est accentué, comme le montrent clairement la comparaison entre la figure 3 et figure 4, ainsi que la figure 5.

Figure 4: image fixe d'un enregistrement vidéo au point F13, réalisé par un passager du HB-HOT dans l'axe visuel du Martinsloch (flèche rouge) 4,3 secondes après l'enregistrement à la figure 3. L'assiette est de 12,1 degrés, l'angle d'inclinaison latérale de 32,7 degrés vers la gauche et l'altitude de 2724 m/M.

Après le point F13, le mouvement de roulis à gauche s'est accentué en continu et n'a pas non plus diminué lorsqu'il y a eu un débattement significatif des ailerons vers la droite. Les ailerons ont alors été remis en position neutre, puis braqués provisoirement pour un virage vers la gauche.

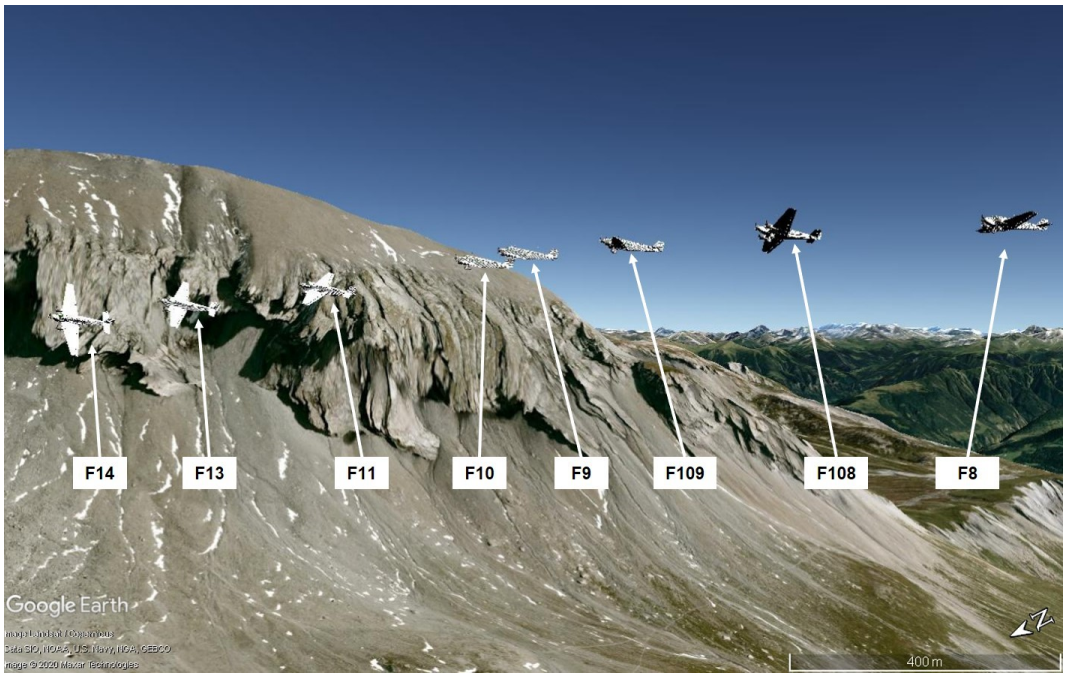

Figure 5: attitude de vol reconstituée par photogrammétrie à différentes positions, représentée dans Google Earth. Afin de mieux visualiser l'avion, sa taille a été multipliée par deux.

Parallèlement, l'assiette a commencé à se réduire alors que la trajectoire s'orientait de plus en plus vers le bas et l'inclinaison vers la gauche s'accentuait (cf. figure 6).

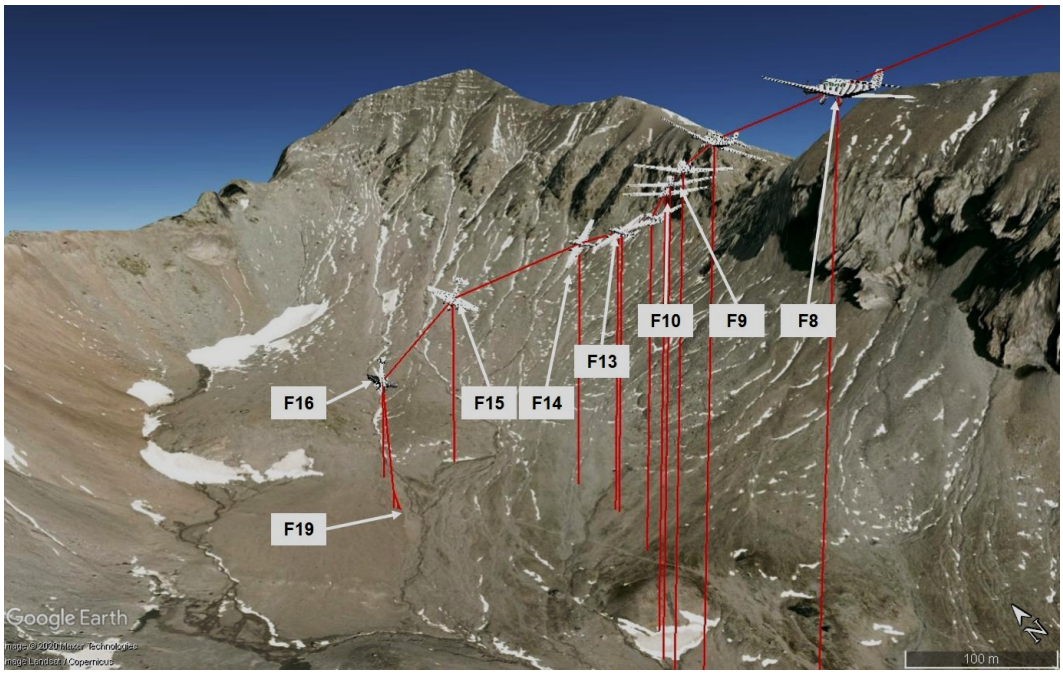

Figure 6: trajectoire reconstituée par photogrammétrie du vol du HB-HOT le 4 août 2018 (en rouge) entre le point F8 et le lieu de l'accident (F19) avec le Piz Segnas au fond, représentée dans Google Earth. Afin de mieux visualiser l'avion, sa taille a été multipliée par 2,5.

Pendant cette dernière phase de vol, l'avion a subi des vibrations à basse fréquence. Alors que l'avion ne se trouvait plus qu'à 108 m au-dessus du sol (point

F16, cf. figure 6 et figure 7), son axe longitudinal était de 68 degrés vers le bas par rapport à l'horizontale. À ce moment précis, le gouvernail de profondeur affichait une déviation d'environ 13 degrés vers le haut et le gouvernail de direction était dévié de 2 degrés vers la droite.

Figure 7: image du HB-HOT au point F16 avec modèle tridimensionnel superposé d'un Ju 53/3m g4e de construction identique (en bleu clair) afin de déterminer les angles d'attitude, le fléchissement des ailes et les débattements des ailerons. L'axe visuel est orienté nord-est, avec au fond les contreforts sud du Piz Segnas.

Par rapport au début du décrochage en vrille, les régimes des trois moteurs avaient légèrement augmenté pour atteindre entre 1720 et 1750 tours par minute juste avant le crash.

Le mouvement de roulis à gauche s'est fortement accentué au cours de cette phase. L'avion s'est écrasé peu après 16h57 en position verticale, selon une trajectoire quasiment verticale, à une vitesse d'environ 200 km/h (cf. figure 8).

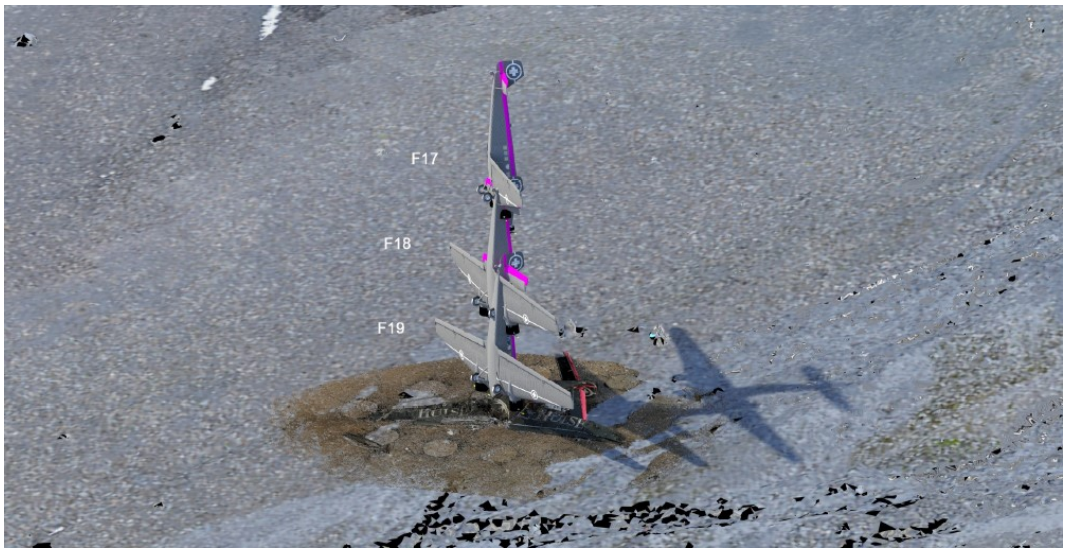

Figure 8: positions géographiques et attitudes de vol du HB-HOT reconstituées avant le crash aux points F17, F18 et F19. Le modèle tridimensionnel d'un Ju 52/3m g4e de construction identique est représenté dans le modèle numérique de terrain en 3D reconstitué avec un axe visuel vers le nord. La position finale de l'épave et les décombres sont représentés sous forme schématique.

Les 20 personnes à bord de l'appareil ont péri au moment de l'accident et l'appareil a été entièrement détruit. Aucun incendie ne s'est déclaré.

Des reconstitutions ont montré que le centre de gravité du HB-HOT se trouvait au moment de l'accident à 2,071 m derrière le bord d'attaque de l'aile (cf. annexe A1.6). Sur les photos et vidéos de l'intérieur du HB-HOT, rien n'indique que des personnes se soient déplacées dans l'avion ou que des personnes n'étaient pas assises à leur place pendant l'entrée dans la vallée au sud-ouest du Piz Segnas et jusqu'au début de la descente en spirale. Une description détaillée de la reconstitution de la trajectoire de l'avion, ainsi qu'une représentation graphique des paramètres déterminants entre la position F1 et le lieu de l'accident figurent au chapitre 1.11.2. Des informations détaillées complémentaires sur la situation avant les faits et le déroulement du vol sont disponibles à l'annexe A1.1.

1.1.3 Lieu et heure de l'accident

Date et heure	4 août 2018, à 16h57
Conditions d'éclairage	Jour
Coordonnées[6]	195 793 / 736 424 (*Swiss Grid* 1903) N 46° 53' 57'' / E 009° 13' 45'' (WGS[7] 84)
Altitude[8]	2475 m/M correspondent à 8120 pieds AMSL

1.2 Dommages corporels

Blessures	Membres d'équipage	Passagers	Nombre total de personnes à bord	Tierces personnes
Mortelles	3	17	20	0
Graves	0	0	0	0
Légères	0	0	0	0
Néant	0	0	0	Sans objet
Total	3	17	20	0

1.3 Dommages à l'aéronef

L'appareil a été entièrement détruit.

1.4 Autres dommages

Les dégâts au sol sont faibles.

1.5 Renseignements sur les personnes

1.5.1 Équipage

1.5.1.1 Pilote A

Personne	Homme, né en 1955

[6] Les coordonnées indiquées correspondent à la position finale du moteur central et donc approximativement de la projection verticale du centre spatial de toutes les parties de l'épave.

[7] WGS: *World Geodetic System*, système géodésique mondial: sur décision de l'Organisation de l'aviation civile internationale (*International Civil Aviation Organization* – ICAO), la norme WGS 84 a été reprise en 1989 pour le secteur aéronautique.

[8] Altitude, conformément à la carte nationale de la Suisse.

Fonctions exercées au cours du vol considéré	Commandant de bord, pilote aux commandes (*Pilot Flying* – PF)	
Licence	Licence de pilote de ligne (*Airline Transport Pilot Licence Aeroplane* – ATPL(A)), conformément à l'Agence européenne de la sécurité aérienne (AESA), délivrée pour la première fois le 20 mai 1992 par l'Office fédéral de l'aviation civile (OFAC).	
Expérience de vol	Total	20 714 h
	Sur le type en cause	297 h [(A)]
	Au cours des 90 derniers jours	90h02
	Dont sur le type en cause	42h50

[(A)] heures de vol réelles uniquement (sans roulage avant et après le vol)

Au cours des deux derniers mois ayant précédé l'accident, le pilote A effectué au total 33 vols sur le type en cause, dont 28 avec le pilote B, à ses côtés au cours du vol considéré.

Au cours des mois et années précédant l'accident, divers vols critiques pour la sécurité sont documentés, au cours desquels le pilote A faisait partie de l'équipage et durant lesquels des hauteurs de sécurité[9] ont été ignorées ou des risques élevés ont été pris. D'avril 2018 au jour de l'accident inclus, au moins six vols de la catégorie de risque 8 à 10 (cf. chapitre A1.18.4) ont été enregistrés. Le pilote B était à ses côtés dans quatre cas. Le 6 juillet 2018, le pilote A aux commandes du Junkers Ju 52/3m g4e, immatriculé HB-HOT, et le pilote B en tant que copilote ont survolé l'agglomération de Munich à une altitude largement en deçà des prescriptions minimales (cf. chapitre A1.17.1.18.6).

Au cours de la dernière évaluation en vol du pilote A dans le cadre du contrôle en ligne (*line check*) du 7 avril 2018, les hauteurs de sécurité définies dans le guide VFR de la publication d'information aéronautique (*Aeronautical Information Publication* – AIP) n'ont clairement pas été respectées. En outre, aucune attention n'a été accordée aux principes essentiels pour la sécurité du vol en montagne. Ce règlement se trouve dans l'AIP depuis 1981 et figurait dans le guide VFR sous RAC 6-3[10] au moment de l'accident (cf. chapitre A1.17.6.2.2). Le *Training Captain* de la compagnie aérienne, qui était également instructeur de qualification de type[11] et examinateur[12] sur Ju 52, a considéré que le pilote A avait effectué un vol «bon à très bon» (*standard to high standard*). Le choix de la trajectoire a été décrit comme *«adapté»* et *«raisonnable»*.

Des indications complémentaires sur la formation et les événements déterminants dans la carrière du pilote A figurent à l'annexe A1.5.

[9] Le terme "hauteur de sécurité" a été délibérément choisi pour désigner la hauteur nécessaire à la sécurité de la conduite d'un vol. Selon la situation, il peut s'agir au moins de la hauteur minimale légale ou d'une hauteur de sécurité suffisante en vol de montagne.

[10] Au moment de la publication du présent rapport final, ce règlement figurait dans le manuel VFR de l'AIP sous la référence RAC 4-5-2.

[11] Instructeur de qualification de type (*Type Rating Instructor* – TRI)

[12] Examinateur de qualification de type (*Type Rating Examiner* – TRE). En fonction de leurs besoins, les compagnies aériennes ou les centres de formation s'adressent à l'Office fédéral de l'aviation civile afin de pouvoir nommer des experts appropriés en tant qu'examinateurs. Ces experts sont également appelés "examinateurs pour les licences de pilote" ou "examinateurs". L'OFAC nomme les experts, les forme et contrôle leurs activités. En tant qu'experts en matière d'examens, ces derniers veillent à ce que les normes de formation prescrites au niveau national et international soient respectées et maintenues par les pilotes.

1.5.1.2 Pilote B

Personne	Homme, né en 1956	
Fonctions exercées au cours du vol considéré	Copilote, pilote assistant (*Pilot Monitoring* – PM)	
Licence	Licence de pilote de ligne (*Airline Transport Pilot Licence Aeroplane* – ATPL(A)) conformément à l'Agence européenne de la sécurité aérienne (AESA), délivrée pour la première fois le 17 septembre 1992 par l'Office fédéral de l'aviation civile (OFAC).	
Expérience de vol	Total	19 751 h
	Sur le type en cause	945 h[(A)]
	Au cours des 90 derniers jours	60h45
	Dont sur le type en cause	52h17

[(A)] heures de vol réelles uniquement (sans roulage avant et après le vol)

Au cours des deux derniers mois ayant précédé l'accident, le pilote B a effectué au total 41 vols sur le type en cause, dont 28 avec le pilote A, à ses côtés au cours du vol considéré.

Au cours des mois et années précédant l'accident, divers vols critiques pour la sécurité sont documentés, au cours desquels le pilote B faisait partie de l'équipage et durant lesquels des hauteurs de sécurité[13] ont été ignorées ou des risques élevés ont été pris. D'avril 2018 au jour de l'accident inclus, au moins six vols de la catégorie de risque 8 à 10 (cf. chapitre A1.18.4) ont été enregistrés. Le pilote A était à ses côtés dans quatre cas.

Au cours de la dernière évaluation en vol du pilote B dans le cadre du contrôle en ligne (*line check*) du 12 mai 2018, les hauteurs de sécurité définies dans le guide VFR de la publication d'information aéronautique (*Aeronautical Information Publication* – AIP) n'ont clairement pas été respectées. En outre, aucune attention n'a été accordée aux principes essentiels pour la sécurité du vol en montagne. Ce règlement se trouve dans l'AIP depuis 1981 et figurait dans le guide VFR sous RAC 6-3 au moment de l'accident (cf. chapitre A1.17.6.2.2). Le *Training Captain* de la compagnie aérienne, qui était également instructeur au sol (*Ground Instructor*), a considéré que le pilote B avait effectué un vol «très bon» (*high standard*). Le choix de trajectoire a été décrit comme *«responsable»* et *«prévoyant»*.

Le 6 juillet 2013, le pilote B, aux commandes de l'avion jumeau HB-HOP, avec le pilote A à ses côtés qui officiait encore comme copilote à l'époque, est entré dans la vallée encaissée au sud-ouest du Piz Segnas dans une phase de montée similaire à celle du jour de l'accident et a survolé la crête du col de Segnas à une hauteur de 30 m environ (cf. figure 9).

[13] Le terme "hauteur de sécurité" a été délibérément choisi pour désigner la hauteur nécessaire à la sécurité de la conduite d'un vol. Selon la situation, il peut s'agir au moins de la hauteur minimale légale ou d'une hauteur de sécurité suffisante en vol de montagne.

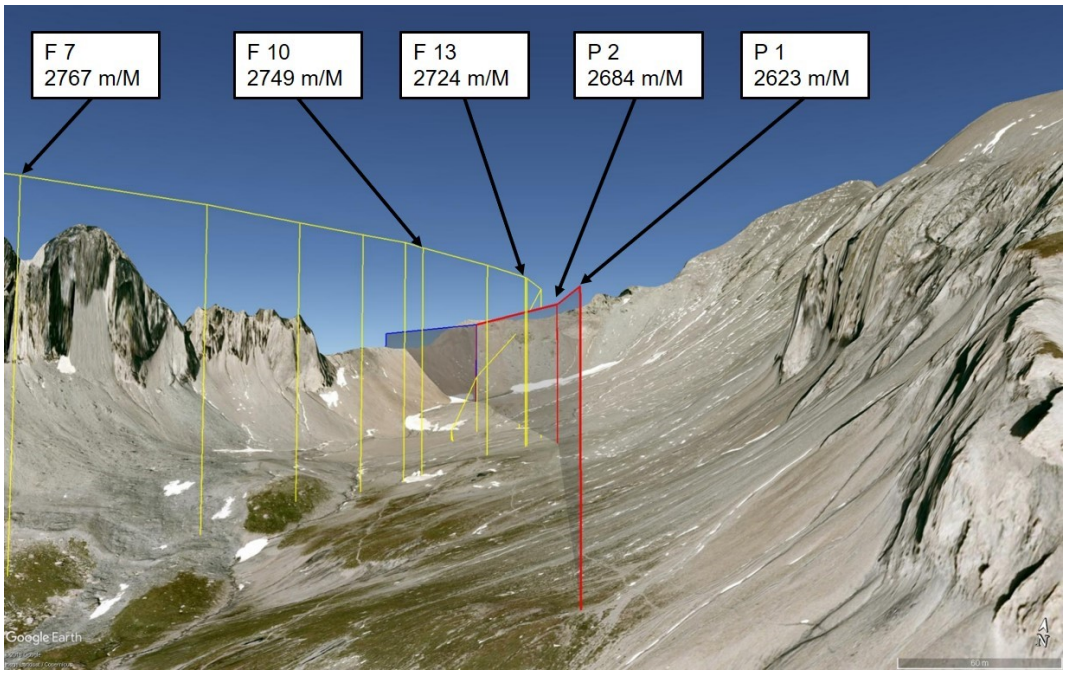

Figure 9: comparaison des trajectoires reconstituées du vol du 6 juillet 2013 (en rouge, points désignés par la lettre P) avec prolongation de la trajectoire (en bleu) et du vol considéré du 4 août 2018 (en jaune, points désignés par la lettre F). Représentée dans Google Earth.

Sur ce vol il n'aurait pas été possible de faire demi-tour ni changer de trajectoire dans la partie nord du bassin de la vallée encaissée au sud-ouest du Piz Segnas.

Des indications complémentaires sur la formation et les événements déterminants dans la carrière du pilote B figurent à l'annexe A1.5.

1.5.2 Équipage de cabine

1.5.2.1 Hôtesse de l'air

Personne	Femme, née en 1952
Fonctions exercées au cours du vol considéré	Hôtesse de l'air (*In-flight Service Personnel,* personnel navigant commercial (PNC))

1.5.3 Personnel de l'entreprise de transport aérien

Les personnes suivantes de l'entreprise de transport aérien Ju-Air cités ont fait l'objet d'une enquête afin de déterminer leur rôle systémique dans la survenance de l'accident:

- Responsable d'exploitation (*Accountable Manager*) ;
- Responsable des opérations en vol (*Nominated Person Flight Operation* – NPFO) ;
- Responsable des opérations au sol (*Nominated Person Ground Operations* – NPGO) ;
- Responsable du maintien de la navigabilité (*Nominated Person Continuing Airworthines* – NPCA) ;
- Responsable de la sécurité et de la qualité (*Safety Manager* – SM) et *Compliance Monitoring Manager* (CMM).

De plus amples informations sur la fonction et sur les qualifications du personnel de l'entreprise de transport aérien figurent à l'annexe A1.17.

1.5.4 Personnel des ateliers de maintenance

Les personnes suivantes des ateliers de maintenance de la compagnie Ju-Air et de l'entreprise Naef Flugmotoren AG ont fait l'objet d'une enquête afin de déterminer leur rôle systémique dans la survenance de l'accident:

- Responsable d'exploitation de la compagnie Ju-Air ;
- Responsable de la maintenance *(Aircraft Maintenance Manager)* de la compagnie Ju-Air ;
- Chef d'atelier *(Workshop Manager)* de la compagnie Ju-Air ;
- Directeur technique de l'entreprise Naef Flugmotoren AG ;
- Auditeur des deux entreprises.

Des informations sur la fonction et sur les qualifications du personnel des ateliers de maintenance figurent à l'annexe A1.17.

1.5.5 Personnel de l'Office fédéral de l'aviation civile

Les fonctions ci-dessous du personnel de l'Office fédéral de l'aviation civile, dans sa qualité d'autorité nationale de surveillance[14], ont fait l'objet d'une enquête afin de déterminer leur rôle systémique dans la survenance de l'accident:

- Direction de la surveillance opérationnelle ;
- Direction de la surveillance technique ;
- Inspecteurs des opérations aériennes ;
- Inspecteurs techniques.

Des indications sur le rôle de ces fonctions dans l'accident considéré figurent à l'annexe A1.17.

1.6 Renseignements sur l'aéronef

1.6.1 Historique

L'avion Junkers Ju 52/3m g4e, immatriculé HB-HOT, a été construit en 1939 en Allemagne en même temps que les deux avions identiques HB-HOS et HB-HOP par l'entreprise publique d'armement Junkers Flugzeug- und Motorenwerke AG (JFM). Cette année-là, la Confédération suisse a acheté ces trois avions pour ses troupes d'aviation et de défense contre avions[15]. À l'époque, le HB-HOT était un avion militaire immatriculé A-702 et devait servir à l'origine d'avion d'entraînement pour la formation des observateurs aériens et des opérateurs radio. La version achetée par la Suisse était équipée de trois moteurs en étoile à neuf cylindres du type BMW 132 A3, conçus pour une puissance nominale unitaire de 660 CV chacun[16]. Les trois avions Ju 52/3m g4e des troupes d'aviation ont été temporairement immatriculés comme appareils civils pour des missions à l'étranger. En 1981, les trois Junkers Ju 52/3m g4e ont été retirés des troupes d'aviation. Le HB-HOT comptait à ce moment-là 3545 heures de service.

[14] L'autorité de surveillance désigne l'autorité nationale ou supranationale responsable de l'octroi des homologations opérationnelles et techniques, ainsi que de la surveillance opérationnelle et technique des entreprises ou organisations correspondantes.

[15] Les troupes d'aviation et de défense contre avions de l'époque sont devenues les Forces aériennes le 1er janvier 1996.

[16] CV: cheval-vapeur, unité de mesure historique de la puissance, 1 CV équivaut à 0,736 kW.

L'association des amis du musée des Troupes d'aviation suisses (VFMF), créée en 1979, a commencé à utiliser le HB-HOS et le HB-HOP dès 1982, puis le HB-HOT à partir de 1985, pour effectuer des vols commerciaux. À cet égard, les troupes d'aviation ont confié le HB-HOT à l'association à titre de prêt permanent.

L'association des amis des Troupes de défense contre avions (VF Flab) et l'association des amis du musée des Troupes d'aviation suisses (VFMF) ont fusionné en 1997 pour former l'association des amis des Forces aériennes suisses (VFL). Celle-ci se consacre à l'entretien des avions militaires suisses et appareils similaires.

Sous le nom de «Ju-Air», la VFL était responsable des vols, de la maintenance des avions et de l'organisation de gestion du maintien de la navigabilité (*Continuing Airworthiness Management Organisation*).

Le fabricant et le détenteur du certificat de type avaient disparu depuis longtemps lors de la mise en service civile du type d'avion Ju 52/3m g4e par l'entreprise de transport aérien.

Au moment de l'accident, le Junkers Ju 52/3m g4e, immatriculé HB-HOT, comptait près de 10 189 heures de service.

1.6.2 Caractéristiques de vol

Le modèle Junkers Ju 52/3m g4e est généralement considéré comme un appareil robuste et agréable à piloter. Compte tenu de sa masse admissible au décollage et de la puissance nominale de ses trois moteurs, il affiche un rapport masse/puissance de 5,3 kg/CV. Il fait ainsi partie de la catégorie des avions de faible puissance, comparable à un Cessna 152 (rapport masse/puissance de 6,9 kg/CV) ou un Piper Super Club (rapport masse/puissance de 4,5 kg/CV à 5,4 kg/CV).

Les instructions d'origine du constructeur recommandent une vitesse de meilleur taux de montée indiquée de 140 km/h.

Conformément au manuel de vol de l'appareil, la vitesse de décrochage de ce modèle est de 107 km/h dans les conditions suivantes:

- la masse de l'appareil est de 9200 kg ;
- la puissance des trois moteurs équivaut à un régime de 1750 tours par minute ;
- les ailes auxiliaires sont rentrées.

Il résulte de ces indications qu'à une altitude de 2800 m/M dans des conditions équivalentes, l'angle d'incidence critique pour un décrochage en vol horizontal est atteint à une vitesse réelle de 125 km/h.

Aucune vitesse de manœuvre n'est indiquée dans le manuel de vol de l'avion. Pour une masse de vol de 9200 kg et une accélération normale de 2,5 g, celle-ci correspond à une vitesse indiquée calculée de 169 km/h. Dans ces conditions, cela correspond à une vitesse vraie de 197 km/h.

Conformément aux déclarations de pilotes expérimentés de l'entreprise de transport aérien, les caractéristiques de vol des trois avions jumeaux Junkers 52/3m g4e, immatriculés HB-HOP, HB-HOS et HB-HOT, ne diffèrent pas de manière significative. À l'approche d'un décrochage en vol rectiligne, les appareils Ju 52/3m g4e de la compagnie Ju-Air présentaient de légères vibrations (*buffeting*) et finissaient par décrocher. Il était possible de reprendre rapidement le contrôle de l'appareil en relâchant les commandes et en appuyant légèrement sur la gouverne de profondeur afin de réduire l'angle d'incidence. En cas de décrochage pendant un virage, les Junkers Ju 52/3m g4e était également connu pour basculer vers l'intérieur de la courbe du virage.

1.6.3 Caractéristiques de construction

Le modèle Ju 52/3m g4e était un avion entièrement composé de pièces métalliques, construit en treillis avec des panneaux de tôle ondulée. La majeure partie des pièces était fabriquée en aluminium et en acier. Les pièces en aluminium de la structure étaient composées de duralium, un alliage ultrarésistant. Les composants en acier étaient essentiellement des constructions soudées en tôle.

Les composants ont été rivetés ensemble. Les rivets utilisés étaient en duralium et en acier. Tous les composants étaient assortis d'une couche de protection anticorrosion. Lors de leur fabrication, les tôles des panneaux étaient recouvertes des deux côtés d'une fine couche d'alliage en aluminium plus résistante à la corrosion.

Le duralium est un alliage à base d'aluminium, de cuivre et de magnésium qui présente des valeurs de résistance élevées et de bonnes valeurs d'élasticité plastique. L'inconvénient de cet alliage réside dans sa résistance limitée à la corrosion, qui peut être toutefois renforcée au moyen d'une couche de protection adéquate et intacte. En cas de charge thermique, la résistance à la corrosion du matériau diminue sensiblement.

Des indications complémentaires sur les caractéristiques de construction et les données de performance, ainsi que des descriptions détaillées des systèmes de l'avion et des moteurs figurent à l'annexe A1.6.

1.6.4 Certificat de navigabilité et catégorie d'aéronefs

Pour que l'avion Ju 52/3m g4e, immatriculé HB-HOT, puisse être utilisé à des fins de transport commercial civil, l'Office fédéral de l'aviation civile (OFAC) a délivré le 21 août 1985 un certificat national de navigabilité (*Certificate of Airworthiness* – CofA) attestant la conformité avec la convention relative à l'aviation civile internationale du 7 décembre 1944. Ce certificat de navigabilité classait le HB-HOT dans la catégorie standard, sous-catégorie «Normal».

La Suisse fut également membre des Autorités conjointes de l'aviation (*Joint Aviation Authorities* – JAA) jusqu'au 1er décembre 2006. À cette époque, la catégorisation du HB-HOT est restée inchangée.

En vertu de l'accord sur le transport aérien, la Suisse est membre de l'autorité supranationale d'homologation et de surveillance, l'Agence européenne de la sécurité aérienne (AESA), depuis le 1er décembre 2006. En raison de son adhésion à l'accord aérien, la Suisse était soumise à l'application de différentes normes juridiques européennes. Conformément au règlement (UE) n° 216/2008[17] en vigueur à l'époque, les appareils Ju-52/3m g4e de la compagnie Ju-Air appartenaient à la catégorie d'aéronefs visés à l'annexe II, et plus précisément à la catégorie (a)(ii) («*Aéronefs présentant un intérêt historique manifeste*») et (d) («*Aéronefs qui ont été utilisés par les forces armées*»). Les aéronefs visés à l'annexe II étaient exclus du champ d'application de certains règlements européens. En revanche, leur exploitation et leur équipement dépendaient des règlements européens. S'agissant de la navigabilité et de la catégorisation correspondante, l'ordonnance nationale

[17] Règlement (CE) n° 216/2008 du Parlement européen et du Conseil du 20 février 2008 concernant des règles communes dans le domaine de l'aviation civile et instituant une Agence européenne de la sécurité aérienne, et abrogeant la directive 91/670/CEE du Conseil, le règlement (CE) n° 1592/2002 et la directive 2004/36/CE. Ce règlement a été abrogé peu après l'accident survenu le 4 août 2018. Le règlement suivant (UE) 2018/1139 du Parlement européen et du Conseil du 4 juillet 2018 est entré en vigueur le 11 septembre 2018 dans l'Union européenne, et le 1er septembre 2019 en Suisse. À cet égard, certains des aéronefs figurant à l'Annexe I appartenaient à la catégorie spéciale en Suisse. L'annexe II décrit désormais les exigences fondamentales en matière de navigabilité.

du DETEC[18] sur la navigabilité des aéronefs (ONAE, RS *748.215.1*) constituait la base légale applicable.

L'ONAE distingue les catégories de navigabilité standard et spéciales. Les aéronefs relevant de la catégorie standard doivent répondre aux exigences des règlements européens applicables à la Suisse et sont admis à la circulation via l'octroi d'un certificat de navigabilité (*Certificate of Airworthiness* – CofA).

Les aéronefs sont classés dans la catégorie spéciale lorsqu'ils ne satisfont pas aux exigences de la catégorie standard ou qu'ils n'y satisfont pas entièrement. Chaque aéronef relevant de la catégorie spéciale est affecté à une sous-catégorie et admis à la circulation moyennant la délivrance d'une autorisation de vol (*permit to fly*).

Comme les avions Junkers Ju 52/3m g4e de la compagnie Ju-Air ne satisfaisaient pas aux exigences européennes, ils auraient dû figurer dans la catégorie spéciale, sous-catégorie «Historique».

Néanmoins, l'Office fédéral de l'aviation civile a renouvelé le certificat de navigabilité de l'appareil Junkers Ju 52/3m g4e, immatriculé HB-HOT, du 21 août 1985. L'avion est resté classé dans la catégorie standard et le certificat de navigabilité a confirmé sa conformité avec la convention relative à l'aviation civile internationale du 7 décembre 1944.

Des informations complémentaires sur les critères d'attribution de la catégorie d'aéronef figurent à l'annexe A1.6.

1.6.5 Maintenance

1.6.5.1 Heures de service des moteurs

Conformément au manuel d'utilisation du fabricant, les moteurs en étoile à neuf cylindres du type BMW 132 A3 montés sur les Junkers Ju 52/3m g4e de la compagnie Ju-Air devaient être soumis à une révision générale toutes les 200 à 300 heures de service.

Après son passage au service civil, la compagnie a demandé à plusieurs reprises auprès de l'Office fédéral de l'aviation civile (OFAC) l'autorisation d'augmenter l'intervalle de révision. L'OFAC a approuvé une augmentation progressive de la durée de service jusqu'à 1500 heures.

La documentation disponible des moteurs de l'avion Junkers Ju 52/3m g4e, immatriculé HB-HOT, montre qu'ils n'avaient pas atteint les 1500 heures de service autorisées par l'OFAC depuis la dernière révision générale. Des réparations et notamment le remplacement de composants importants devaient être également effectués pendant l'intervalle de révision.

Des informations complémentaires sur l'examen des moteurs figurent à l'annexe A1.6.

1.6.5.2 Dérangements

De nombreux dérangements ayant affecté les moteurs des appareils de Ju-Air ont été consignés entre 2008 et le jour de l'accident. Il a été démontré que 17 pannes moteur déterminantes en rapport avec la sécurité ou dysfonctionnements des systèmes liés à un moteur sont survenus en vol. À chaque fois, un moteur a dû être coupé ou réduit en puissance pendant le vol. Dans 14 de ces 17 cas, le vol a été interrompu. Dans l'un des cas, un des moteurs a totalement cessé de fonctionner.

[18] DETEC: Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication

Entre 2012 et 2018, plusieurs cas de fortes vibrations en vol se sont produits en raison de pales d'hélice desserrées. De plus amples informations sont disponibles à l'annexe A1.6.

Des informations détaillées sur ces incidents figurent à l'annexe A1.17.

1.6.5.3 Performances de vol

La documentation d'entretien et notamment les essais moteurs au sol de l'appareil Junkers Ju 52/3m g4e, immatriculé HB-HOT, montrent qu'au moment de l'accident l'avion ne pouvait plus atteindre les performances de vol initialement établies.

Des informations complémentaires sur ces analyses figurent à l'annexe A1.6.

1.6.5.4 Gestion des pièces de rechange

Les pièces de rechange des moteurs et de la cellule des Junkers n'étant plus disponibles depuis déjà longtemps, la compagnie a décidé de faire fabriquer les composants nécessaires sur la base de modèles ou de remettre en état les pièces usées. Les entreprises qui fabriquaient ou remettaient en état les pièces en question ne disposaient pas toutes de la certification requise pour le secteur aéronautique.

Étant donné que le fabricant de l'appareil et des moteurs ainsi que le détenteur du certificat de type n'existaient plus, l'entreprise de transport aérien a décrit les procédures correspondantes dans 41 instructions de modification (*Service Bulletin* –- SB) entre 1984 et 2001. Celles-ci ont été transmises à l'OFAC qui les a validées. Un nouveau *Service Bulletin* complémentaire a été approuvé par l'OFAC en 2005. En 2018, un *Service Bulletin* existant a été mis à jour au niveau des processus et des sous-traitants. De nombreux autres composants nouvellement fabriqués n'ont jamais fait l'objet d'aucun *Service Bulletin.* L'Office fédéral de l'aviation civile n'a jamais remarqué ou critiqué cette procédure.

Des informations détaillées et des exemples relatifs à la gestion des pièces de rechange figurent à l'annexe A1.6.

1.6.5.5 Qualité et documentation

L'analyse de l'épave de l'avion accidenté HB-HOT et de la documentation disponible des opérations de maintenance effectuées ont mis en évidence de nombreuses lacunes. Il manquait dans le plan de maintenance de la compagnie Ju-Air des indications essentielles, telles que les révisions partielles et complètes de la cellule, les données sur la protection de surface et les programmes de contrôle/entretien particuliers (*Supplemental Structural Inspection Document* – SSID). Lors des différents contrôles, l'état de la majorité des pièces a été vérifié et, le cas échéant, les pièces ont été remplacées, réparées ou entièrement révisées.

De manière générale, les documents de maintenance étaient en partie erronés, incomplets ou incorrectement tenus, ce qui a entravé la traçabilité des opérations de maintenance, ainsi que des modifications et réparations réalisées.

Des exemples de problèmes de qualité et de lacunes dans la documentation figurent à l'annexe A1.6.

1.7 Renseignements météorologiques

1.7.1 Situation météorologique générale

Les Alpes étaient sous l'influence de l'anticyclone des Açores. La pression au sol était répartie de manière uniforme et la stratification thermique de la masse d'air favorisait la formation de cumulus. Au niveau de la crête des Alpes, des vents nord-

ouest soufflaient en direction du nord-est. L'isotherme zéro degré se trouvait entre 4400 m au sud des Alpes et 4600 m au nord des Alpes.

1.7.2 Situation météorologique au moment et sur le lieu de l'accident

Les données ci-après sur la situation météorologique qui régnaient au moment et sur le lieu de l'accident s'appuient sur l'interpolation spatiale et temporelle de différentes informations météorologiques présentées en détail à l'annexe A1.7.

Il régnait dans les Grisons et les Alpes glaronaises un temps ensoleillé et chaud avec des cumulus dont la base se trouvait à 10 000 pieds AMSL, soit entre 2800 et 3400 m/M. Entre le Vorab et le Piz Segnas, le vent soufflait du nord au nord-ouest sur le sommet du col et à la hauteur initiale du vol. Ce vent conjugué à l'ascendance thermique encore active a créé des turbulences dans la vallée encaissée au sud du Piz Segnas. À l'altitude de 9000 pieds AMSL (2750 m/M), l'atmosphère était environ 13 degrés plus chaude que l'atmosphère standard OACI[19], ce qui correspond à une altitude de densité de 10 100 pieds AMSL (3080 m/M).

Les images archivées du réseau de radars météorologiques de MétéoSuisse montrent l'apparition de faibles averses à environ 7 km à l'ouest du lieu de l'accident, ainsi qu'à 15 à 20 km à l'ouest dans la région de Linthal. Les cumulus au-dessus du Piz Segnas et de ses environs sont visibles sur les images prises par les caméras de surveillance (cf. annexe A1.7).

Météo/nuages	Cumulus 3/8 à 4/8 avec base à environ 10 000 pieds AMSL (3000 m/M)
Visibilité	Supérieure à 10 km
Vent	Station Crap Masegn[20] 009°/16 kt, dont des rafales de 26 kt Analyse COSMO[21] à la hauteur du vol lors de l'entrée dans la vallée encaissée 340°/18 kt (±rafales) à une station de mesure à 3 km au sud[22] rafales du nord à 10 kt au sol, sur le lieu du crash[23] 060°/17 kt
Température/point de rosée	Station de Crap Masegn 14,9 °C/6,7 °C Analyse COSMO à la hauteur du vol 10,5 °C/7,4 °C
Pression atmosphérique	Station de Crap Masegn 762,3 hPa, soit un QNH[24] de 1030,8 hPa Analyse COSMO à 2750 m 738,3 hPa QNH sur le versant sud des Alpes (LSZL) 1014 hPa QNH sur le versant nord des Alpes (LSMD) 1017 hPa

[19] OACI: Organisation de l'aviation civile internationale, *International Civil Aviation Organization*

[20] Station de mesure la plus proche de MétéoSuisse exposée de manière similaire, à 2480 m (vent à 2495 m/M; température et pression à 2482 m/M)

[21] Modèle numérique de prévision météorologique à maillage resserré de MétéoSuisse

[22] Station de mesure de Flims Electric AG

[23] À partir de l'analyse du déplacement du nuage de poussière après le crash

[24] QNH: pression réduite au niveau de la mer, calculée à l'aide des valeurs de l'atmosphère standard OACI.

Dangers[25]	*«Averses ou orages isolés sur les reliefs. Température supérieure à 30 °C, altitude-densité élevée.»*

1.7.3 Données astronomiques

Position du soleil	Azimut: 252°	Altitude: 39°
Conditions d'éclairage	Jour	

1.7.4 Observations météorologiques d'autres équipages

Le 4 août 2018 à 16h55, juste avant l'accident de l'appareil HB-HOT, un avion monomoteur biplace du type Cessna 152 a survolé le col deSegnas en provenance du sud. L'élève-pilote et l'instructeur installés à bord effectuaient un vol d'initiation au-dessus des Alpes. Dans la région de Films, l'avion a rencontré des courants descendants et l'équipage a décidé de voler le long du versant est de la vallée encaissée au sud-ouest du Piz Segnas, afin de pouvoir effectuer à tout moment un demi-tour en cas de courants descendants persistants. À l'altitude choisie de 9100 pieds AMSL, soit 2800 m/M, le Cessna 152 a rencontré des courants ascendants, interrompus brièvement par une zone de faibles courants descendants juste avant le col deSegnas. Le survol de la crête du Piz Segnas ne posait aucun problème. Aucun cisaillement ni turbulence n'a été rencontré à cette hauteur de vol (cf. figure 10 et annexe A1.7).

Figure 10: image du Cessna 152 (encerclé en rouge) devant le Piz Segnas, juste avant le survol de la crête à l'est du col en direction de l'ouest le 4 août 2018 à 16h55. La couche nuageuse au-dessus du col de Segnas est la même que celle visible sur les images prises par des caméras de surveillance (cf. annexe A1.7). Cette image ne permet pas d'apprécier clairement la situation derrière le col. Néanmoins, les enregistrements des caméras de surveillance d'Elm, ainsi que les déclarations de l'instructeur et la figure 3 du présent rapport attestent que la visibilité au-dessus du col et derrière le col était dégagée au moment de l'approche de l'appareil HB-HOT.

1.7.5 Indications et clarifications complémentaires

Les prévisions météorologiques concernant le jour de l'accident, les déclarations des témoins oculaires, les enregistrements des caméras de surveillance, les images satellites ainsi que les relevés des radars météorologiques et des ballons-

[25] Extrait de l'aperçu des prévisions aéronautiques de MétéoSuisse à 13 heures (cf. annexe A1.7)

sondes ont été recueillis et analysés aux fins de l'enquête. Afin de pouvoir reconstituer le comportement de vol et les facteurs aérodynamiques au moment de l'accident, tels que l'angle d'incidence et la vitesse vraie de l'appareil, les déplacements à petite échelle des masses d'air dans la vallée encaissée au sud-ouest du Piz Segnas ont été retracés avec une grande précision. Pour ce faire, les courants autour du col de Segnas ont été simulés à l'aide d'un modèle à maillage fin. La fréquence et l'ampleur des effets ainsi calculées ont été validées et quantifiées par des mesures effectuées dans la zone du crash entre le 17 juillet 2019 et le 14 septembre 2019. À cet égard, une station météorologique classique a déterminé les conditions de vent, de température et d'humidité qui régnaient sur la crête à côté du col de Segnas. Un système Lidar[26]a effectué un relevé tridimensionnel des courants depuis un point de mesure situé dans la vallée encaissée. À cet égard, une attention particulière a été accordée à la répartition typique des vents verticaux dans la zone de la trajectoire du vol juste avant le décrochage en vrille. Des informations détaillées et des valeurs de mesure relatives à ces analyses figurent à l'annexe A1.7.

1.8 Aides à la navigation

Sans objet

1.9 Communication

L'équipage du HB-HOT et les services de la navigation aérienne contactés sont restés en contact radio jusqu'à ce que l'appareil quitte la fréquence de la *tour de contrôle de Locarno* le 4 août 2018 à 16h22 sans difficultés apparentes. L'appareil HB-HOT n'a jamais été en contact radio au cours de son voyage avec le service d'information de vol *Zurich Information.*

1.10 Renseignements sur l'aérodrome

L'aérodrome de Locarno se trouve à une altitude de 650 pieds AMSL, soit 198 m/M. Il est utilisé et exploité conjointement par les Forces aériennes et l'aviation civile. Il dispose des deux pistes en herbe 08C/26C et 08R/26L de 700 m x 30 m chacune, ainsi que de la piste en dur 08L/26R de 800 m x 23 m. La piste 26R, utilisée par le HB-HOT, présentait une distance de roulement utilisable au décollage de 670 m.

Pendant les heures de service des Forces aériennes ou lorsque l'exploitation civile l'exige, Skyguide propose des services de contrôle de la circulation aérienne (*Air Traffic Control Services* – ATS). Lors du décollage du HB-HOT le 4 août 2018, la tour de contrôle était opérationnelle.

1.11 Enregistreurs de vol et appareils d'enregistrement

1.11.1 Reconstitution des trajectoires de vol

1.11.1.1 Procédure

Étant donné que l'avion de transport historique impliqué dans l'accident, un Junkers Ju 52/3m g4e immatriculé HB-HOT, n'était équipé d'aucun appareil d'enregistrement, il a fallu recourir à d'autres sources de données pour reconstituer les trajectoires du vol aller à destination de Locarno le 3 août 2018 et du vol retour au cours duquel l'accident s'est produit le 4 août 2018:

[26] Lidar: *Laser detection and ranging* – système de mesure qui émet des impulsions laser et analyse la lumière réfléchie par l'atmosphère. Dans le cas présent, l'analyse est effectuée eu égard à l'effet Doppler. Ce système a été utilisé ici pour la mesure tridimensionnelle du vent au-dessus du lieu de l'accident.

- Une grande partie des trajectoires de vol du HB-HOT a pu être reconstituée à l'aide des données radar provenant d'un *Multi Radar Tracker* (MRT) ou de stations radar individuelles.
- De multiples photos et vidéos ainsi que les déclarations de nombreux témoins oculaires qui avaient observé le HB-HOT depuis le sol ont été analysées.
- En outre, 44 composants électroniques provenant des téléphones portables ainsi que des caméras des passagers et des membres d'équipage ont été récupérés sur le lieu de l'accident. Ces appareils ont été fortement endommagés lors de l'accident. Au final, il a été possible d'exploiter dix de ces supports de données.

Des analyses photogrammétriques complexes ont été effectuées afin de déterminer les positions de l'avion accidenté dans l'espace, ses angles d'attitude sur les trois axes et sa vitesse sol, notamment pour la phase de vol décisive ayant précédé l'accident.

La méthode d'analyse utilisée pour reconstituer les trajectoires de vol et le procédé d'analyse photogrammétrique sont décrits dans l'annexe A1.19.

1.11.1.2 Phase de vol à partir de la vallée du Rhin antérieur en direction du col de Segnas

D'après les points de données MRT corrigés en hauteur (points bleus sur les figure 11 et figure 12), le HB-HOT a survolé la station de ski du Crap Sogn Gion (altitude 2215 m/M, cf. figure 12) le 4 août 2018 à 16h54. L'avion volait alors à une altitude d'environ 2740 m/M et virait légèrement à gauche. Au niveau du premier point F1[27] déterminé par photogrammétrie, le HB-HOT volait à une altitude de 2833 m/M sur une route vraie (*True Track* – TT) de 335 degrés (cf. figure 12). La vitesse sol (*Ground Speed* – GS) calculée par le MRT atteignait 94 kt (soit 48,4 m/s ou 174,1 km/h) quelques secondes avant le point F1.

[27] Dans le rapport, les points déterminés par photogrammétrie sont désignés et cotés avec la lettre «F».

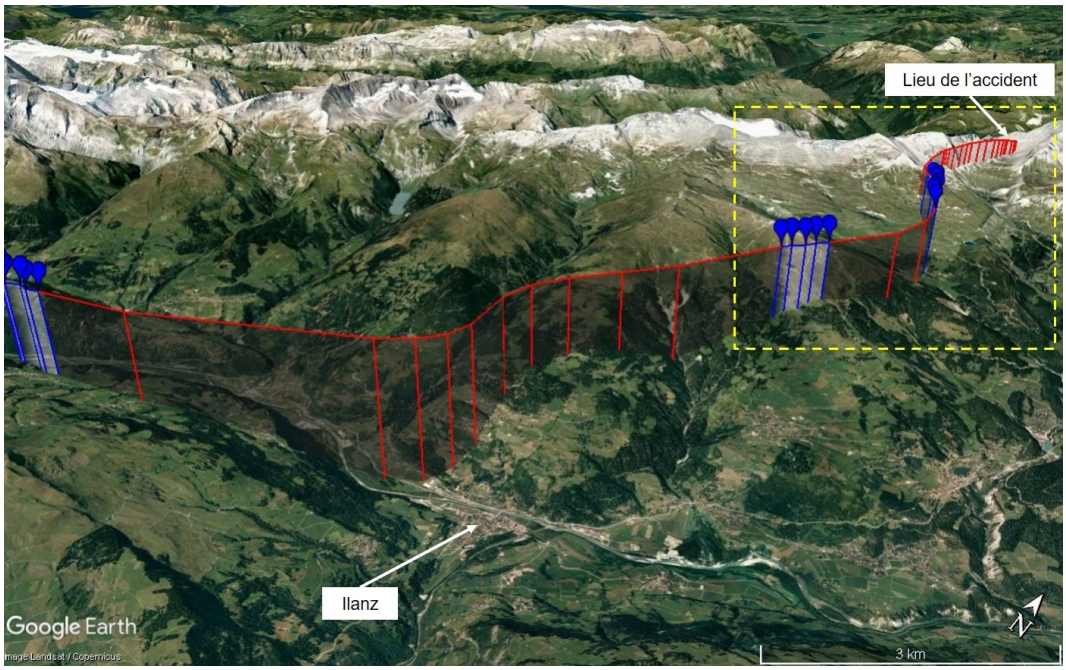

Figure 11: trajectoire reconstituée du HB-HOT lors du vol du 4 août 2018 au niveau d'Ilanz (GR) et jusqu'au lieu de l'accident avec points de données MRT corrigés en hauteur (en bleu); parties de trajectoire de vol déterminées à partir de déclarations de témoins et de photos ainsi que par photogrammétrie (en rouge), tracées dans Google Earth. La zone représentée dans la figure 12 ci-après est identifiée par le rectangle délimité par des pointillés en jaune.

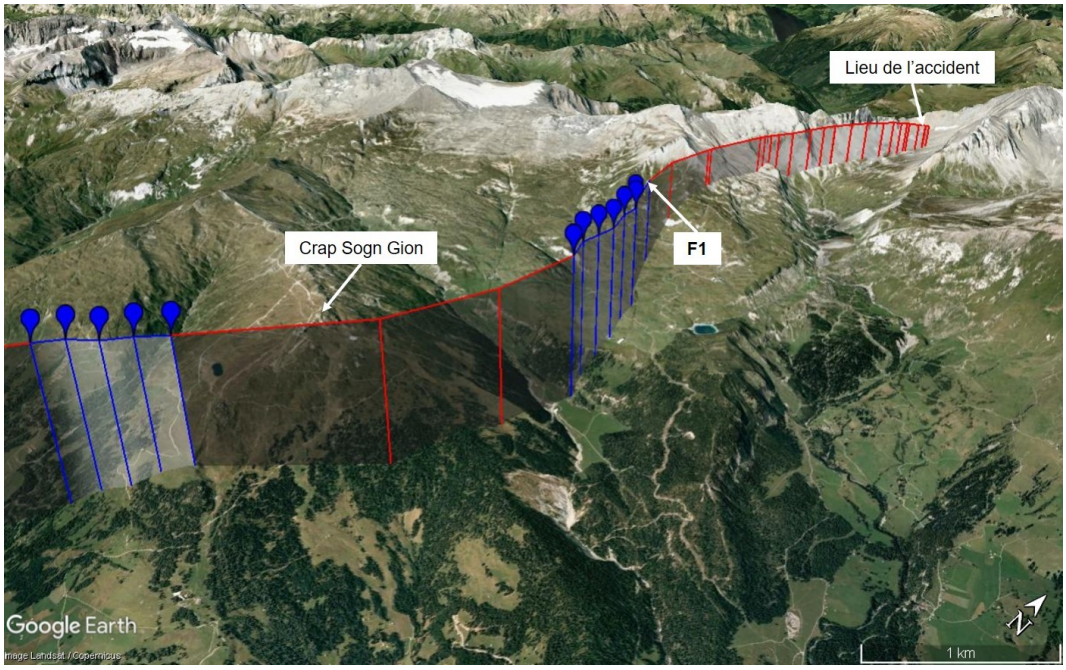

Figure 12: trajectoire reconstituée du HB-HOT lors du vol du 4 août 2018, représentée dans Google Earth. F1 désigne le premier point déterminé par photogrammétrie.

1.11.1.3 Phase de vol dans le compartiment de terrain vers le col de Segnas

Des photos et des vidéos de témoins ayant observé l'avion depuis le sol ainsi que deux enregistrements vidéo de passagers ont été utilisées pour reconstituer la dernière partie de la trajectoire de l'appareil en amont du lieu de l'accident. Il existe

un intervalle de temps entre les deux enregistrements vidéo réalisés par des passagers du HB-HOT. Le premier enregistrement vidéo se termine juste après le point F101 et le second commence au niveau du point F102 (cf. figure 13).

Des données radar ont été réceptionnées par le transpondeur du HB-HOT pendant l'intervalle de temps qui sépare le point F101 et le point F102. En plus des autres données usuelles, le transpondeur en mode S a transmis, à deux reprises et à des moments connus, des données précises de l'appareil GPS couplé avec le transpondeur. La route vraie (*True Track* – TT) et la vitesse sol (*Ground Speed* – GS) GPS ont été transmises. L'altitude a été calculée par la sonde de pression du transpondeur. La position GPS n'a pas été calculée. Une station radar avec une position géométrique défavorable a enregistré la position de l'avion lors de la transmission de ces deux paquets de données. En raison de sa précision insuffisante, la position n'a pas pu être exploitée. En revanche, les valeurs transmises concernant l'heure, la route vraie et la vitesse sol sont précises et ont donc été utilisées. Il existe donc dans cette zone deux paquets de données supplémentaires, avec l'heure, la route vraie (TT) et la vitesse sol (GS):

- 14:55:34 UTC: TT = 353 degrés, GS = 74 kt (soit 38,0 m/s resp. 137.0 km/h);
- 14:55:39 UTC: TT = 354 degrés, GS = 76 kt (soit 39,1 m/s resp. 140.8 km/h).

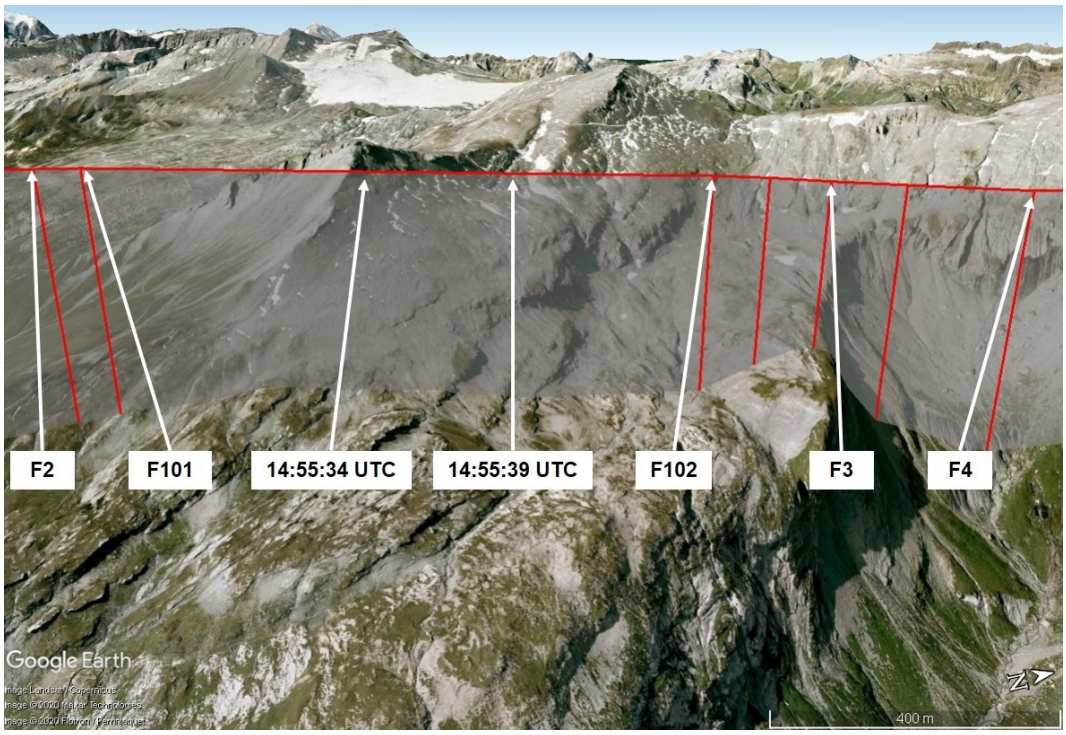

Figure13: trajectoire reconstituée par photogrammétrie du HB-HOT lors du vol du 4 août 2018 (en rouge) entre les points F2 et F4, représentée dans Google Earth. Les deux paquets de données supplémentaires à 14:55:34 UTC et 14:55:39 UTC ont été transmis par le transpondeur.

Une troisième et dernière transmission de ces données GPS a eu lieu plus tard au cours du vol, juste avant le point F10, avec les données suivantes:

- 14:56:27 UTC: TT = 43,4 degrés, GS = 92 kt (soit 47,3 m/s resp. 170.4 km/).

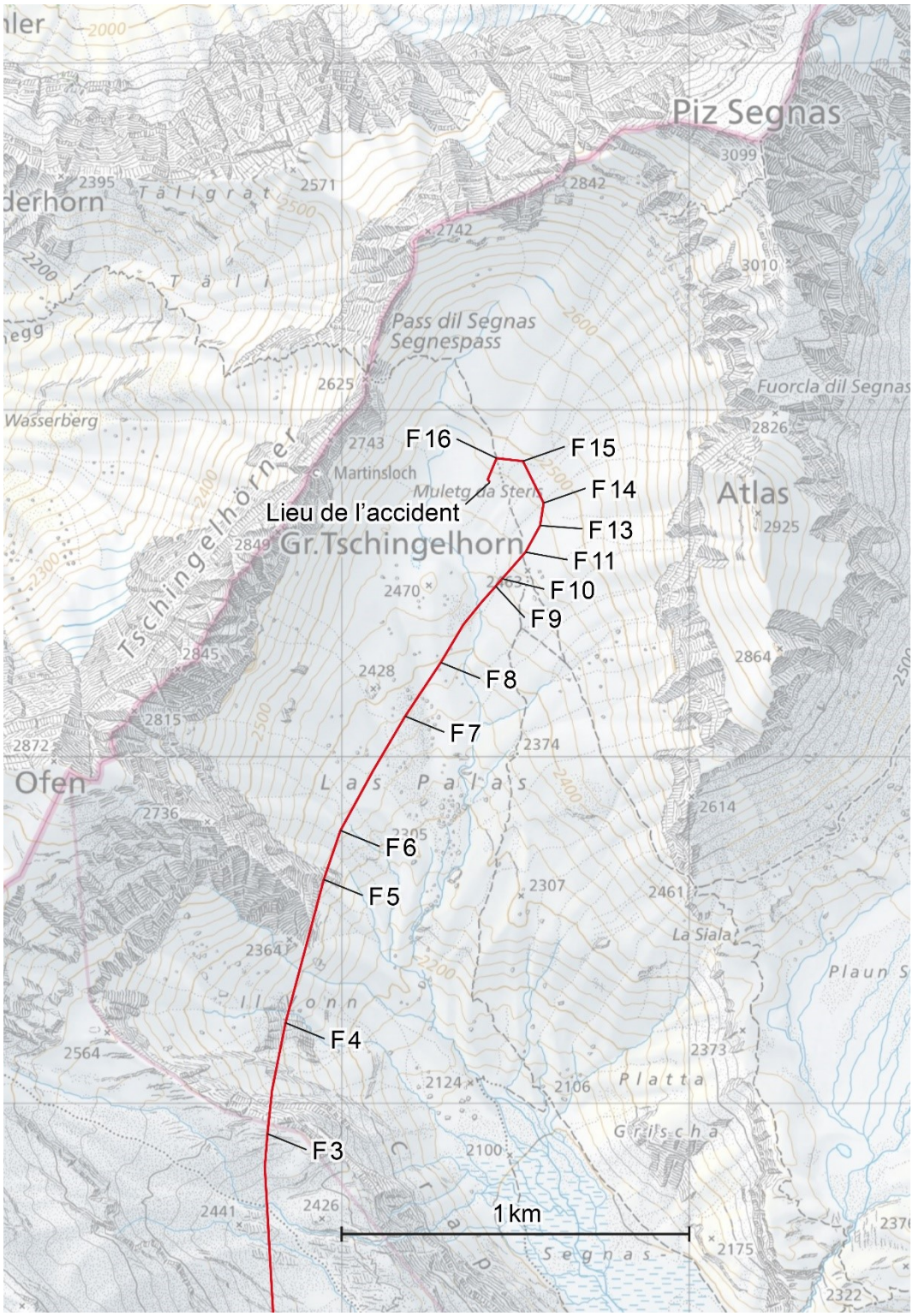

Figure14 : trajectoire reconstituée du HB-HOT lors du vol du 4 août 2018 (en rouge) à partir du point F3 jusqu'au lieu de l'accident. Source de la carte de base: Office fédéral de topographie.

1.11.1.4 Dernière phase de vol

Un témoin oculaire a photographié le HB-HOT pendant la dernière phase de vol. L'image présentant une résolution élevée a fait l'objet d'une analyse photogrammétrique. La position géographique et l'attitude de vol au niveau du point F16 (cf. figure 7) ainsi que les paramètres suivants ont été déterminés suite à l'analyse:

- L'assiette était de 68,0 degrés vers le bas.
- L'angle d'inclinaison latérale était de 50,8 degrés vers la gauche.
- L'altitude était de 2583 m/M, soit environ 108 m au-dessus du lieu où l'avion s'est écrasé (2475 m/M).
- À ce moment précis, le gouvernail de profondeur affichait une déviation d'environ 13 degrés vers le haut et se trouvait en position semi-déviée par rapport à la déviation maximale possible.
- Le gouvernail de direction était dévié de 2 degrés vers la droite.
- Le fléchissement des ailes était de 0,6 degré vers le haut par rapport à la position initiale de la surface portante de l'avion au sol. Une valeur comparative à partir d'un enregistrement en vol horizontal non accéléré a révélé un fléchissement des ailes d'environ 1,2 degré vers le haut par rapport à la position initiale.

Le crash du HB-HOT a été filmé par un témoin oculaire qui se trouvait sur le col de Segnas. L'enregistrement vidéo montre, par images individuelles, les derniers instants du HB-HOT d'environ 0.4 seconde avant le crash. Ces images ont permis de déterminer les positions géographiques et les attitudes de vol F17 à F19 (cf. figure 8). Le crash s'est produit à une altitude de 2475 m/M, avec une assiette de 84,2 degrés vers le bas et dans un mouvement de roulis vers la gauche. Elles ont également permis de déduire la vitesse au moment du crash, à savoir près de 55,7 m/s, soit 200 km/h. Étant donné la distance entre le lieu d'enregistrement et le lieu du crash, seules les données phoniques témoignent des derniers instants enregistrés jusqu'à 1,6 seconde avant le crash.

1.11.2 Analyses numériques

Les analyses numériques reposent sur les données déterminées par photogrammétrie, notamment les positions géographiques et les angles d'attitude de l'avion. Des données supplémentaires ont été utilisées pour l'analyse de la phase de vol de l'avion accidenté lors de son entrée dans le compartiment de terrain du col de Segnas:

- les résultats des analyses météorologiques, notamment les vitesses et les directions du vent à hauteur du vol et les vitesses de vent verticales ;
- l'analyse (sonogrammes) des données phoniques d'un enregistrement vidéo réalisé depuis l'intérieur de l'avion, par le Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la sécurité de l'aviation civile (BEA) ;
- l'analyse visuelle des débattements des ailerons réalisée par le SESE sur la base d'une vidéo prise depuis l'intérieur de l'avion.

L'analyse numérique des 29 points de données de la phase de vol de l'appareil lors de son entrée dans le compartiment de terrain du col de Segnas repose sur ces quatre sources de données. Les figure 15 à figure 20 qui présentent les principaux paramètres en fonction de la trajectoire de vol et de l'heure ont été réalisées à partir de ces données.

La figure 15 montre l'altitude, l'assiette (*pitch*), la pente (*flight path angle*) ainsi que la différence entre ces angles.

Figure 15: altitude, assiette (*pitch)* et pente (*flight path angle* – FPA) en fonction de la trajectoire horizontale parcourue. L'ordonnée de gauche indique l'altitude et l'ordonnée de droite les valeurs des angles d'attitude.

La figure 16 indique les paramètres sur la base de la durée d'une source vidéo. Le point F102 est le premier point calculé au moyen de cette source vidéo. Il est représenté à la figure 15 pour une distance horizontale de 2243 m. D'autres points provenant d'autres sources de données (par exemple F6 entre les points F5 et F106) auxquels aucune durée ne peut être attribuée se trouvent dans la figure 16 entre les points non reliés.

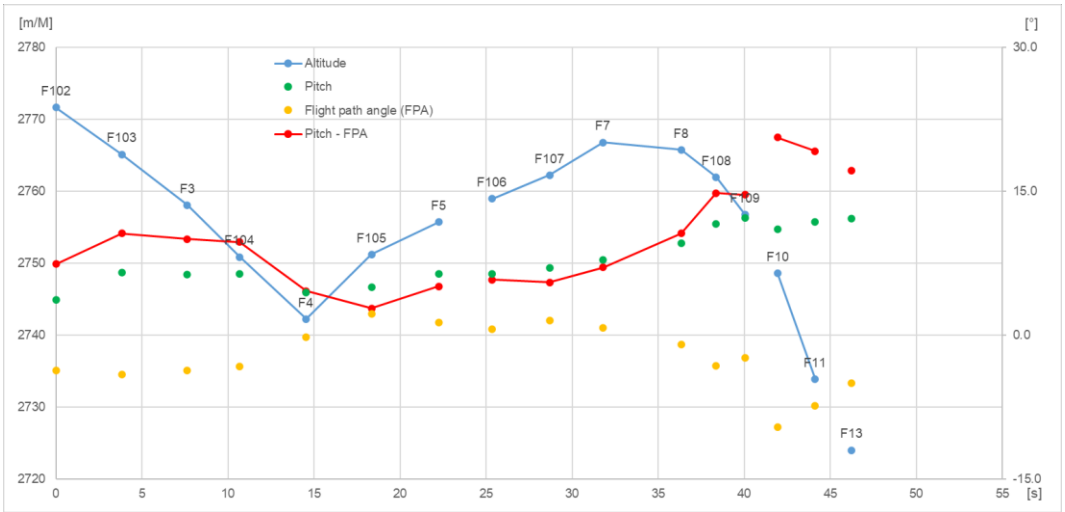

Figure 16: altitude, assiette *(pitch)* et pente *(flight path angle* – FPA) en fonction de la durée de la vidéo. L'ordonnée de gauche indique l'altitude et l'ordonnée de droite les valeurs des angles d'attitude.

La figure 17 présente l'évolution de la vitesse sol calculée de l'appareil (*Ground Speed* – GS). Les trois vitesses transmises par le transpondeur de l'appareil HB-HOT ont également été prises en compte.

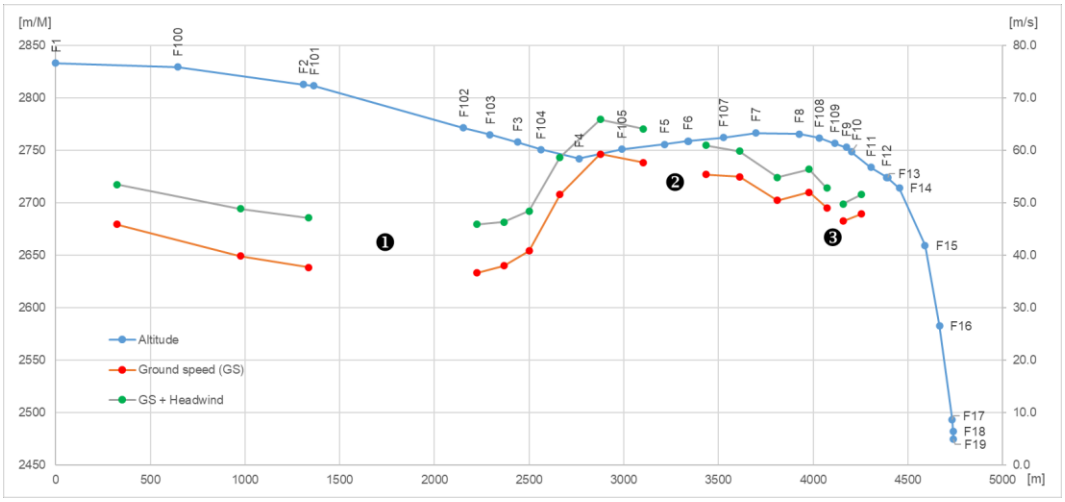

Figure 17: altitude, vitesse sol *(ground speed)* et vitesse sol + vent de face *(ground speed + headwind)* calculés en fonction de la distance cumulée horizontale.

Dans la zone ❶ (cf. figure 17) où les courbes de la vitesse sol sont interrompues, aucun intervalle de temps et donc aucune *ground speed* n'ont pu être calculés. En effet, les points de données proviennent de deux sources vidéo, sans aucun lien entre elles, et n'ont donc pas pu être calculés. Dans les autres chaînons manquants (zones ❷ et ❸), il existe des points non représentés, issus de sources de données, auxquels aucune durée ne peut être attribuée.

La figure 18 montre l'évolution des régimes des trois moteurs sur la base de la durée de la vidéo. Il n'a pas été possible d'attribuer les régimes des moteurs A, B et C (*Engine* A, B, C) à la position des moteurs (à gauche, au centre, à droite).

En plus de l'assiette et de la pente, la figure 19 montre la vitesse de vol en montée et descente sur la base de la durée de la vidéo.

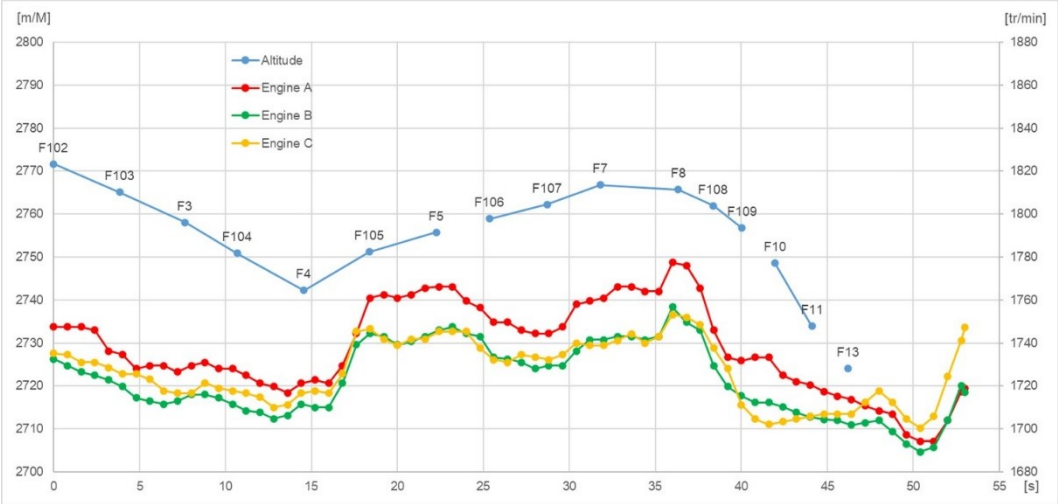

Figure 18: altitude et régime des trois moteurs en fonction de la durée de la vidéo.

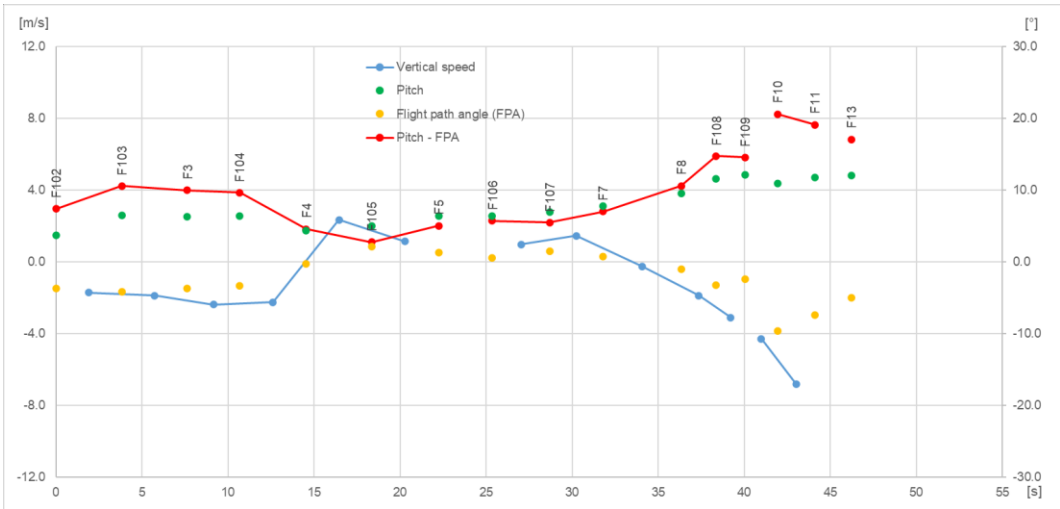

Figure 19: vitesse verticale *(vertical speed)*, assiette *(pitch)* et pente *(flight path angle)* en fonction de la durée de la vidéo.

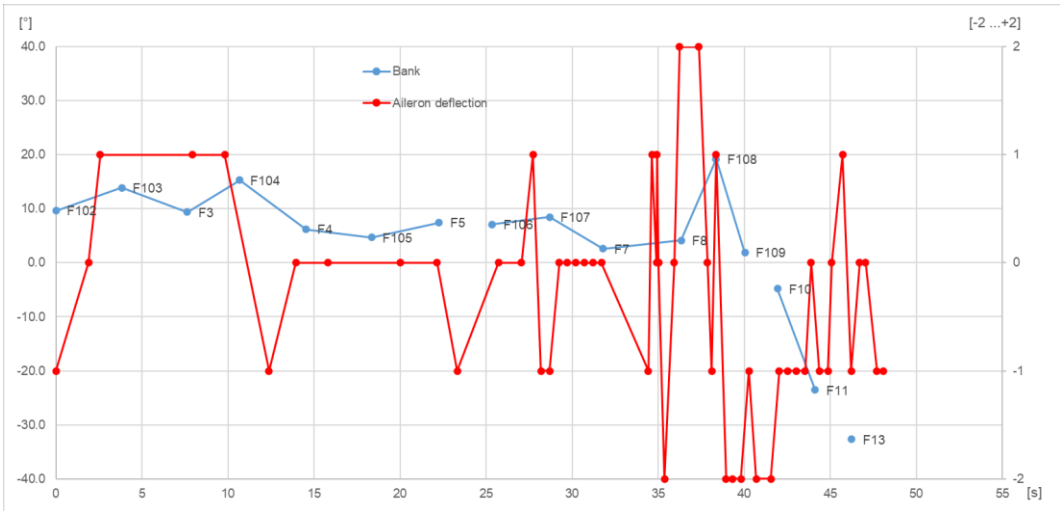

Figure 20: inclinaison latérale *(bank)* et débattement des ailerons (*aileron deflection*) en fonction de la durée de la vidéo. Les degrés positifs sur l'ordonnée de gauche représentent une inclinaison vers la droite et/ou des ailerons braqués pour un virage vers la droite. Les angles d'inclinaison latérale (*bank angle*) ont été déterminés par photogrammétrie.

Les débattements des ailerons ont été évalués de manière qualitative avec les valeurs - 2, - 1, 0, + 1 et + 2 (cf. figure 20, ordonnée de droite) sur la base d'un enregistrement vidéo réalisé à l'intérieur de l'avion. Les valeurs positives signifient un débattement d'aileron pour un mouvement de roulis en sens horaire autour de l'axe de la trajectoire de vol, c'est-à-dire pour un virage vers la droite. Par opposition, les valeurs négatives signifient des débattements d'ailerons pour un virage vers la gauche et des valeurs neutres signifient une position neutre en termes de débattements d'ailerons.

1.11.3 Absence d'appareils d'enregistrement

L'avion de transport historique impliqué dans l'accident, un Junkers Ju 52/3m g4e immatriculé HB-HOT, n'était équipé d'aucun appareil d'enregistrement. En raison de la date du premier certificat de navigabilité, un enregistreur de vol (*Flight Data Recorder* – FDR) n'était pas exigé. Cependant, un enregistreur phonique dans le cockpit (*Cockpit Voice Recorder* – CVR) était obligatoire pour le transport aérien commercial. Toutefois, l'Office fédéral de l'aviation civile a accordé une autorisation exceptionnelle de sorte que l'entreprise de transport aérien a renoncé à l'installation de cet appareil (voir à ce sujet l'annexe A1.6).

Il manquait donc, dans l'accident analysé ici, un enregistreur de vol résistant aux chocs. Cet appareil permet, notamment lors d'incidents impliquant de grands avions, de reconstituer la trajectoire de vol, de déterminer la position géographique et l'attitude de vol ainsi que de calculer la vitesse de l'appareil par rapport au sol et/ou à l'air. De même, l'avion n'était pas équipé d'un enregistreur phonique (CVR). Or, cet appareil aurait pu fournir des indications sur les conversations entre les membres de l'équipage, la nature de leur collaboration et, le cas échéant, livrer des informations sur la nature des problèmes ayant au final entraîné l'accident.

Par conséquent, la reconstitution de l'itinéraire de vol et des circonstances de l'accident s'est avérée très complexe et très longue. De plus, des bases importantes pour déterminer les causes de l'accident, notamment les conversations dans le cockpit, qui auraient pu permettre de tirer des conclusions sur les processus de décision des pilotes lorsqu'ils volaient dans le bassin de la vallée au sud-ouest du Piz Segnas, n'ont pas pu être obtenues malgré ce processus complexe de reconstitution.

Par le passé, dans de nombreux cas, les causes d'accidents survenus dans le transport aérien commercial n'ont pas pu être élucidées en raison de l'absence de données enregistrées. Par conséquent, les services d'enquête de sécurité ont à maintes reprises formulées des recommandations pour que les avions soient équipés d'appareils d'enregistrement de tous types.

TSB Recommendation A91-13 (1991): "The Department of Transport expedite legislation for upgrading the flight recorder requirements for Canadian-registered aircraft."

[Traduction française: Le ministère des Transports doit faire avancer la législation destinée à améliorer les exigences relatives aux enregistreurs de vol des aéronefs immatriculés au Canada.]

AAIB[28] 2005-101 (2005): "The European Aviation Safety Agency[29] should promote the safety benefits of fitting, as a minimum, CVR equipment to all aircraft operated for the purpose of commercial air transport, regardless of weight or age."

[28] AAIB: *Air Accidents Investigation Branch (Royaume Uni)*

[29] *European Aviation Safety Agency* (EASA), Agence européenne de la sécurité aérienne (AESA), rebaptisée *European Union Aviation Safety Agency* en septembre 2018.

[Traduction française: L'Agence européenne de la sécurité aérienne devrait promouvoir les avantages en matière de sécurité qu'il y aurait à équiper au minimum d'un enregistreur phonique, tous les avions utilisés dans le transport aérien commercial, indépendamment de leur âge et de leur poids.]

NTSB[30] *"Safety Recommendation A-06-017 (2006): to the Federal Aviation Administration: Require all rotorcraft operating under 14 Code of Federal Regulations Parts 91 and 135 with a transport-category certification to be equipped with a cockpit voice recorder (CVR) and a flight data recorder (FDR). For those transport-category rotorcraft manufactured before October 11, 1991, require a CVR and an FDR or an onboard cockpit image recorder with the capability of recording cockpit audio, crew communications, and aircraft parametric data."*

[Traduction française: La Federal Aviation Administration doit exiger que tous les giravions qui sont exploités selon le titre 14 du Code des règlements fédéraux (Code of federal regulations), parties 91 et 135, avec une homologation dans la catégorie Transport, soient équipés d'un *Cockpit Voice Recorder* (CVR) et d'un *Flight Data Recorder* (FDR). Les aéronefs de la catégorie de transport en question et construits avant le 11 octobre 1991 requièrent l'installation d'un CVR et d'un FDR ou d'un appareil d'enregistrement d'images embarqué, qui soit en mesure d'enregistrer les sons dans le cockpit, les conversations de l'équipage et les paramètres de l'avion.]

TSB[31] *Recommendation A13-01 (2013): "The Department of Transport should work with industry to remove obstacles to and develop recommended practices for the implementation of flight data monitoring and the installation of lightweight flight recording systems by commercial operators not currently required to carry these systems."*

[Traduction française: Le ministère des Transports, en collaboration avec l'industrie, doit supprimer les obstacles et élaborer des pratiques recommandées en ce qui concerne la mise en œuvre de la surveillance des données de vol et l'installation de systèmes d'enregistrement de données de vol légers par les exploitants commerciaux, qui à l'heure actuelle, qui ne sont pas tenus d'équiper leurs aéronefs avec ces systèmes.]

Dans le cadre de la procédure de législation (RMT[32].0271 (autrefois MDM[33].073(a)) et RMT.0272 (autrefois MDM.073(b))), l'AESA a publié en 2017 la *Notice of Proposed Amendment* (NPA) 2017-03 *In-flight recording for light aircraft*.

"This Notice of Proposed Amendment (NPA) addresses safety and regulatory harmonisation issues related to the need of in-flight recordings for accident investigation and accident prevention purposes. 12 safety recommendations were addressed to the European Aviation Safety Agency (EASA) by 7 safety investigation authorities, recommending an in-flight recording capability for light aircraft models which are outside the scope of the current flight recorder carriage requirements. In addition, new Standards (recently introduced in ICAO Annex 6) require the carriage of lightweight flight recorders for light aeroplanes and light helicopters. […] This NPA proposes to mandate the carriage of lightweight flight recorders for some categories of light aeroplanes and light helicopters when they are commercially operated and manufactured 3 years after the date of application of the amending regulation. In addition, this NPA proposes to promote the voluntary installation of in-flight recording equipment for all other light aeroplanes and light helicopters and

[30] NTSB: *National Transport Safety Board* (États-Unis)

[31] TSB: *Transportation Safety Board of Canada*

[32] RMT: *Rulemaking tasks*

[33] MDM: *Multi-Disciplinary Measures*

for all balloons. The proposed changes are expected to increase safety with limited economic and social impacts."

[Traduction française: Cet avis de proposition de modification (APM) porte sur les questions de sécurité et d'harmonisation réglementaire concernant la nécessité d'enregistrer les données de vol aux fins d'enquête et de prévention des accidents. Douze recommandations de sécurité émises par 7 autorités d'enquête sur les accidents ont été transmises à l'Agence européenne de la sécurité aérienne (AESA). Elles recommandent la présence d'un moyen d'enregistrement pendant le vol pour les aéronefs légers qui ne font pas partie du champ d'application des exigences actuelles relatives à l'installation d'enregistreurs de vol. De plus, de nouvelles normes (qui ont été récemment introduites dans l'Annexe 6 OACI) imposent le montage d'enregistreurs de vol légers pour les avions et hélicoptères légers. [...] Cet APM propose de rendre obligatoire le montage d'enregistreurs de vol légers pour quelques catégories d'avions et hélicoptères légers si ces appareils sont exploités à des fins commerciales et s'ils ont été construits trois ans après l'entrée en vigueur du règlement modificatif. Par ailleurs, cet APM propose d'encourager l'installation facultative d'appareils d'enregistrement sur tous les autres avions et hélicoptères légers et sur toutes les montgolfières. Il est attendu des modifications proposées qu'elles améliorent la sécurité et qu'elles aient des répercussions limitées sur le plan économique et social.]

De nos jours, les solutions techniques nécessaires existent et, par conséquent, le SESE estime que les directives du droit aérien relatives à l'emport d'enregistreurs de vol, de *Cockpit Voice Recorder* ou de *Cockpit Image Recording System* sur les avions historiques doivent être appliquées, ce qui n'était pas le cas au moment de l'accident. Une disposition dérogatoire, telle qu'elle existe dans le cas présent, n'est pas une solution allant dans le sens de la sécurité.

1.11.4 Recommandation de sécurité

Étant donné que des recommandations de sécurité ont déjà été formulées à de nombreuses reprises et que des modifications réglementaires concernant les obligations d'emport d'enregistreurs de vol sont prévues, le SESE s'abstient de formuler une nouvelle recommandation de sécurité qui tendrait vers un objectif comparable.

1.12 Indications sur l'épave, le crash et le lieu de l'accident

1.12.1 Lieu de l'accident.

Le lieu de l'accident se situe dans un creux, à environ 1,2 km au sud-ouest du Piz Segnas, dans le canton des Grisons. Le Martinsloch, une ouverture naturelle dans la crête des Tschingelhörner, au sud-est d'Elm, se trouve à environ 500 m à l'ouest du lieu de l'accident.

1.12.2 Crash

Toutes les traces sur le lieu de l'accident ont révélé que le crash de l'avion a eu lieu dans une position verticale avec une trajectoire de vol pratiquement verticale. Ces traces ont été confirmées par un enregistrement vidéo.

1.12.3 Épave

Toutes les parties essentielles de l'avion ont pu être identifiées sur le lieu de l'accident. De nombreux bagages, en partie lourds, ont été trouvés. Les parties de l'épave ont été nettoyées et classées par sous-ensembles avant d'être examinées de manière approfondie. Toutes les informations supplémentaires à ce sujet figurent à l'annexe A1.12.

1.13 Informations médicales et pathologiques

Les deux pilotes ont subi des blessures directement mortelles lors du crash.

Les corps des pilotes A et B ont fait l'objet d'une analyse de médecine légale. Les analyses de toxicologie forensique effectuées n'ont donné aucun résultat pertinent. Elles n'ont révélé aucun indice indiquant que les pilotes étaient sous l'emprise de l'alcool, de médicaments, de stupéfiants ou de monoxyde de carbone.

Les antécédents médicaux des deux pilotes étaient normaux. Selon des proches, les pilotes paraissaient en bonne santé avant les vols de ce voyage découverte.

1.14 Incendie

Nicht betroffen bien que des quantités considérables de carburant aient été présentes dans les réservoirs et libérées lors du crash.

1.15 Aspects en lien avec la survie

1.15.1 Généralités

Il n'était pas possible de survivre à cet accident.

1.15.2 Recherche et sauvetage

L'accident a été observé par plusieurs personnes qui ont alerté la police immédiatement après le crash et qui se sont précipitées sur les lieux pour prodiguer les premiers secours. Plusieurs hélicoptères étaient déjà sur place quelques minutes après le crash. Le secours alpin suisse, les pompiers et la police sont ensuite arrivés sur les lieux.

L'émetteur de localisation d'urgence (*Emergency Locator Beacon Aircraft* – ELBA) intégré dans l'avion s'est déclenché et a émis un signal localisable.

1.16 Essais et résultats des recherches

Les analyses pour l'interprétation des indices effectuées sur les instruments et éléments de commande du cockpit de l'appareil accidenté ont fourni des valeurs essentielles sur le moment du crash:

- L'indicateur de vitesse encore exploitable affichait une vitesse d'environ 202 km/h.
- Les compte-tours des trois moteurs affichaient des valeurs comprises entre 1800 et 1900 tours par minute.
- Le dispositif de limitation du plein régime était activé. Voir annexe A1.6 pour la description technique. Les résultats de l'analyse pour l'interprétation des indices figurent à l'annexe A1.16.

En raison des défauts constatés sur l'épave et afin d'évaluer la résistance et la durabilité des matériaux du Junkers Ju 52/3m g4e, immatriculé HB-HOT, ceux-ci ont été soumis à des essais approfondis dans les domaines de la métallurgie et de la corrosion. Entre autres, les constatations suivantes ont été faites :

- D'importants dégâts de corrosion ont été constatés sur des parties structurelles de l'aile et du fuselage ;
- Un longeron inférieur de l'aile gauche présentait des fractures de fatigue (fractures dues aux oscillations) ;
- La protection de la surface du matériau, qui est sensible à la corrosion intercristalline, était insuffisante ou totalement absente.

De plus, une simulation du déroulement du vol a montré que, selon des hypothèses réalistes, l'équipage ne pouvait plus éviter le crash après le début du dernier virage vers la gauche.

Les méthodes utilisées et les résultats détaillés sont décrits à l'annexe A1.16.

1.17 Indications sur les différentes organisations et leur direction

1.17.1 Entreprise de transport aérien

1.17.1.1 Organisation

L'association des amis des Forces aériennes suisses (VFL) était une association régie par le droit suisse. La VFL dirigeait la compagnie Ju-Air via un gérant nommé par la direction de l'association. Ju-Air faisait donc partie de l'association des amis des Forces aériennes suisses (VFL). Par conséquent, les certificats officiels de l'autorité de surveillance étaient établis au nom de la VFL.

De plus amples informations sur l'organisation et sur les procédures opérationnelles de l'entreprise de transport aérien figurent à l'annexe A1.17.

1.17.1.2 Conditions requises pour l'exercice de l'activité

Pour les opérations de transport aérien commercial (*Commercial Air Transport* – CAT) exécutées par la compagnie Ju-Air, les exigences européennes concernant en particulier les thèmes et domaines suivants doivent être respectées:

- certificat de transporteur aérien et certificat de navigabilité ;
- système de gestion de la sécurité et obligations de notifier ;
- système de surveillance interne de la conformité avec les règles ;
- équipage ;
- distance de roulage au décollage, taux de montée minimal et hauteurs de vol minimales ;
- instruments et équipements des aéronefs ;
- Manuel d'exploitation.

La mise en œuvre de ces exigences par Ju-Air est expliquée dans les chapitres 1.17.1.3 à 1.17.1.9 suivants.

1.17.1.3 Certificat de transporteur aérien et certificat de navigabilité

L'exploitant doit disposer d'un certificat de transporteur aérien (*Air Operator Certificate* – AOC). Pour bénéficier d'une licence de transporteur aérien, les avions exploités doivent disposer d'un certificat de navigabilité (*Certificate of Airworthiness* – CofA) conformément aux exigences européennes.

Les avions Ju-52/3m g4e de Ju-Air ne disposaient pas de certificats de navigabilité conformément aux exigences européennes. Toutefois, pour pouvoir établir une licence de transporteur aérien, l'OFAC s'est fondé sur une disposition dérogatoire de la Commission européenne (cf. annexe A1.6). Cette disposition dérogatoire exigeait pour l'essentiel que les avions Ju-52/3m g4e disposent d'un certificat de navigabilité selon l'Annexe 8 de l'OACI et qu'ils soient entretenus par une entreprise de maintenance certifiée selon les directives européennes (cf. annexe A1.17).

Les avions Ju-52/3m g4e de Ju-Air disposaient d'un certificat de navigabilité établi par l'OFAC conformément à la convention relative à l'aviation civile internationale du 7 décembre 1944. Selon les indications de l'OFAC, l'avion était ainsi autorisé

en vertu de l'annexe 8 de cette convention, mais dans les faits, il ne répondait pas aux exigences de cette annexe.

Les avions Ju-52/3m g4e de Ju-Air étaient entretenus par des entreprises de maintenance certifiées par l'OFAC conformément aux exigences européennes. Cependant, dans les faits, ces entreprises de maintenance ne satisfaisaient pas à ces exigences.

1.17.1.4 Système de gestion de la sécurité et obligations de notifier

Le système de gestion de la sécurité (*Safety Management System* – SMS) utilisé par Ju-Air comprenait les aspects usuels pour une entreprise de transport aérien commercial et avait été approuvé dans cette forme par l'Office fédéral de l'aviation civile. Le SMS prévoyait notamment la saisie systématique de tous les principaux dangers liés à l'exploitation aérienne et l'analyse de leur importance. De 2012 jusqu'à la date de l'accident, l'entreprise de transport aérien avait effectué 22 analyses de risque. Ju-Air n'a jamais effectué la moindre analyse des risques inhérents au vol à vue et au vol en montagne. De même, l'Office fédéral de l'aviation civile n'a jamais exigé la moindre évaluation portant sur ces risques.

Afin de pouvoir évaluer l'efficacité et l'application du SMS par l'entreprise de maintenance, plus de 150 incidents critiques sur le plan de la sécurité, survenus lors des opérations aériennes de Ju-Air, ont été réunis au cours de cette enquête. Ces événements ont eu lieu entre l'année 2000 et la cessation d'activité provisoire de Ju-Air. Des annonces de la population ou des plaintes déposées les années précédant l'accident suite à des survols à basse altitude de zones de protection du gibier par des appareils de Ju-Air ont également été analysées. Des vérifications ont ensuite été effectuées pour déterminer si ces incidents avaient été signalés aux autorités compétentes et traités en interne par l'entreprise. Les vérifications ont notamment permis de constater que des obligations légales d'annoncer n'ont pas été remplies et qu'aucune analyse approfondie de ces événements n'a été effectuée en interne. Ces incidents ont également montré que même les équipages expérimentés et hautement qualifiés de Ju-Air enfreignaient souvent les règles de base de la navigation aérienne. Ainsi, l'espace aérien de certains aérodromes militaires a été violé de manière répétée par des avions de Ju-Air. Ces manquements ont certes été identifiés par l'autorité de surveillance dans des cas précis, mais aucune évaluation de leur ampleur ni caractérisation systématique n'ont été découvertes. Aucune mesure corrective efficace n'a été exigée par l'autorité de surveillance.

Contrairement aux autres fonctions dans les entreprises de transport aérien, la réglementation ne prescrit aucun critère d'homologation pour les responsables de la sécurité (*Safety Manager*) ni pour les responsables de l'application conforme des règles applicables (*Compliance Monitoring Manager*). Les personnes devant exercer ces fonctions ne sont pas soumises à un contrôle de compétence (*Assessment)*. Dans ses recommandations, l'AESA propose des exigences précises uniquement pour la fonction *Safety Manager*.

Des informations détaillées sur le système de gestion de sécurité de l'entreprise de transport aérien et son mode de fonctionnement figurent à l'annexe A1.17.

1.17.1.5 Système de surveillance interne de la conformité avec les règles

Un système de vérification de la conformité des activités commerciales avec les normes juridiques et les processus définis en interne existait au sein de la compagnie Ju-Air (*Compliance Monitoring*). Dans le cadre de ce *Compliance Monitoring,* des normes juridiques qui s'appliquaient pourtant à Ju-Air avaient été déclarées non applicables. De plus, la conformité avec les règles avait parfois été affirmée

alors qu'elle n'existait absolument pas en réalité. Parfois, seule l'existence de descriptions de processus était vérifiée. En revanche, leur mise en œuvre concrète ne l'était pas.

De plus amples informations sur le système de surveillance interne de la conformité avec les règles sont fournies à l'annexe A1.17.

1.17.1.6 Équipages

La formation pour obtenir la qualification de type (*Type Rating* – TR) pour le Junkers Ju 52/3m g4e reposait sur une partie théorique et sur une formation de pilotage. Dans ce cadre, les équipages s'exerçaient notamment à voler en virages serrés et ils étaient familiarisés au comportement de l'avion lors de l'approche et lors du décrochage en vol rectiligne à faible vitesse. Pendant ces formations, seul l'équipage était à bord.

La manière d'aborder un décrochage ne faisait pas partie des contrôles de compétences annuels.

De plus amples informations sur la formation des pilotes se trouvent à l'annexe A1.5.

1.17.1.7 Distance de roulage au décollage, taux de montée minimal et hauteurs de vol minimales

1.17.1.7.1 Décollage

En cas de panne de moteur, la règle suivante s'applique dans le trafic aérien commercial aux avions trimoteurs de classe de performances C en l'absence d'indications concernant la distance de roulage au décollage dans le manuel de vol de l'avion, conformément au règlement européen n° 965/2012: conformément au manuel de vol de l'avion, la distance nécessaire pour atteindre une hauteur de 50 pieds au-dessus du sol à partir du début de l'aire de décollage ne doit, après avoir été multipliée par le facteur de 1,25, pas dépasser la distance de roulage utilisable au décollage pour garantir le niveau de sécurité requis au décollage.

Les appareils Ju-52/3m g4e de Ju-Air sont des avions trimoteurs de classe de performances C. Conformément au manuel de vol de l'aéronef, la distance nécessaire pour atteindre une hauteur de 15 m (environ 50 pieds) au-dessus du sol à partir du début de l'aire de décollage était d'environ 700 m, en tenant compte de la masse au décollage donnée (reconstituée) et de la température ambiante, soit 875 m après multiplication par le facteur de 1,25. Ces distances se seraient élevées respectivement à 760 m et 950 m si la masse au décollage avait été calculée sur la base du plan de vol opérationnel.

Dans le manuel d'exploitation de Ju-Air, la règle susmentionnée avec le facteur de 1,25 n'y figurait pas.

Des informations sur la distance de roulage au décollage disponible à l'aérodrome de Locarno figurent au chapitre 1.10. De plus amples informations sur le calcul de la distance minimale requise pour la course au décollage ainsi que sur les enquêtes systémiques dans ce contexte figurent à l'annexe A1.17.

1.17.1.7.2 Vol de croisière

Pour garantir le niveau de sécurité exigé en vol de croisière, les avions de classe de performances C exploités à des fins de transport commercial doivent pouvoir atteindre un taux de montée d'au moins 300 pieds/minute à chaque point de la trajectoire de vol. Les avions Ju-52/3m g4e appartiennent à la classe de performances C. Selon les estimations de Ju-Air, le taux de montée maximal des avions

Ju-52/3m g4e oscille entre 100 et maximum. 300 pieds/minute à une altitude de 3000 m/M[34] et par des températures estivales. Aucune donnée de mesure ni aucun justificatif correspondant ne sont disponibles.

En plus de la distance minimale verticale et horizontale par rapport au sol et aux obstacles qui s'applique aux vols à vue non commerciaux, les règles régissant le transport aérien commercial stipulent l'exigence suivante afin d'atteindre le niveau de sécurité exigé: en cas de panne de moteur et si le taux de montée qui en résulte est négatif, les avions de classe de performances C doivent pouvoir survoler tous les obstacles avec une distance verticale de 2000 pieds (env. 610 m) et une distance latérale de 9,3 km des deux côtés de la trajectoire de vol envisagée. À partir d'une altitude d'environ 2500 m/M, le taux de montée d'un Ju 52 est négatif en cas de panne de moteur et/ou l'avion commence inévitablement à perdre de l'altitude. Comme une panne de moteur peut se produire à tout moment, la hauteur de vol minimale à respecter dans les Alpes dépasse de 2000 pieds l'obstacle le plus élevé à gauche et à droite de la trajectoire de vol, et ce pour n'importe quel point sur la trajectoire de vol. La hauteur de vol minimale que devait respecter le HB-HOT lors de son passage dans la vallée encaissée située au sud-ouest du Piz Segnas était supérieure à 12 500 pieds AMSL, soit 3800 m/M.

Les règles concernant le taux minimal de montée et le dégagement minimal par rapport aux obstacles n'étaient pas mentionnées dans le manuel d'exploitation de Ju-Air.

De plus amples informations sur le taux de montée minimal et les altitudes minimales se trouvent à l'annexe A1.17.

1.17.1.8 Instruments et équipements des avions

Les exigences imposées aux instruments et équipements des avions exploités à des fins commerciales sont décrites dans les *Joint Aviation Requirements* (JAR-OPS 1) depuis 1997. En raison de leur ancienneté, les avions Junkers Ju 52/3m g4e de Ju-Air ne satisfaisaient pas à de nombreuses exigences. En février 2004, l'entreprise de transport aérien Ju-Air a donc sollicité l'OFAC pour obtenir certaines dérogations et être exonérée de 15 exigences, parmi lesquelles l'abandon d'un enregistreur phonique (*Cockpit Voice Recorder* – CVR) pour le cockpit et l'abandon d'un deuxième système de pression statique indépendant pour la mesure de la vitesse et de l'altitude.

Le 15 avril 2004, ces demandes ont été acceptées sans conditions par l'Office fédéral de l'aviation civile. Lors de la transposition des JAR-OPS 1 dans l'EU-OPS 1[35] en 2007 et de la transposition des EU-OPS 1 dans les EASA OPS[36] en 2014, ces autorisations exceptionnelles ont été reprises et n'ont pas fait l'objet d'une réévaluation. Par conséquent, l'exigence concernant l'installation d'un système d'avertissement et d'alarme d'impact a été ignorée.

De plus amples informations sur les instruments et les équipements des aéronefs figurent à l'annexe A1.6.

[34] Lors du vol de l'accident, le HB-HOT a atteint une altitude maximale de 2833 m/M (cf. chapitre 1.1.2), ce qui correspond à une altitude-pression de 2670 m/M. Etant donné que Ju-Air n'emportait pas d'oxygène supplémentaire dans ses avions de type Ju-52, cette dernière a déclaré dans son manuel d'exploitation que les équipages ne devaient pas piloter les avions de type Ju-52 à des altitudes supérieures à l'altitude-pression de 10 000 pieds (3048 m) pendant les opérations de vol normales (cf. annexe A1.17).

[35] Règlement (CEE) n° 3922/91 du Conseil du 16 décembre 1991 relatif à l'harmonisation de règles techniques et de procédures administratives dans le domaine de l'aviation civile, modifié par le règlement (CE) n° 1899/2006 du Parlement européen et du Conseil du 12 décembre 2006.

[36] Règlement (UE) n° 965/2012 de la Commission du 5 octobre 2012 déterminant les exigences techniques et les procédures administratives applicables aux opérations aériennes conformément au règlement (CE) n° 216/2008 du Parlement européen et du Conseil.

1.17.1.9 Manuel d'exploitation

Les parties A à D du manuel d'exploitation (*Operations Manual* – OM) de l'entreprise de transport aérien présentaient la même structure que ceux d'une compagnie aérienne usuelle. Étant donné que Ju-Air effectuait uniquement des vols selon les règles de vol à vue, les autres parties usuelles ayant trait au vol aux instruments ne figuraient pas dans le manuel d'exploitation. Le manuel décrivait en détail certaines des procédures nécessaires à l'exploitation. Cependant, comme l'a montré une analyse de nombreux vols et documents de planification, les directives n'avaient qu'un caractère formel et n'étaient pas mises en œuvre par les équipages durant l'exploitation. Il arrivait donc souvent que le calcul de la masse et du centre de gravité ne soit pas effectué, ou alors seulement partiellement. Le plan de vol opérationnel (*Operational Flight Plan*) était rarement rempli de manière correcte et utilisé au sens des directives.

Le manuel d'exploitation ne contenait aucune directive concernant le vol en montagne.

De plus amples informations sur le contenu du manuel d'exploitation se trouvent à différents endroits dans l'annexe A1.17.

1.17.1.10 Surveillance de l'entreprise

Comme l'entreprise de transport aérien ne disposait d'aucun moyen permettant une analyse pertinente de son activité, ces clarifications ont été effectuées par le Service suisse d'enquête de sécurité (SESE) à la suite de l'accident. À cet effet, le SESE a saisi les données radar de 216 vols ayant eu lieu avec des avions du type Junkers Ju 52/3m g4e de Ju-Air et ayant été effectués entre avril 2018 et le jour de l'accident. Ces données radar ont été corrigées en fonction de l'altitude et des conditions de pression et de température applicables au moment du vol en question. La procédure appliquée, notamment lors du vol en montage, a ensuite été analysée sur la base de ces données. Lors de cette analyse, une attention particulière a été accordée aux aspects liés à la tactique de vol:

- phases de vol sans possibilité de faire demi-tour et/ou sans trajectoire de vol alternative ;
- survol à basse altitude de plateaux à 2500 m d'altitude et au-delà ;
- approche et survol à faible altitude de crêtes à un angle proche de 90 degrés par rapport à la crête ;
- approche latérale et verticale du sol/terrain avec des distances nettement inférieures aux distances minimales prescrites pour les vols à vue non commerciaux.

Les enquêteurs ont ainsi pu se faire une idée réaliste des principes d'exploitation et des procédures réellement appliquées. Pour environ un tiers (36.6 %) des vols analysés, ils ont constaté des manquements élémentaires aux principes garantissant la sécurité aérienne en montagne. 16.7 % des vols étaient caractérisés par des situations particulièrement dangereuses. Sur les 27 pilotes de Ju-Air, 16 étaient des pilotes ou anciens pilotes des Forces aériennes[37]. Les manquements aux règles de sécurité élémentaires ne concernaient pas l'ensemble des pilotes, mais surtout ceux ayant suivi une formation de pilote au sein des Forces aériennes. Des informations détaillées sur ces clarifications en matière d'exploitation figurent à l'annexe A1.18.

[37] La plupart de ces pilotes avaient suivi leur formation dans l'armée de l'air pendant la guerre froide. Selon les Forces aériennes suisses, la formation actuelle d'un pilote militaire et le système de sécurité aérienne de l'armée de l'air ne sont pas comparables aux conditions de l'époque et correspondent aux normes internationales en vigueur aujourd'hui.

1.17.2 Organisme de gestion du maintien de la navigabilité

La compagnie Ju-Air disposait d'une autorisation en tant qu'organisme de gestion du maintien de la navigabilité (*Continuing Airworthiness Management Organisation* – CAMO) selon l'annexe I (partie M) du règlement européen n° 1321/2014. Le personnel de Ju-Air mobilisé pour obtenir l'autorisation en tant que CAMO intervenait aussi dans les deux entreprises de maintenance.

De plus amples informations sur le CAMO, notamment sur l'organisation des procédures correspondantes et sur la qualification du personnel impliqué, figurent à l'annexe A1.17.

1.17.3 Entreprises de maintenance

L'association des amis des Forces aériennes suisses (VFL), appelée Ju-Air, disposait d'une autorisation en tant qu'entreprise de maintenance selon l'annexe II (partie 145) du règlement européen n° 1321/2014[38]. Ju-Air était donc autorisée à effectuer les travaux de maintenance sur les appareils Ju 52/3m g4e.

L'entretien, les réparations et les révisions des moteurs étaient sous-traités à l'entreprise Naef Flugmotoren AG dont l'atelier se trouvait dans le même bâtiment que Ju-Air. L'entreprise Naef Flugmotoren AG disposait également d'une autorisation en tant qu'entreprise de maintenance selon l'annexe II (partie 145) du règlement européen n° 1321/2014.

De plus amples informations sur l'organisation de la maintenance, notamment sur l'organisation des procédures correspondantes et sur la qualification du personnel impliqué, figurent à l'annexe A1.17.

1.17.4 Autorité de surveillance

1.17.4.1 Organisation

En sa qualité d'autorité nationale, l'Office fédéral de l'aviation civile (OFAC) est l'organe compétent en matière de surveillance de l'aviation civile suisse et de politique aéronautique, dans la mesure où ces missions ne sont pas assurées par l'Agence européenne de la sécurité aérienne (EASA), l'autorité aéronautique supranationale. Placé sous l'autorité du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC), l'OFAC veille à ce que l'aviation civile suisse bénéficie d'un niveau de sécurité élevé et se développe durablement.

Dans le cadre de cette enquête de sécurité, les principales unités (divisions) ayant fait l'objet d'une enquête pour déterminer leur influence sur le crash sont «Sécurité technique» et «Sécurité des opérations aériennes».

De plus amples informations sur l'organisation et les missions de l'OFAC figurent à l'annexe A1.17.

1.17.4.2 Inspections techniques

L'Office fédéral de l'aviation civile n'a consigné aucune irrégularité ni aucun commentaire dans les documents correspondants lors des cinq inspections de navigabilité effectuées depuis 2010 sur l'avion Junkers Ju 52/3m g4e, immatriculé HB-HOT.

[38] Règlement (UE) n° 1321/2014 de la Commission du 26 novembre 2014 relatif au maintien de la navigabilité des aéronefs et des produits, pièces et équipements aéronautiques, et relatif à l'agrément des organismes et des personnels participant à ces tâches.

L'OFAC a occasionnellement identifié des défauts lors d'audits effectués dans les entreprises de maintenance. Ces défauts ont été signalés par l'OFAC, qui a exigé leur élimination par l'entreprise concernée. Par la suite, les entreprises de maintenance n'ont pas respecté toutes les directives de l'OFAC. Ainsi, l'OFAC a de nouveau signalé ces défauts lors de l'audit consécutif. Malgré cela, les défauts n'étaient pas systématiquement éliminés.

L'organisme de gestion du maintien de la navigabilité (*Continuing Airworthiness Management Organisation* – CAMO) n'a pas été à la hauteur des processus d'assurance de qualité qui lui avaient été attribués. L'OFAC s'est opposé à certains points concernant les procédures et le personnel, mais les lacunes concernant l'absence de mécanismes de contrôle n'ont pas été identifiées.

L'OFAC manque d'expertise dans le domaine des moteurs à piston depuis un certain temps.

De plus amples informations sur l'activité de surveillance technique de l'OFAC figurent à l'annexe A1.17.

1.17.4.3 Autorisation d'exploitation

L'entreprise de transport aérien disposait d'un manuel d'exploitation usuel (*Operations Manual* – OM) avec les parties A à D d'un opérateur spécialisé dans le transport aérien commercial, dans lequel l'Office fédéral de l'aviation civile avait approuvé les procédures soumises à autorisation. Ce manuel d'exploitation reposait sur les directives du règlement européen n° 965/2012, qui est aussi directement applicable en Suisse[39].

Les avis divergent au sein de l'OFAC quant aux raisons pour lesquelles il était possible de s'écarter des exigences du règlement européen 965/2012. D'une part, il a été considéré que ces exigences ne s'appliqueraient qu'aux opérations de trafic aérien selon les règles de vol aux instruments. D'autre part, il a été estimé que la réglementation applicable aux opérations commerciales ne traitait pas suffisamment l'exploitation des grands avions historiques en vol à vue et que la Suisse avait droit à une certaine souplesse dans l'application des exigences. Cependant, selon ses propres informations, l'OFAC n'a pas documenté ces écarts sous la forme correcte et n'en a pas informé les autorités européennes. Les documents de Ju-Air ne contiennent aucune autorisation explicite de s'écarter des règles en question. En ce sens, l'écart de Ju-Air par rapport aux altitudes de vol minimales requises pour les opérations de trafic aérien commercial ainsi que par rapport aux autres exigences opérationnelles conformément au règlement européen 965/2012 a été toléré par l'OFAC.

Des informations détaillées sur l'autorisation d'exploitation figurent à l'annexe A1.17.

1.17.4.4 Surveillance opérationnelle

La surveillance opérationnelle de l'OFAC consistait en des audits, des vols d'inspection et des inspections au sol.

Durant les six années ayant précédé l'accident, l'Office fédéral de l'aviation civile a procédé au total à six inspections au sol non annoncées d'un appareil Ju-52/3m g4e de la compagnie Ju-Air. Ces inspections se sont déroulées pendant cinq jours sur des aéroports en Suisse. Lors de ces inspections, les collaborateurs

[39] Règlement (UE) n° 965/2012 de la Commission du 5 octobre 2012 déterminant les exigences techniques et les procédures administratives applicables aux opérations aériennes conformément au règlement (CE) n° 216/2008 du Parlement européen et du Conseil.

de l'OFAC ont vérifié non seulement les pièces d'identité de l'équipage et les documents de l'avion, mais aussi le calcul de la masse et du centre de gravité par l'équipage. Comme l'a montré l'analyse, le calcul de la masse et du centre de gravité de ces vols était erroné. Des masses à vide (*Basic Empty Mass* – BEM) incorrectes étaient utilisées sur les plans de vol opérationnels, ce qui aurait pu être constaté aisément dans les fiches de pesée figurant dans le manuel de vol de l'avion. Ces erreurs de calcul de la masse et du centre de gravité n'ont fait l'objet d'aucune critique lors de ces inspections au sol.

En plus des audits, les inspecteurs des opérations aériennes de l'OFAC effectuaient des vols avec des équipages de Ju-Air, notamment dans le cadre des contrôles en ligne périodiques organisés par l'entreprise de transport aérien. Ces vols avaient lieu sans passagers et n'étaient pas comparables aux itinéraires utilisés dans l'exploitation à des fins commerciales, car ils se déroulaient généralement dans les environs du terrain d'aviation et non en montagne. Pendant les dix années qui ont précédé l'accident, un seul vol avec passagers a été effectué en présence d'un inspecteur de l'OFAC. Il a eu lieu le 13 septembre 2016. L'analyse des données correspondantes montre que pendant ce vol, plusieurs fois des distances bien inférieures à la surélévation de sécurité d'au moins 1000 ft AGL (300 m/G) ont été franchies. Les crêtes des montagnes étaient également abordées de manière ascendante ou à angle droit. Ce choix de trajectoire de vol était clairement en contradiction avec les directives de l'OFAC pour les vols dans les Alpes, telles que publiées dans la Publication d'information aéronautique (AIP), VFR-Guide RAC 6-3 (voir chapitre A1.17.6.2.2). Ce vol a été jugé en tout point irréprochable par l'inspecteur de l'OFAC qui était à bord. De même, le calcul de la masse et du centre de gravité, dont le caractère erroné est avéré, n'a pas été critiqué.

Durant les années ayant précédé l'accident, l'Office fédéral de l'aviation civile a été audité par l'autorité de surveillance supranationale AESA. Suite à ces audits, l'AESA est arrivée, entre autres, à la conclusion que l'étendue des activités de surveillance de l'OFAC ne garantissait pas un contrôle approfondi du respect des règlements par les exploitants concernés. Dans le cadre de l'enquête sur l'accident du HB-HOT, des déficiences comparables ont été observées en ce qui concerne la supervision de Ju-Air. Un effet des mesures prévues sur la base de l'audit (augmentation de la durée et du nombre d'audits ainsi que des inspections en vol) n'a pas pu être déterminé pour la supervision de Ju-Air et les entreprises de maintenance.

De plus amples informations sur l'activité de surveillance opérationnelle, notamment sur les audits de l'OFAC, figurent à l'annexe A1.17.

1.18 Informations complémentaires

Une sélection des vols de Ju-Air analysés par le SESE après l'accident ainsi que des informations sur ces clarifications relatives à l'exploitation figurent à l'annexe A1.18.

1.19 Techniques d'investigation utiles ou efficaces

Les techniques d'investigation suivantes se sont avérées particulièrement utiles et efficaces dans le cadre de cette enquête:

- lecture et analyse des données extraites des cartes mémoires des téléphones portables et des caméras des passagers, non résistants aux chocs et donc partiellement endommagés ;
- analyse des bruits des moteurs afin de déterminer leur régime et leur état à partir d'enregistrements vidéo ;

- analyse photogrammétrique des photos et vidéos prises à bord de l'avion et par des personnes au sol pour déterminer les positions géographiques, les angles d'attitude et les chronogrammes.

Des informations détaillées sur les méthodes d'analyse utilisées figurent à l'annexe A1.19.

2 Analyse

2.1 Structure de l'analyse

Pour bien comprendre le déroulement du vol, il convient, dans un premier temps, d'examiner les aspects humains et de représenter les conditions techniques, météorologiques et d'exploitation. Cette analyse initiale sera suivie par une description de l'accident et de ses causes directes. Les aspects systémiques, c'est-à-dire les causes sous-jacentes de l'accident, seront évalués dans la troisième partie.

2.2 Conditions-cadres du vol

2.2.1 Conditions humaines

Le parcours professionnel des pilotes A et B, leur formation et leur expérience ne laissent planer aucun doute sur leur qualification et leur aptitude à effectuer le vol de Locarno à Dübendorf aux commandes du Ju 52/3m g4e immatriculé HB-HOT.

Tous les éléments de preuve réunis dans le cadre de l'enquête indiquent que les deux pilotes A et B étaient reposés et dans une bonne condition à la fois psychique et physique, lorsqu'ils ont entamé le vol retour vers Dübendorf. Le fait que l'équipage se soit rendu dans le Nord de la Suisse le 3 août 2018 à bord d'un avion à moteur et que le pilote B ait effectué plusieurs vols touristiques au départ de Dübendorf le matin du 4 août 2018 aux commandes d'autres Ju 52/3m g4e exploités par l'entreprise de transport aérien n'a eu aucun impact sur l'accident.

2.2.2 Conditions techniques

Des examens techniques approfondis ont révélé que le Junkers Ju 52/3m g4e immatriculé HB-HOT présentait diverses restrictions techniques. Ainsi, les trois moteurs en étoile à neuf cylindres du type BMW 132 A3 n'atteignaient plus le régime prescrit par le fabricant. Il a également été prouvé que les performances de vol définies dans le manuel d'exploitation du type d'appareil ne pouvaient plus être garanties. En outre, les recherches effectuées sur l'épave ont mis en lumière de nombreux défauts techniques comme des dommages dus à la corrosion au niveau de la structure de l'appareil. Il est apparu que divers composants n'étaient pas entretenus correctement ou avaient été remplacés par des pièces reconstruites affichant une qualité insuffisante. Au vu de ces nombreuses irrégularités techniques, l'avion Ju 52/3m g4e immatriculé HB-HOT ne satisfaisait pas aux exigences matérielles et formelles des consignes de navigabilité au début du vol. En revanche, aucune relation de cause à effet n'a pu être démontrée entre les défauts relevés et l'accident. Aucun élément n'indique que ces manquements aient influencé les actions et les décisions de l'équipage de conduite. La veille du vol considéré, ce dernier avait effectué la liaison Dübendorf – Locarno sans formuler la moindre critique. De même, les autres équipages ayant piloté l'aéronef HB-HOT pendant les semaines et les mois précédant l'accident n'avaient formulé aucune critique déterminante. Il semble donc que les membres d'équipage se soient habitués aux caractéristiques de vol restreintes et que les autres défauts n'aient pu être découverts par ces derniers. L'état non conforme de l'avion HB-HOT sur le plan technique et ses performances de vol limitées représentent toutefois des facteurs de risque (*factors to risk*) devant être corrigés sur les appareils du même type.

2.2.3 Conditions météorologiques

Les prévisions météorologiques mises à la disposition de l'équipage avant le vol n'indiquaient aucune condition inhabituelle ou particulièrement difficile. Comme le montrent les résultats de l'enquête, les conditions rencontrées pendant le vol ont

correspondu dans une large mesure aux prévisions établies. Le pilote B avait décollé de Dübendorf en cours de matinée et avait donc déjà pu se faire une idée de la situation météorologique. Juste avant l'accident, les deux pilotes avaient survolé la crête principale des Alpes à bord d'un avion léger. Compte tenu de leur grande expérience, on peut penser que les membres d'équipage disposaient de connaissances suffisantes sur les conditions météorologiques actuelles. Ils devaient savoir que les zones locales traversées par des averses ou des orages pouvaient être aisément contournées. La situation météorologique était favorable à un vol à vue au-dessus des Alpes et permettait de choisir entre plusieurs itinéraires sans risque entre Locarno et Dübendorf. Les prévisions et les conditions réelles auraient permis à tout moment un retour au Tessin. La situation météorologique sur le parcours n'a réservé aucune surprise et était aisément appréciable. Par ailleurs, il ne fait aucun doute que les pilotes aguerris et dûment formés connaissaient le phénomène de l'altitude de densité relativement élevée en cas de températures estivales. Bien que, comme précisé plus haut, les performances de l'avion ne correspondaient plus aux indications attestées par le fabricant, les températures observées au cours de cette journée ne représentaient aucune restriction critique pour le vol planifié.

2.2.4 Conditions opérationnelles

Le 4 août 2018, l'équipage a rejoint l'aérodrome de Locano environ une heure et demie avec le décollage. Il disposait donc d'un temps suffisant pour préparer l'avion et planifier le vol. Dans le cadre de la préparation du vol, il était prévu de calculer la masse et le centre de gravité de l'avion, puis de les saisir dans le plan de vol opérationnel (*Operational Flight Plan*). Les plans de vol trouvés après l'accident (plan du vol du 3 août 2018 de Dübendorf à Locano et plan du vol considéré) montrent que le calcul de la masse et du centre de gravité était incomplet et incorrect. En outre, aucune preuve de calcul ou, tout au moins, d'estimation de la performance au décollage, pendant le vol et à l'atterrissage n'a pu être découverte. Conformément aux résultats de l'enquête, les membres d'équipage de Ju-Air renonçaient fréquemment à ces calculs avant le vol, bien qu'ils soient prescrits dans les manuels de la compagnie aérienne. Il semble donc que les deux pilotes A et B se soient eux aussi habitués à passer outre ces consignes d'exploitation et que la préparation du vol n'ait pas été effectuée dans son intégralité. Les directives supranationales pour le décollage et la croisière en ce qui concerne la distance de roulage au décollage, le taux de montée et le franchissement d'obstacles n'ont pas été respectées pendant le vol de l'accident.

Dans le cas présent, il a été démontré que l'avion affichait une masse inférieure à la masse maximale au décollage, aussi bien lors du vol aller du 3 août 2018 que de l'accident du 4 août 2018. Pour les deux vols, le centre de gravité de l'avion se situait au-delà de la limite de centrage arrière prescrite par le fabricant. Notons ici que l'équipage n'aurait pas pu savoir que le centre de gravité de l'avion était au-delà de la limite autorisée, même s'il avait calculé correctement la masse et le centre de gravité grâce aux documents disponibles et au logiciel de planification des vols utilisé par Ju-Air. En effet, les données initiales étaient incorrectes et l'exécution du logiciel présentait des défaillances, ce qui représente un facteur systémique de l'accident.

2.3 Accident

2.3.1 Aspects opérationnels

Après son décollage du 4 août 2018, le Junkers Ju 52/3m g4e immatriculé HB-HOT a tout d'abord survolé sans problème la riviera et le Val Blenio en direction de la plaine de la Greina. La zone de calme *«à éviter»* signalisée sur la carte

aéronautique au niveau de la plaine de la Greina a été survolée à une altitude de 120 à 300 m, ce qui se traduit par un manque de respect de cette région par les membres d'équipage. Dans les années précédant l'accident, la population avait déjà déposé plusieurs plaintes faisant suite à des survols à basse altitude des sites de protection de la faune par des appareils de Ju-Air. L'Office fédéral de l'aviation civile avait exigé de la compagnie la mise en œuvre de mesures de sensibilisation et de protection correspondantes, qui, tout au moins chez les deux pilotes A et B, sont manifestement restées lettre morte.

Quelques minutes plus tard, l'avion survolait, dans la région d'Ilanz, la Surselva sur un cap nord-est, puis amorçait un virage vers la gauche relativement serré. Cette manœuvre conduisit l'avion au-dessus de Ruschein (GR), où résidait une connaissance de l'hôtesse de l'air. Peu avant, cette dernière avait envoyé un message à son amie pour l'informer que le Ju 52/3m g4e survolerait bientôt sa commune. Il est donc vraisemblable que la manœuvre visible depuis le sol soit liée à cette annonce.

À ce stade, le HB-HOT se trouvait en phase de montée et atteignit, au-dessus de la région de Nagens, son altitude la plus élevée de 2833 m lors de ce dernier vol.

Peu de temps après avoir dépassé le refuge de montagne de Nagens, l'avion afficha pendant un certain temps une vitesse sol de quelque 140 km/h seulement. Si l'on considère le vent de face qui dominait à ce moment, la vitesse vraie de l'appareil avoisinait les 180 km/h. En arrivant dans la vallée encaissée au sud-ouest du Piz Segnas, l'avion évoluait donc à une vitesse supérieure d'environ 44 % à la vitesse de décrochage. Compte tenu des turbulences enregistrées jusque-là, du virage nécessaire au survol du col et de la vitesse de décrochage supérieure que celui-ci impliquait, cette marge de sécurité était toutefois insuffisante. En outre, l'avion affichait déjà une altitude tendancielle de moins de 200 m par rapport au col de Segnas, ce qui, associé à la faible vitesse, représentait un risque non négligeable pour la suite du vol.

Cette situation ne s'est pas améliorée lorsque la vitesse s'est momentanément accrue d'environ 50 km/h à quelque 230 km/h (vitesse vraie), car cette hausse ne tenait pas à une augmentation de la puissance. Elle s'explique davantage par une légère descente d'environ 80 m qui réduisit à 115 m la hauteur de l'appareil par rapport au col de Segnas. Ce dernier est le point le plus bas de la chaîne de montagnes qui délimite la vallée encaissée. Compte tenu de l'étroitesse topographique du passage, les élévations du sol nettement supérieures à l'altitude du col doivent être prises en compte lors du choix de la trajectoire, afin de garantir le survol de la crête concernée en toute sécurité.

Suite à l'augmentation de la puissance des trois moteurs d'environ 40 tours par minute, l'avion est remonté près de 25 m à 2767 m, soit une altitude de quelque 140 m par rapport au col de Segnas. En même temps, la vitesse vraie de l'appareil s'est toutefois réduite à environ 200 km/h et le vent de face s'est progressivement calmé.

L'analyse du réglage de la puissance et des régimes des trois moteurs montre que ceux-ci pouvaient être réglés et que l'avion réagissait correctement aux changements de puissance, sans pour autant atteindre le régime maximal autorisé ni le régime maximal attendu au vu des restrictions techniques relevées. On peut donc en déduire qu'il subsistait une réserve de puissance malgré l'altitude de densité relativement élevée et l'état déficient des moteurs.

L'analyse des mouvements d'ailerons et de la réaction de l'appareil montre que le HB-HOT était toujours manœuvrable durant cette phase de vol et qu'il réagissait convenablement.

Peu de temps après, le HB-HOT est entré dans le bassin de la vallée au sud-ouest du Piz Segnas et à partir de là, il a été dirigé par l'équipage sur une route nord-nord-est approximativement au milieu de la vallée. L'équipage souhaitait probablement offrir ainsi aux passagers une vue imprenable sur le Martinsloch, une curiosité géologique réputée. Compte tenu de la faible hauteur de vol et de l'étroitesse de la vallée, les pilotes ne pouvaient pas effectuer de demi-tour en toute sécurité et n'avaient plus d'autre choix que le survol de la crête du col de Segnas. L'un des principes élémentaires du vol en montagne consiste à envisager un changement de trajectoire ou un demi-tour à titre d'alternative. Le non-respect de cette exigence déterminante pour la sécurité ainsi que la faible hauteur de vol par rapport au col ont donné lieu à une situation très risquée, qui interdisait toute nouvelle erreur, perturbation ou influence extérieure. Ce type de pilotage s'impose donc comme l'une des causes expliquant le déroulement ultérieur du vol.

Comme le montre la reconstitution de la trajectoire de l'appareil et des conditions de vent, l'avion, qui longeait à présent les Tschingelhörner, a amorcé une descente de quelques secondes, porté par des courants descendants atteignant une vitesse verticale de 2 à 5 m/s. La présence de tels courants à cet endroit de la vallée a pu être démontrée par les analyses météorologiques détaillées. Ce phénomène n'a rien d'extraordinaire dans les zones montagneuses.

Les enregistrements vidéo montrent que l'équipage a engagé un virage vers la droite pendant la descente, alors que l'avion occupait une position à peu près perpendiculaire au Martinsloch, puis un virage vers la gauche. La vitesse vraie avoisinait alors les 180 km/h et la différence entre l'assiette et la pente a augmenté jusqu'à environ 15 degrés pendant le virage.

Durant cette phase, la puissance des moteurs a été légèrement réduite et il semble que l'équipage ait été occupé à synchroniser les trois moteurs. Pendant que l'assiette de l'avion continuait d'augmenter, la trajectoire se raidissait vers le bas.

Il est possible que l'équipage, occupé avec les moteurs et dans l'incapacité de reconnaître aisément la descente en raison du paysage, ait inconsciemment augmenté l'assiette à titre de compensation (cf. figure 21). En outre, la position du centre de gravité au-delà de la limite de centrage arrière a favorisé ce processus tout en renforçant l'instabilité de l'avion autour de l'axe transversal, ce qui est un facteur qui a directement contribué à l'accident.

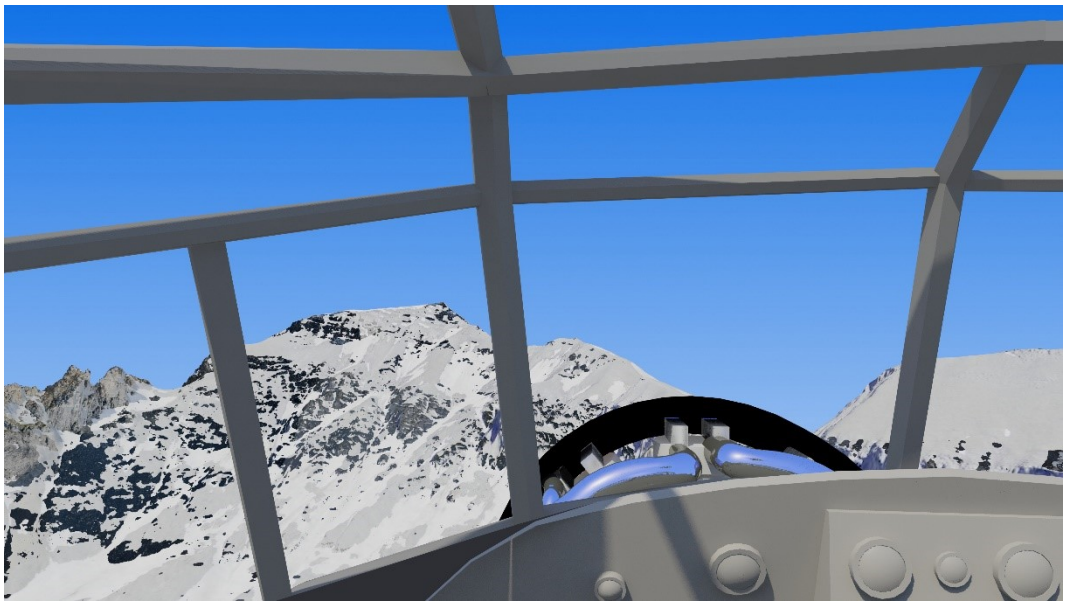

Figure 21: reconstitution de la vue depuis le poste de pilotage du HB-HOT au point F9. Le Piz Segnas se situe dans le champ de vision. Représenté à partir d'un modèle simplifié de l'avion et d'un modèle numérique de terrain en 3D. L'absence de points visibles derrière la première ligne d'horizon n'a pas permis de reconnaître immédiatement l'entraînement de l'appareil par le courant descendant.

L'avion est descendu à une vitesse d'environ 6 m/s. Par la suite, cette vitesse a augmenté, mais il ressort de l'analyse de la situation de vol, de la vitesse et des courants de la vallée encaissée au sud-ouest du Piz Segnas, que cette accélération ne peut plus être imputée à un courant descendant. Étant donné le niveau élevé de l'assiette et l'orientation significative de la trajectoire vers le bas, il est également exclu que cette descente ait été l'œuvre de l'équipage. Il est plus probable que l'appareil ait subi un décrochage tout au moins partiel. Ce phénomène est indépendant de la vitesse et se produit lorsque l'angle d'incidence critique du profil d'ailes est dépassé.

Ce décrochage (*stall*) peut être expliqué de manière aérodynamique comme suit :

La descente du HB-HOT avait d'abord été causée par une zone de courants descendants. La descente, partiellement compensée par une augmentation de l'assiette, a conduit à une situation de vol proche de l'angle d'incidence maximal. Dans ce contexte, la hausse supplémentaire de l'angle d'incidence lors de l'entrée dans un courant ascendant plus ou moins fort a suffi pour provoquer un décrochage au moins partiel. Cette évolution n'aurait pas été possible avec un courant descendant durable ou lentement décroissant. Les courants enregistrés dans la vallée montrent que l'avion est sorti de la zone de courants descendants pour entrer dans une zone de courants ascendants. Le changement de la composante verticale du vecteur vent de 2 – 5 m/s en descente à 3 – 0 m/s en montée a suffi pour dépasser l'angle d'incidence critique (cf. figure 22 et figure 23). Comme le montrent les mesures et le calcul des courants, des valeurs de cisaillement plus élevées sont également possibles. Ce genre de turbulences n'est pas rare en montagne et devient dangereux à proximité du sol.

Figure 22: vol stationnaire en zone de courants descendants. Noir: axe longitudinal de l'avion; pointillés noirs: axe horizontal; vert: corde; vecteur jaune: vecteur de mouvement de l'avion par rapport aux courants descendants; vecteur bleu: vecteur des courants descendants; vecteur rouge: trajectoire de vol, c.-à-d. vecteur de mouvement de l'avion dans l'espace; angle violet: assiette – angle formé par l'axe longitudinal de l'avion et l'horizontale; angle rouge: pente – angle formé par la trajectoire de l'avion et l'horizontale; angle jaune: incidence – angle formé par la direction du vent, qui correspond au vecteur jaune inversé, et la corde.

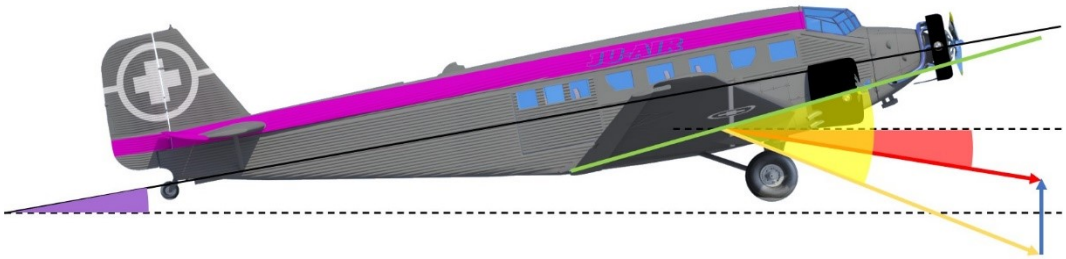

Figure 23: entrée dans une zone de courants ascendants à partir d'une zone de courants descendants. Compte tenu de l'inertie de l'appareil, le vecteur de la trajectoire (rouge) reste constant pendant un bref instant; vecteur bleu: vecteur des courants ascendants; vecteur jaune: vecteur de mouvement de l'avion par rapport aux courants ascendants. L'incidence (jaune) augmente de manière significative. Noir: axe longitudinal de l'avion; pointillés noirs: axe horizontal; vert: corde; angle violet: assiette – angle formé par l'axe longitudinal de l'avion et l'horizontale; angle rouge: pente – angle formé par la trajectoire de l'avion et l'horizontale; angle jaune: incidence – angle formé par la direction du vent, qui correspond au vecteur jaune inversé, et la corde.

L'un des principes élémentaires du vol en montagne consiste donc à augmenter la vitesse de vol et, par là même, la puissance de l'avion en cas de turbulences et à l'approche du sol, afin que les cisaillements du vent ne puissent pas entraîner un décrochage, même si celui-ci est souvent de courte durée. Il convient donc de veiller à ce que l'avion ne soit pas trop sollicité par les rafales ou les débattements afin que la vitesse de manœuvre, facile à calculer, soit la vitesse optimale. Lorsqu'il a franchi le vent cisaillant, le HB-HOT affichait une vitesse vraie avoisinant les 180 km/h, soit, dans les conditions environnantes, une valeur supérieure d'environ 55 km/h ou 44 % à la vitesse de décrochage. Au vu des turbulences fréquentes en montagne, cette marge était toutefois insuffisante.

Il a été démontré que l'équipage n'avait pas exploité la réserve de puissance des moteurs pour atteindre systématiquement une vitesse qui se situe dans la plage de la vitesse de manœuvre, c'est-à-dire, compte tenu des conditions régnantes, une vitesse vraie de 197 km/h. Si la vitesse de manœuvre ne peut être atteinte en vol horizontal, ce qui est possible avec des appareils dont le rapport masse/puissance est relativement élevé, elle doit être recherchée pendant la descente. Pour cela, il faut disposer d'une réserve de hauteur suffisante. Durant

les vols en montagne, les avions doivent toujours disposer d'une réserve de puissance minimale pour sécuriser le vol.

Dans le cas présent, l'équipage n'a pas respecté ce principe fondamental, ce qui est notamment confirmé par le fait qu'ils aient encore réduit la puissance des trois moteurs à un moment où l'appareil volait trop bas et trop lentement. Le choix d'une vitesse de vol trop faible pour cette trajectoire de vol est un facteur supplémentaire à l'origine de l'accident.

Les enregistrements vidéo montrent également que l'inclinaison vers la gauche s'est accrue en permanence pendant cette situation de vol identique à un décrochage. Lorsqu'elle a atteint les 30 degrés, l'équipage a d'abord braqué légèrement, puis fortement l'aileron gauche vers le bas, afin de corriger cette inclinaison latérale par un roulis opposé sur l'aile droite. Ainsi, on peut en conclure qu'il souhaitait stabiliser l'appareil qui virait à gauche en conservant une inclinaison latérale constante et qu'il n'avait probablement pas encore pris conscience du décrochage. À ce moment, l'avion se déplaçait à quelque 2725 m/M, soit une hauteur d'environ 100 m par rapport au niveau du col de Segnas.

Le mouvement de roulis à gauche ne s'est toutefois pas ralenti et l'inclinaison latérale s'est accentuée. Les ailerons ont alors été ramenés en position neutre ou actionnés en vue d'un virage vers la gauche. En même temps, le nez de l'avion a commencé à piquer vers le sol. Ce phénomène peut s'expliquer comme suit:

- Il est prouvé que l'équipage avait perdu le contrôle de l'appareil et ne pouvait interrompre, du moins pour le moment, le mouvement de roulis vers la gauche.
- Ce roulis incontrôlé se produisit car l'aile gauche située à l'intérieur du virage subissait un décrochage plus important que l'aile droite, d'où la répartition asymétrique de la portance. Il se peut d'ailleurs que les turbulences aient également provoqué cette asymétrie. Comme la portance de l'aile droite était donc supérieure à celle de l'aile gauche, elle a accentué encore plus le mouvement de roulis.
- En cas de décrochage pendant un virage, les Junkers Ju 52/3m g4e de Ju-Air sont connus pour basculer vers l'intérieur du virage, ce qui signifie que l'inclinaison latérale de l'appareil augmente tandis que l'assiette et le rayon du virage diminuent.
- L'incidence doit être réduite pour mettre fin au décrochage et reprendre le contrôle de l'avion. Pour cela, il faut réduire le débattement de la gouverne de profondeur et braquer l'aileron dans la direction du basculement. Il ne faut jamais tenter d'interrompre le mouvement de roulis avec un braquage dans le sens opposé. En effet, le débattement vers le bas de l'aileron de l'aile inclinée vers l'intérieur du virage a augmenté encore plus l'incidence de celle-ci et empêché l'air de s'écouler à nouveau autour de la surface portante.
- Dans le cas présent, les pilotes expérimentés ont réagi correctement et ont apparemment tenté de reprendre le contrôle de l'avion en maîtrisant le mouvement de basculement au moyen des commandes.

Comme démontré lors d'une simulation, ce processus de compensation n'a pu toutefois être entièrement mis en œuvre en raison de la proximité du sol.

Le déroulement mécanique du vol ayant précédé l'impact peut être décrit ainsi: comme l'attestent les enregistrements vidéo pris à bord, l'avion, dont la trajectoire déclinait de plus en plus, subissait des oscillations de basse fréquence (*buffeting*) qui révèlent un nouveau décrochage de la surface portante ou du stabilisateur horizontal. Le dernier cliché de l'appareil avant le crash montre que les ailes étaient moins courbées vers le haut que dans un vol horizontal et que la gouverne de

profondeur était à moitié braquée vers le haut. La gouverne de direction débattait légèrement vers la droite. À ce moment, l'avion se trouvait à environ 108 m au-dessus du sol. Quelques secondes plus tard, il s'écrasait à une vitesse d'environ 200 km/h, après un nouveau mouvement de roulis de 186° vers la gauche, selon une trajectoire quasiment verticale. Ces valeurs indiquent également un nouveau dépassement de l'incidence critique dû à une vitesse de décrochage élevée (*accelerated stall*) pendant le processus de compensation à une vitesse de vol entre 170 et 200 km/h. La dernière photographie du HB-HOT révèle en outre une répartition de la portance majoritairement unilatérale, qui s'est traduite par un taux de roulis d'environ 90° par seconde durant l'ultime phase du vol.

L'analyse des bruits des moteurs et l'enquête scientifique des commandes des moteurs montrent que le dispositif de limitation du plein régime était activé pendant cette phase. En d'autres termes, les moteurs ne développaient plus leur puissance maximale.

2.3.2 Aspects humains

Cette section établit une comparaison entre les manœuvres effectuées par l'équipage et les principes reconnus du vol en montagne.

Le déroulement représenté jusqu'ici indique que l'avion accidenté a survolé la vallée encaissée située au sud-ouest du Piz Segnas dans les conditions suivantes:

- La trajectoire de vol, qui suivait une ligne pratiquement centrale, rendait impossible tout demi-tour sûr ou le choix d'un autre itinéraire que celui du passage du col de Segnas.
- L'équipage ayant décidé de ne pas augmenter son altitude, la faible hauteur par rapport au col de Segnas pendant l'approche du col aurait signifié une traversée de la chaîne de montagnes à faible altitude.

La trajectoire choisie s'oppose donc aux principes élémentaires du vol en montagne transmis dès la formation de base des futurs pilotes. L'une des règles fondamentales du vol en montagne stipule que les pilotes doivent, pendant le vol entier, disposer d'une ou de plusieurs alternatives en cas d'imprévu. Concrètement, cela veut dire que l'équipage doit à chaque moment pouvoir effectuer un demi-tour ou emprunter une nouvelle trajectoire en cas, par exemple, de courants descendants, de problèmes techniques ou d'obstacles soudains comme des nuages ou d'autres aéronefs. Dans les zones montagneuses, il est en outre essentiel de conserver une distance suffisante par rapport au terrain. Comme les turbulences et autres tourbillons se manifestent essentiellement sous les crêtes, les risques potentiels peuvent donc être réduits en maintenant une distance suffisante avec la montagne. Il est admis que la hauteur minimale légale de 150 m au-dessus des zones non habitées n'est pas suffisante pendant les vols en montagne. Ainsi, la carte aéronautique de la Suisse recommande une hauteur de vol minimale de 300 m par rapport aux cols à survoler sur les principaux itinéraires alpins. L'expérience montre qu'une hauteur minimale supérieure peut parfois s'avérer nécessaire en fonction de la topographie et des conditions météorologiques.

La question est maintenant de savoir pourquoi les deux pilotes expérimentés et dûment formés ont pris autant de risques en entrant dans la vallée encaissée au sud-ouest du Piz Segnas et posé les bases de la catastrophe.

L'enquête a démontré qu'ils connaissaient tous deux les principes élémentaires du vol en montagne et qu'ils ne se sont donc pas placés dans cette périlleuse situation par simple ignorance. Il est également exclu que l'altimètre ait affiché une hauteur de vol incorrecte au moment de l'entrée dans la vallée. Les enregistrements vidéo

des données affichées par l'altimètre durant le vol montrent que ce dispositif était réglé sur une valeur de référence de la pression appropriée. La comparaison entre l'affichage et l'altitude réelle déterminée à l'aide de données radar et de mesures photogrammétriques prouve l'exactitude des données affichées et indique donc que l'altitude réelle était, en raison du profil des températures dans l'atmosphère, supérieure à l'altitude affichée. Conformément aux données à disposition, l'avion a pénétré dans la vallée à une altitude réelle de 2750 m, alors que l'affichage du cockpit indiquait une hauteur d'environ 2650 m. Anciens membres des forces aériennes, les deux pilotes possédaient d'amples connaissances géographiques et avaient été informés de la hauteur des principaux cols alpins durant leur formation de pilotes militaires. On peut donc penser qu'ils connaissaient la hauteur du col de Segnas (2625 m), même sans consulter de carte, et qu'ils ont donc sciemment décidé d'entrer dans la vallée encaissée. Il se peut également que l'équipage ait négligé l'altimètre et s'en soit tenu à ses impressions visuelles, comme souvent lors de vols en montagne.

Ce comportement à risque peut en fin de compte s'expliquer par la combinaison de la formation au pilotage et d'un développement des deux pilotes dans la culture opérationnelle de Ju-Air, qui a finalement conduit à une accoutumance à de telles situations. Au cours des mois et années précédant l'accident, plusieurs vols critiques confirment en effet que les pilotes A et B ont parfois transgressé des dispositions en matière de sécurité lors de vols individuels ou communs et entrepris des actions imprudentes allant à l'encontre des règles en vigueur:

- Durant le vol Dübendorf – Locarno du 3 août 2018, le pilote B, alors aux commandes du Junkers Ju 52/3m g4e immatriculé HB-HOT, s'est ainsi à plusieurs reprises approché dangereusement des flancs de la montagne ou a opté pour une hauteur de vol inférieure aux valeurs minimales.
- Le 6 juillet 2018, le pilote A aux commandes du Junkers Ju 52/3m g4e immatriculé HB-HOT et le pilote B en sa qualité de copilote ont survolé l'agglomération de Munich à une altitude largement en-dessous des prescriptions minimales.
- L'analyse des vols de Ju-Air effectués entre avril 2018 et le jour de l'accident révèle que le pilote A a participé à au moins six vols ayant connu des situations extrêmement risquées. Le pilote B était à ses côtés dans quatre cas.
- L'analyse des vols de Ju-Air effectués entre avril 2018 et le jour de l'accident révèle que le pilote B a participé à au moins huit vols ayant connu des situations extrêmement risquées. Le pilote A était à ses côtés dans quatre cas.
- Le 6 juillet 2013, le pilote B, alors aux commandes de l'avion apparenté Junkers Ju 52/3m g4e immatriculé HB-HOP, et le pilote A dans le rôle du copilote ont effectué un survol particulièrement dangereux de la crête du col de Segnas. À cette occasion, l'appareil s'est approché de la crête en montée, sans possibilité de demi-tour, et l'a finalement survolée à une hauteur d'à peine 30 m.

La tendance des deux membres d'équipage à passer outre les règles de sécurité et à prendre des risques élevés[40] s'impose comme un fil conducteur dans le déroulement des faits. Cette hypothèse est soutenue par d'autres exemples

[40] Le *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge*, publié par l'organisme de réglementation de l'aviation civile aux États-Unis (*Federal Aviation Administration)* en 2016, décrit ce type de comportement dangereux comme suit: Anti-autoritaire: ce comportement se manifeste chez les personnes qui s'opposent aux directives. Elles appliquent le principe selon lequel *«personne ne peut leur dire ce qu'elles doivent faire».* Elles se contrarient à la moindre prescription comportementale ou considèrent les règles, directives et procédures comme dénuées de sens et foncièrement inutiles. Il leur appartient, ceci étant dit, de remettre l'autorité en question s'ils constatent une erreur.

présentés dans l'annexe A1.5, qui propose également d'autres explications aux actions observées.
En résumé, il aurait été possible, compte tenu des conditions régnant le jour de l'accident, de traverser sans problème la vallée située au sud-ouest du Piz Segnas à une altitude adéquate et de rejoindre le versant nord des Alpes par la crête du col de Segnas. Outre les nombreuses analyses à disposition, cette conclusion est également illustrée par le fait qu'une minute avant l'accident du HB-HOT, un élève-pilote et son instructeur, installés à bord d'un avion à moteur du type Cessna C152, ont aisément survolé la crête du col de Segnas du sud au nord. L'équipage a choisi une trajectoire de vol latérale qui aurait permis un demi-tour ou une trajectoire de vol alternative à tout moment. Cependant, cet avion a également été conduit au-dessus de la crête à une hauteur non conforme aux règles pour un vol en montagne en sécurité telles que publiées dans la publication d'information aéronautique (*Aeronautical Information Publication* – AIP) de la Suisse. L'équipage du Junkers Ju 52/3m g4e accidenté était manifestement habitué à transgresser les règles de sécurité reconnues et à prendre des risques élevés, ce qui a conduit à la tactique de vol décrite. Ce comportement présente donc un facteur qui contribue directement à l'accident.

2.4 Aspects systémiques

2.4.1 Généralités

Toute enquête de sécurité exhaustive ne peut s'appuyer uniquement sur la détermination des causes directes et des facteurs ayant favorisé un accident. L'analyse des aspects systémiques permet généralement de définir le principal besoin d'action, notamment dans la perspective d'un renforcement de la sécurité. Cette méthode a également fait ses preuves dans le cas présent et a permis d'établir plusieurs recommandations et avis de sécurité.

2.4.2 Organisation et gestion des opérations aériennes

2.4.2.1 Analyse de la tactique de vol en montagne des équipages

Jusqu'à la date de l'accident, l'entreprise de transport aérien n'effectuait aucune évaluation ni contrôle des données de vol réelles. Un tel programme de surveillance (*Flight Data Monitoring)* est aujourd'hui monnaie courante dans le transport aérien commercial. Il offre une image réaliste de l'exploitation et garantit ainsi une détection précoce des défaillances opérationnelles.

Dans le cadre de son enquête, le SESE a analysé les données radar de 216 des quelque 400 vols effectués par Ju-Air entre avril 2018 et le jour de l'accident. Il s'est concentré sur la tactique de vol des équipages en matière de sécurité pendant les vols en montagne et classé notamment les phases de vol durables sans possibilité de demi-tour ou de changement de trajectoire comme «extrêmement risquées» au vu des caractéristiques et de l'état technique de la flotte. En montagne, la hauteur de vol minimale à elle seule n'est pas un moyen suffisant pour estimer les risques potentiels, car la puissance et les performances d'un aéronef doivent toujours être prises en compte. Le contexte général a donc été systématiquement intégré à l'évaluation des vols.

Celle-ci a mis en évidence de nombreux cas dans lesquels les avions de Ju-Air ont effectué des vols en montagne à une hauteur inférieure à 300 m par rapport au sol. Dans une entreprise de transport aérien orientée sécurité, de telles situations peuvent être relevées et analysées pour garantir la sécurité aérienne en question. Dans le cadre de l'enquête, ces événements ont toutefois fait l'objet d'une évaluation uniquement statistique. En revanche, un regard particulier a été

porté sur 44 situations relevées à l'occasion de 36 vols. Ces cas affichaient une forte probabilité d'accident dû aux risques élevés encourus par les équipages.

L'analyse consécutive montre que les pilotes ont fréquemment opté pour des trajectoires qui n'aurait permis ni alternative ni demi-tour en cas de courants ascendants et descendants ou de dérangements techniques. En outre, les hauteurs de vol sélectionnées auraient laissé une marge de manœuvre infime dans de telles circonstances. Il a également été constaté que, les équipages ont très souvent frôlé les parois et flancs de montagnes. Les pilotes concernés ont donc systématiquement pris des risques, qui auraient pu être évités, et mis en danger des vies humaines et du matériel. Les pilotes expérimentés et qualifiés de Ju-Air connaissant assurément les principes élémentaires du vol en montagne ainsi que les dispositions générales du droit aérien applicable au vol à vue, de tels comportements doivent même être considérés comme des manquements insouciants (*reckless violation*) conformément au schéma de la culture juste appliqué par l'entreprise de transport aérien et l'Office fédéral de l'aviation civile.

L'analyse du parcours des pilotes, qui, du point de vue de l'enquête de sécurité, ont enfreint la réglementation, montre que les équipages avec une formation de pilote des Forces aériennes négligeaient souvent les règles communément admises en matière de vol en montagne.

Il est aisément concevable que l'habitude des équipages de la compagnie d'ignorer les règles reconnues de la navigation aérienne ou de prendre des risques élevés ait aussi influencé les pilotes A et B. Cette habitude de passer outre les règlements représente donc un facteur systémique de l'accident.

Plusieurs pilotes cadres de Ju-Air s'étaient fait remarquer par des manquements répétés et étaient impliqués dans le choix de trajectoires périlleuses. Mais rien ne permet de penser que ce vol insouciant ait été soutenu activement par les responsables de la compagnie. Compte tenu de l'absence de mécanismes de contrôle, ces derniers n'étaient toutefois pas en mesure de reconnaître la violation systématique des règles de sécurité, ce qui, en soi, constitue également un facteur systémique du crash.

2.4.2.2 Formation et contrôle en ligne

Le programme de formation nécessaire à l'obtention de la qualification de type (*Type Rating*) pour le Junkers Ju 52/3m g4e a été analysé notamment sous l'angle des aspects déterminants dans le cas considéré. Dans le cadre de cette formation, les équipages ont été familiarisés au comportement du type d'avion considéré à l'approche d'un décrochage (*stall*) et en cas de décrochage lors d'un vol rectiligne à faible vitesse, ainsi qu'aux mesures de redressement nécessaires (*stall recovery*). Ces entraînements ont été effectués sur des avions relativement légers dont le centre de gravité était situé à l'avant puisque les seules personnes à bord étaient les membres d'équipage. Pour préserver le matériel, les pilotes n'ont cependant pas pu s'exercer au redressement dans un virage et avec une charge normale. Bien que cette décision soit compréhensible, il convient malgré tout de rappeler que le comportement d'un avion qui décroche varie notablement en fonction de son état de chargement. De même, les conditions prévalant au cours d'un virage ou en cas de vitesses plus élevées et d'accélérations diffèrent sensiblement de celles d'un vol rectiligne homogène. Même si le fait que les équipages n'aient pas été habitués à toutes les situations critiques liées au comportement des avions lors de décrochages n'a pas contribué avec certitude à l'accident du HB-HOT, il demeure un important facteur de risque (*factor to risk*) qu'il y a lieu de corriger.

L'analyse a également porté sur le contrôle des compétences nécessaires au maintien de la qualification de type (*proficiency check*) et sur le contrôle en ligne (*line check*) des pilotes A et B par des *Training Captains* de Ju-Air. Les critiques ou suggestions d'amélioration sont étonnamment rares dans les justificatifs correspondants et la performance des pilotes y est toujours jugée bonne, voire excellente. Le dernier contrôle en ligne du pilote A remontait au 7 avril 2018 et celui du pilote B au 12 mai 2018. Les données radar, toujours disponibles, ont pu être analysées et montrent que même sur ces vols, les hauteurs de sécurité, qui sont définies dans le guide VFR de la publication d'information aéronautique (*Aeronautical Information Publication* - AIP), étaient nettement inférieures aux hauteurs minimales légales. En outre, aucune attention n'a été accordée aux principes essentiels pour la sécurité du vol en montagne. Malgré ces infractions au droit aérien, le *Training Captain*, qui était également instructeur de qualification de type et examinateur sur Ju 52, a considéré que le pilote A avait effectué un vol «bon à très bon» (*standard to high standard*) et n'a formulé aucune critique au sujet des erreurs commises. Le choix de la trajectoire a été jugé *«adapté»* et *«raisonnable»*. La performance du pilote B a été évaluée *«de haut niveau»* (*high standard*) et sa trajectoire décrite comme *«responsable»* et *«prévoyante»*. D'une part, ce contrôle n'a pas permis d'attirer l'attention des pilotes A et B sur leur non-respect des règles de sécurité, ce qui aurait pu avoir un effet bénéfique sur leur comportement. D'autre part, ces cas montrent de manière éloquente que lors de ces contrôles, peu de critiques étaient formulées et aucune erreur n'était signalée.

2.4.2.3 Système de gestion de la sécurité

L'analyse du système de gestion de la sécurité utilisé par Ju-Air montre que celui-ci englobait les aspects formels habituels d'une compagnie aérienne commerciale et qu'il a été, sous cette forme, approuvé par l'Office fédéral de l'aviation civile.

En revanche, de nombreux manquements ont été constatés lors de la mise en œuvre et de l'application dudit système. Il est ainsi apparu que des risques importants liés, entre autres, aux enjeux spécifiques au vol à vue ou aux dangers du vol en montagne à bord d'un avion de ligne n'avaient jamais été relevés ou analysés. Par ailleurs, l'autorité de surveillance n'a jamais exigé une telle évaluation des risques. Aucune mesure corrective n'a donc été développée et mise en œuvre de sorte que les risques indiqués ont pu produire leurs effets dans l'accident du Junkers.

Près de 150 incidents liés à la sécurité survenus lors de vols de Ju-Air ont été analysés au cours de l'enquête, puis évalués sur la base du traitement réalisé dans le cadre du système de gestion de la sécurité. Les conclusions de cette analyse révèlent, entre autres, qu'au moins neuf incidents graves entre l'année 2000 et la date de l'accident n'ont pas été signalés aux autorités compétentes en matière d'enquête de sécurité et que de nombreuses annonces n'ont pas été transmises aux autorités de surveillance. Dans un grand nombre de cas, ces événements liés à la sécurité n'ont été que partiellement analysés par la compagnie ou n'ont pu être évalués par les services officiels responsables en raison du manque de communication. En conséquence, il a été très difficile, voire impossible de tirer les enseignements nécessaires de ces incidents pour prévenir toute nouvelle occurrence. La fréquence de cas similaires n'a donc rien d'étonnant. Le manque de discipline en matière de *«reporting»* (notifier/notification) et l'insuffisance des analyses des incidents sont des causes systémiques de cet accident, car si les personnes et organismes compétents avaient traité ces incidents de façon systématique, cela aurait contribué à une amélioration de la sécurité.

Outre les incidents présentant un risque élevé, l'enquête a mis en évidence de nombreuses infractions aux bases légales de la navigation aérienne, que les

équipages ont souvent commises malgré leur expérience et leur niveau de qualification élevé. De fréquentes violations de l'espace aérien entourant des aérodromes militaires, que sont censés connaître les pilotes des Forces aériennes, ont ainsi été enregistrées. Ces erreurs indiquent une connaissance insuffisante des règles en vigueur ou une collaboration défaillante de la part des équipages (*Crew Resource Management* – CRM). En admettant que ce fait n'ait pas contribué fondamentalement à l'accident du HB-HOT, il reste un facteur de risque (*factor to risk*) qui doit être corrigé.

Le système de contrôle et d'audit interne de Ju-Air, qui existait dans les manuels de l'opérateur et qui a donné lieu à de nombreux efforts formels, n'a pas pu identifier les différentes failles au sein Ju-Air, étant donné qu'il n'était pas appliqué de manière appropriée. Il s'agissait notamment des contrôles internes inadéquats de la conformité des activités commerciales avec les normes légales visant à atteindre le niveau de sécurité requis pour les opérations de transport aérien commercial et avec les processus auto définis (*Compliance Monitoring*), des calculs de performance de vol manquants et des diverses erreurs dans le logiciel de calcul de la masse et du centre de gravité.

Somme toute, il semble qu'une grande partie des procédures prescrites par l'entreprise de transport aérien et, notamment, son système de gestion de la sécurité, aient été élaborés pour des motifs essentiellement formels, c'est-à-dire dans le but de s'acquitter d'une obligation légale. Aucune application systématique permettant de garantir la sécurité en vol n'a toutefois pu être attestée. Pour preuve, les postes de responsables de la sécurité (*Safety Manager*) et de la mise en œuvre conforme des règlements internes et légaux (*Compliance Monitoring Manager*) ont été confiés à des personnes certes motivées et bien intentionnées, mais sans compétences spécialisées et méthodologiques suffisantes. La compagnie ne disposait d'aucune directive légale garantissant les compétences nécessaires à ces deux fonctions, dont l'importance pour la sécurité est indiscutable au sein d'une entreprise de transport aérien. Bien que sans lien avéré avec l'accident, cette lacune constitue un facteur de risque (*factor to risk*) qui doit être traité.

Au final, le système de gestion de la sécurité et l'activité de conduite directe des responsables de la compagnie aérienne sont restés sans effet sur les risques ayant provoqué le crash, ce qui s'impose également comme un facteur systémique de cette catastrophe.

2.4.3 Organisation et réalisation de la maintenance

2.4.3.1 Moteurs

Conformément aux prescriptions du fabricant Bayerische Motorenwerke, les moteurs en étoile à neuf cylindres du type BMW 132 A3, montés sur les Junkers Ju 52/3m g4e de Ju-Air, devaient être soumis à une révision générale toutes les 200 à 300 heures de service. Après la reprise de l'exploitation civile, la compagnie a obtenu, de l'Office fédéral de l'aviation civile, la permission d'augmenter progressivement l'intervalle de révision à 1500 heures. La maintenance des avions utilisés et, notamment, de leurs moteurs a fait l'objet d'une analyse détaillée dans le cadre de la présente enquête. Au cours de l'exploitation, les moteurs n'ont en fait jamais pu atteindre les 1500 heures de service autorisées par l'Office fédéral de l'aviation civile en dérogation aux prescriptions du fabricant, car ils ont continuellement été envoyés en réparation dans le but de remplacer d'importants éléments. Ceci prouve que l'augmentation des intervalles de révision n'était pas justifiée.

Pendant la période considérée, à savoir de 2008 à 2018, les moteurs ont subi d'innombrables dérangements et une panne totale a même été enregistrée durant

un vol. Dans 16 cas, un moteur a dû être éteint pendant le vol ou a perdu de sa puissance. Comme pour les incidents opérationnels, il apparaît ici aussi que l'insuffisance des analyses n'a permis aucune amélioration de la sécurité.

Il s'est avéré que l'avion accidenté Ju 52/3m g4e immatriculé HB-HOT, tout au moins, ne pouvait plus atteindre les performances de vol initialement établies. Le fait que les données relatives à la performance des avions n'aient plus été contrôlées pendant plusieurs années représente donc un déficit de sécurité considérable qui doit être corrigé en vue d'une poursuite de l'exploitation de tels appareils.

2.4.3.2 Gestion des pièces de rechange

Les pièces de rechange des Junkers n'étant plus disponibles depuis déjà longtemps, la compagnie a décidé de faire fabriquer les composants nécessaires sur la base de modèles ou de remettre en état les éléments existants. Ce mandat a été attribué en partie à des entreprises non certifiées pour la fabrication de pièces d'avions. Le montage de tels éléments était donc interdit dans un aéronef navigable, ce qui signifie que leur utilisation aurait dû conduire au retrait tout au moins formel du certificat de navigabilité de l'appareil concerné.

Entre 1984 et 2001, les procédés correspondants ont été définis dans 41 bulletins de service (*Service Bulletins)* qui, en l'absence des fabricants compétents, ont été rédigés par Ju-Air. Ces documents ont ensuite été transmis à l'OFAC, qui les a validés. Aucune mise à jour n'a plus été effectuée depuis 2002, à l'exception du bulletin concernant les processus et sous-traitants. De nombreux composants nouvellement conçus n'y ayant jamais été intégrés, l'Office fédéral de l'aviation civile n'a pas été en mesure d'initier le processus de contrôle et d'approbation nécessaire.

Les nombreuses lacunes relevées dans les procédures et procédés indiquent finalement que l'état des Junkers Ju 52/3m g4e de Ju-Air n'était plus réglementaire.

2.4.3.3 Assurance de la qualité

L'état général des avions et des moteurs révèle de nombreux défauts de maintenance et met en évidence l'inadéquation des processus, le manque de compétences et l'insuffisance de l'orientation qualité des responsables.

Par ailleurs, les relations unissant les différents organismes et les quelques personnes qui y assumaient généralement plusieurs fonctions dans le cadre d'un cumul de mandats auront certainement fait obstacle à un contrôle indépendant et critique des pratiques internes.

Les dossiers de maintenance contenaient de nombreux documents incomplets ou remplis sans soin particulier, qui compliquent la traçabilité des travaux, des modifications et des réparations.

Ces manquements et lacunes dans l'organisation de la maintenance n'ont pas contribué de manière avérée à l'accident considéré, mais constituent néanmoins des facteurs de risque (*factors to risk*) qui doivent être corrigés.

2.4.4 Activité de surveillance

2.4.4.1 Homologation technique

Comme le fabricant et le détenteur du certificat de type n'existaient plus depuis la mise en service du type d'avion Ju 52/3m g4e par l'entreprise de transport aérien, aucun support n'était disponible pour le maintien du certificat de navigabilité.

L'Office fédéral de l'aviation civile avait alors affecté les appareils de Ju-Air à la catégorie standard. Il n'était toutefois plus en mesure de motiver cette décision initiale. Le fait est que, conformément à l'ordonnance sur la navigabilité des aéronefs (ONAE) tout au moins, le type Ju 52/3m g4e aurait dû relever de la catégorie spéciale et présentait donc une homologation inappropriée de l'autorité de surveillance.

Cette affectation datant de 1985 n'a pas été réexaminée par l'Office fédéral de l'aviation civile malgré l'évolution des réglementations nationales et supranationales intervenues dans les 33 années qui ont précédé la catastrophe. L'introduction des règles communes relatives à la sécurité des aéronefs et à leur exploitation *(Joint Aviation Requirements)* au cours des années 90 et le passage aux règlements d'exploitation européens (EASA-OPS et EU-OPS), qui concernaient également les vols commerciaux de Ju-Air, auraient pu donner lieu à une analyse critique de la situation.

En conséquence, l'Office fédéral de l'aviation civile n'a pas pu constater qu'une condition de base indispensable à l'exploitation de transports aériens commerciaux n'avait jamais été remplie.

2.4.4.2 Inspections techniques

Pendant plusieurs années, les contrôles de navigabilité effectués par l'Office fédéral de l'aviation civil sur l'avion accidenté HB-HOT n'ont mis à jour aucune défaillance particulière. Cela peut s'expliquer par le fait que ces derniers n'ont vérifié que les aspects formels et qu'il n'y a eu qu'un échange d'informations très limité entre les services spécialisés de l'OFAC, qui encadraient divers domaines de Ju-Air. En outre, les inspecteurs ne disposaient pas des connaissances nécessaires pour saisir les spécificités de ce type d'aéronef particulier. Ainsi, ils se sont appuyés sur le personnel des entreprises de maintenance en se fiant aveuglement à leur expertise et à leur professionnalisme.

Les activités de surveillance technique avaient un caractère largement formel et peu d'attention et de vérification étaient accordées aux conditions réelles. En outre, même les nombreuses et évidentes lacunes dans la documentation et la gestion des pièces détachées n'ont pas été identifiées et contestées.

Les audits de l'autorité de surveillance concernant les modalités du maintien du certificat de navigabilité et les entreprises de maintenance ont occasionnellement mis en lumière certaines lacunes et formulé des critiques en conséquence. Toutefois, elles n'ont pas été entièrement comblées par l'entreprise impliquée, d'où les nouvelles requêtes d'amélioration formulées par l'OFAC lors de l'audit consécutif. Les critiques n'avaient pas été traitées à la date de l'accident.

L'état technique non réglementaire du Ju 52/3m g4e immatriculé HB-HOT n'ayant pas influé avec certitude sur le déroulement de l'accident, le manque d'efficacité de la surveillance technique n'est pas considéré comme une cause du crash. Elle demeure toutefois un facteur de risque *(factor to risk)* qu'il convient de corriger.

2.4.4.3 Autorisation d'exploitation

Si l'on analyse l'application des exigences supranationales à la certification de la compagnie aérienne pour le trafic aérien commercial, il faut d'abord noter que le règlement européen 965/2012 s'applique à tout trafic aérien commercial, qu'il soit effectué selon les règles de vol aux instruments (IFR) ou selon les règles de vol à vue (VFR). L'OFAC avait des opinions différentes sur cette question et a toléré que Ju-Air s'écarte des hauteurs de vol minimales requises pour les opérations commerciales ainsi que d'autres exigences. D'une part, il a été estimé que les exigences du règlement européen 965/2012 n'étaient pas applicables dans ces zones

pour les opérations selon les règles de vol à vue. Certains fonctionnaires de l'OFAC, en revanche, étaient convaincus que les règles étaient applicables à tout trafic aérien commercial, y compris les opérations aériennes de Ju-Air. Toutefois, ces derniers ont estimé que la Suisse était en droit d'accorder des exceptions. Cependant, l'OFAC avait simplement accordé tacitement ces dérogations et n'avait pas documenté celles-ci en conséquence ni notifié les autorités européennes.

L'objectif de la réglementation européenne et donc du texte de l'ordonnance en question est d'assurer un niveau de sécurité élevé correspondant pour les opérations commerciales du trafic aérien. Dans le cas présent, les exceptions acceptées par l'OFAC ont eu pour conséquence que les avions de Ju-Air ont été exploités avec un niveau de sécurité sensiblement inférieur qui ne correspondait pas à celui des opérations de transport aérien commercial.

L'analyse des manuels d'exploitation (*Operation Manual* – OM) de la compagnie, établis sur les bases juridiques pertinentes, montre que ces documents ont été élaborés dans un souci de conformité maximale aux règlements de l'AESA et de l'OFAC. En termes de sécurité, cette œuvre imposante ne parvient pourtant pas à convaincre puisqu'elle n'a pas permis de saisir ni de réduire les risques déterminants des vols à vue et, notamment, ceux qui ont causé l'accident. Globalement, on peut constater que la forme de réglementation sélectionnée et la surveillance correspondante n'aient pas été adaptées à ce type d'exploitation. Elle s'est simplement traduite par une charge de travail formelle et imposante, qui est restée sans effet sur les problèmes essentiels.

En conclusion, les conditions requises pour un transport aérien commercial étaient donc inexistantes. Si les règlements supranationaux avaient été respectés, le vol considéré n'aurait pas pu être effectué comme il l'a été (décollage, altitude de vol et itinéraire). Le fait que ce vol ait tout de même eu lieu constitue une cause systémique de l'accident.

2.4.4.4 Surveillance opérationnelle

Dans le cadre de la surveillance opérationnelle, les aéronefs de Ju-Air ont fait l'objet de six inspections au sol non planifiées de l'OFAC au cours des années précédant l'accident. Lors de ces inspections, les calculs de masse et de centre de gravité devraient également être vérifiés comme procédure standard. Toutefois, il est concevable, mais seulement jusqu'à un certain point, que d'éventuelles erreurs de calcul et de programmation du logiciel de planification des vols utilisé par Ju-Air n'aient pas pu être identifiées. En revanche, il est difficile à comprendre qu'aucun des inspecteurs n'ait été en mesure de relever les erreurs manifestes comme les masses à vide (*Basic Empty Mass* – BEM) incorrectes, pourtant aisément détectables. Cependant, lors de l'inspection en vol du 13 septembre 2016, l'inspecteur de l'OFAC n'a pas remarqué les valeurs incorrectes de la masse et du bras de levier utilisées pour l'avion de base (*Basic Aircraft*). Ceci ne peut guère être le résultat de connaissances techniques insuffisantes puisque les compétences de base de tout pilote[41] incluent sa capacité à effectuer correctement ces calculs ou à les contrôler. On y reconnaît bien davantage, une méthode de travail peu rigoureuse, lors de la surveillance. Dans le cas présent, l'inefficacité de la surveillance a toutefois eu des effets particulièrement dangereux car cela n'a pas aidé à empêcher le HB-HOT d'avoir une position du centre de gravité à haut risque sur le vol de l'accident, ce qui peut être considéré comme un facteur contributif systémique.

[41] Les inspecteurs opérationnels de l'OFAC ont une solide expérience en tant que pilote de ligne.

Les inspecteurs de l'OFAC ont généralement inspecté divers contrôles en ligne annuels lors de vols sans passagers, mais ont renoncé dans une large mesure aux inspections des opérations aériennes proprement dites. Ils avaient donc un aperçu limité de l'exploitation réelle. À l'occasion d'une de ces rares inspections en vol, au cours de laquelle un inspecteur de l'Office fédéral de l'aviation civile a supervisé un vol de montagne avec des passagers, plusieurs passages ont été effectués bien en dessous de la surélévation de sécurité d'au moins 1000 ft AGL (300 m/G). En outre, aucune attention n'a été accordée aux principes essentiels pour un vol en montagne en toute sécurité. Le choix de la trajectoire de vol était clairement en contradiction avec les directives pour les vols dans les Alpes émises par l'OFAC, telles que publiées dans la Publication d'information aéronautique (*Aeronautical Information Publication* – AIP), VFR-Guide RAC 6-3 (cf. chapitre A1.17.6.2.2). L'inspecteur n'a pourtant formulé aucune critique. Cela montre, une fois de plus, que les connaissances techniques requises ou la capacité de jugement critique faisaient défaut à l'autorité de surveillance. Dans le cas contraire, elles lui auraient permis de relever les erreurs dans les opérations aériennes et d'intervenir en faveur de leur correction. Cela montre de façon exemplaire qu'il y avait soit un manque de capacité de jugement critique, soit une attitude de base critique de la part des inspecteurs envers les compétences de vol des pilotes expérimentés de Ju-Air, ce qui a conduit à des erreurs évidentes dans les opérations de vol qui n'ont pas été corrigées par l'autorité de surveillance.

L'analyse des inspections opérationnelles et des audits conduits par l'Office fédéral de l'aviation civile auprès de Ju-Air révèle la priorité accordée à la vérification de l'existence formelle des procédures prescrites par les manuels d'exploitation. En revanche, la mise en œuvre correcte de ces procédures sous l'angle de la sécurité n'a jamais été suffisamment vérifiée. L'autorité de surveillance ignorait les infractions, parfois graves, qui étaient commises par les équipages de Ju-Air bien que des annonces, qui auraient pu donner lieu à des enquêtes approfondies, étaient occasionnellement transmises à l'OFAC. On peut ajouter le fait que les principaux risques liés aux opérations aériennes n'ont pas été relevés lors de la surveillance opérationnelle et n'ont donc pas été pris en compte dans l'organisation des activités de surveillance. En outre, bien que les différentes divisions de l'autorité de surveillance aient maintenu un échange institutionnalisé entre elles, celui-ci n'a eu lieu que dans une mesure limitée entre les inspecteurs techniques. Par conséquent, l'autorité de surveillance n'a pas réussi à se représenter concrètement les opérations aériennes de Ju-Air.

Notons enfin que les audits réalisés par l'autorité de surveillance supranationale AESA auprès de l'OFAC dans les années précédant l'accident ont clairement mis en lumière certaines de ces lacunes, comme par exemple une surveillance pas assez approfondie de l'OFAC. Jusqu'à l'accident, ces constatations sont restées lettre morte puisqu'aucune mesure corrective ciblée concernant la surveillance de Ju-Air et les entreprises de maintenance n'a manifestement été prise par l'OFAC.

Le fait que l'autorité de surveillance n'ait pas été en mesure d'identifier les nombreux défauts et risques liés aux opérations aériennes ainsi que d'intervenir en faveur de leur élimination doit être considéré comme un facteur systémique de l'accident.

3 Conclusions

3.1 Constatations

3.1.1 Aspects techniques

- L'avion disposait de certificats autorisant le vol à vue (*Visual Flight Rules* – VFR).
- Il n'existait plus, depuis la mise en service chez Ju-Air du type d'avion Ju 52/3m g4e équipé de moteurs BMW 132 A3, ni fabricant ni détenteur du certificat de type. En conséquence, la navigabilité des appareils devait être garantie par l'entreprise de transport aérien et l'autorité de surveillance sans le soutien d'un fabricant.
- Dans le certificat de navigabilité, les avions Ju 52/3m g4e de Ju-Air relevaient de la catégorie standard, sous-catégorie «Normal».
- Conformément à l'ordonnance sur la navigabilité des aéronefs (ONAE) en vigueur à la date de l'accident, les avions Ju 52/3m g4e de Ju-Air auraient dû figurer dans la catégorie spéciale, sous-catégorie «Historique».
- Le classement des avions Junkers Ju 52/3m g4e de Ju-Air n'a plus été contrôlé depuis la création de l'entreprise de transport aérien, malgré l'évolution continue des directives prioritaires.
- L'entreprise de transport aérien a confié la fabrication sur modèle des pièces de rechange à des entreprises non certifiées pour le secteur aéronautique, puis elle les a montées sur les appareils du type Ju 52/3m g4e.
- Au cours des dix années précédant l'accident, les moteurs ont subi un nombre significatif de dérangements.
- Le constructeur avait initialement conçu les moteurs du HB-HOT pour une durée de fonctionnement de 200 à 300 heures jusqu'à une révision majeure.
- Entre 1985 et 2004, l'OFAC a autorisé l'entreprise de transport aérien à prolonger les intervalles entre deux révisions complètes à 1500 heures de service.
- Les moteurs du HB-HOT ont nécessité en partie d'importants travaux de réparation quelques heures seulement après une révision majeure.
- Au cours des deux années précédant l'accident, les moteurs du HB-HOT n'atteignaient plus, lors des essais au sol, les régimes maximaux spécifiés par le fabricant.
- Entre 2012 et 2018, des pales d'hélices desserrées ont entraîné à plusieurs reprises de fortes vibrations pendant le vol.
- Le HB-HOT n'atteignait plus les performances de vol initialement prévues par le manuel d'exploitation.
- Entre 1984 et 2001, 41 *Service Bulletins* validés par l'Office fédéral de l'aviation civile ont été établis pour la fabrication ou la remise en état de composants.
- Depuis 2002, la majorité des bulletins n'était plus gérée, ce qui signifie que les processus et sous-traitants n'étaient plus à jour, ni soumise à l'approbation de l'Office fédéral de l'aviation civile.
- De nombreux autres composants nouvellement fabriqués n'ont fait l'objet d'aucun *Service Bulletin*. Aucune autorisation correspondante n'a été demandée à l'Office fédéral de l'aviation civile.

- La qualité des composants fabriqués ou remis en état laissait souvent à désirer.
- Les contrôles de la navigabilité effectués par l'OFAC entre 2010 et 2018 n'ont révélé aucune défaillance particulière du HB-HOT.
- Des lacunes ont été constatées au niveau de la documentation et de la gestion des pièces de rechange.
- La gestion lacunaire des documents n'a jamais été critiquée par les inspecteurs de l'OFAC.
- Le cumul des fonctions au sein des organismes Ju-Air, en tant qu'entreprise de maintenance, CAMO et Naef Flugmotoren AG n'a pas permis d'exploiter pleinement les processus d'assurance de la qualité.
- L'OFAC a signalé à plusieurs reprises diverses lacunes concernant les entreprises de maintenance et le CAMO. Toutes ces lacunes n'ont pas été comblées.
- Certaines défaillances dans l'infrastructure, les processus de travail et la gestion des composants ont été relevées et critiqués lors des activités de surveillance de l'OFAC. Toutefois, dans la plupart de ces cas, les sociétés de maintenance n'ont pas remédié à ces déficiences.
- L'échange d'informations entre les collaborateurs de la division « Sécurité technique » de l'OFAC concernant les entreprises contrôlées a été insuffisant. La majorité des activités de supervision des inspecteurs respectifs ont eu lieu dans le cadre délimité de leur spécialité.
- Les audits et inspections n'ont jamais été préparés en tenant compte de la situation de Ju-Air. Les audits se déroulaient selon un schéma prédéfini et orienté sur les aspects formels.
- L'OFAC manquait depuis déjà longtemps de la compétence spécialisée en matière de moteurs à piston.
- D'importantes traces de corrosion ont été relevées sur des éléments structurels des ailes et du fuselage.
- Des fissures dues aux vibrations ont été observées sur un longeron de l'aile gauche.
- La protection de surface était insuffisante, voire inexistante sur le matériau sensible à la corrosion intercristalline.
- Du point de vue formel et matériel, l'avion accidenté HB-HOT n'était pas en état de navigabilité.
- Les défauts techniques relevés sur l'appareil et les lacunes de la maintenance ayant contribué à l'accident n'ont pas pu être démontrés.

3.1.2 Aspects opérationnels

- Les bases de calcul de la masse et du centre de gravité étaient erronées et le logiciel de planification des vols utilisé présentaient des défaillances.
- Lors des vols sur le type Ju 52/3m g4e, il arrivait fréquemment que les équipages avec une formation de pilotes militaires ne respectent pas les règles de sécurité applicables aux vols en montagne. Les hauteurs de vol minimales et les hauteurs limites de franchissement d'obstacles étaient ainsi fréquemment négligées.

- Les principaux risques ayant conduit à l'accident n'ont pas été analysés par l'entreprise de transport aérien. En outre, l'autorité de surveillance n'a jamais exigé aucune évaluation de ces risques ni mesure corrective correspondante.
- Les activités de gestion et de surveillance des opérations aériennes par l'entreprise de transport aérien sont restées sans effet sur les risques identifiés dans le cadre de l'enquête et les actions engagées à l'encontre des règles en vigueur.
- Les appareils Ju 52/3m g4e de Ju-Air n'ont pas été exploités en bonne et due forme, car les conditions de base requises pour le transport aérien commercial n'ont pas été prises en compte suffisamment ni par l'autorité d'homologation et de surveillance, ni par la compagnie elle-même.
- Les membres d'équipage expérimentés, qui ont souvent commis des erreurs au niveau des règles de base de la navigation aérienne (violation d'espaces aériens, manquement aux règles élémentaires), présentaient des lacunes au niveau de la formation interne et en matière de collaboration (*Crew Resource Management* – CRM).
- Les évaluations de performance des équipages ou en ligne n'ont pas été réalisés avec un esprit critique et en attirant l'attention des pilotes sur leurs erreurs.

3.1.3 Équipage

- Les deux pilotes étaient en possession des certificats requis.
- Rien n'indique qu'ils aient eu des problèmes de santé lors du vol considéré.
- Au moment de l'accident, ils avaient une longue expérience de pilote et leur formation au pilotage du Junkers était actualisée.
- Les parcours des deux pilotes sont très similaires. Leurs aptitudes au pilotage ont été jugées bonnes ou même très bonnes tout au long de leur carrière.
- Le comportement des deux pilotes indique qu'ils s'estimaient capables de garantir la sécurité du vol tout en passant outre certaines règles de l'air correspondantes et qu'ils étaient également prêts à prendre des risques élevés.

3.1.4 Accident

- L'équipage connaissait suffisamment les conditions météorologiques prévalant le jour de l'accident. Le calcul de la masse et du centre de gravité n'a pas été réalisé correctement. Le calcul de performance au décollage, en vol et à l'atterrissage n'a pas été effectué.
- L'avion est resté manœuvrable pendant toute la durée du vol et les moteurs étaient réglables et ont développé la puissance requise.
- L'équipage a opté pour une trajectoire particulièrement risquée qui, compte tenu de la hauteur de vol limitée par rapport au sol et du manque d'espace de manœuvre, n'offrait aucune alternative ou possibilité de correction en cas d'erreur, de dérangement et d'influence météorologique.
- L'équipage a adopté une vitesse de vol trop faible, et donc dangereuse, pour la trajectoire sélectionnée.

- La marge de sécurité insuffisante lors de l'entrée dans des conditions météorologiques estivales typiques de la haute montagne a induit une perte de contrôle tout au moins momentanée de l'appareil.
- Alors que l'équipage tentait de reprendre le contrôle de l'avion, celui-ci a décroché en raison d'une accélération normale trop élevée *(accelerated stall)* et s'est pratiquement écrasé à la verticale.
- Au moment de l'accident, la masse de l'appareil se situait dans les limites prescrites par le manuel de vol. Le centre de gravité se trouvait au-delà de la limite de centrage arrière.
- Lors de l'impact, le système de limitation de puissance était activé, ce qui prouve que les moteurs ne tournaient pas à plein régime.
- L'émetteur de localisation d'urgence (*Emergency Locator Beacon Aircraft* – ELBA) s'est déclenché.

3.1.5 Conditions-cadres

- Les conditions météorologiques permettaient un vol à vue au-dessus des Alpes.
- L'évolution de ces conditions a correspondu aux prévisions; les averses et orages pronostiqués sur l'itinéraire sélectionné ont même été plus faibles que prévu.
- L'évolution était aisément reconnaissable et le temps qui régnait au Tessin et dans la vallée du Rhin aurait autorisé un demi-tour ou un changement de trajectoire à tout moment.
- Les risques liés à l'altitude de densité et à la tendance orageuse étaient connus et n'ont pas influé sur le déroulement du vol.
- Plusieurs alternatives auraient pu être envisagées si les nuages et les précipitations situés au niveau de la crête des Alpes avaient empêché le survol de la zone.
- Lorsque l'appareil survola les Alpes, les précipitations se limitaient à quelques averses de faible intensité qui pouvaient être facilement contournées.
- Les turbulences sous le vent rencontrées du côté du col de Segnas n'avaient rien d'exceptionnel pour un après-midi sous l'influence d'un vent du nord croissant et renfermaient d'importants courants ascendants et descendants qui étaient dangereux pour un vol à proximité du sol.
- Les procédures prescrites et, notamment, le système de gestion de la sécurité de la compagnie revêtaient un caractère essentiellement formel et n'ont pas été appliqués de manière appropriée.
- La compagnie aérienne, les entreprises de maintenance et l'autorité de surveillance avaient engagé du personnel qui soit ne reconnaissait pas les risques, soit ne prenait pas de mesures efficaces pour les atténuer.
- Les incidents ou événements plus ou moins graves n'ont, pour la plupart, jamais été annoncés aux autorités compétentes. Aucun enseignement utile n'a donc pu en être tiré et ces cas sont restés sans conséquence.
- La réglementation et la surveillance n'étaient pas adaptées à ce type d'exploitation.

- L'activité de l'OFAC en matière de réglementation, d'autorisation et de surveillance n'a en grande partie eu aucun effet sur les risques, incidents et infractions aux règles relevés au cours de l'enquête.
- La surveillance supranationale de l'autorité de surveillance nationale a montré que l'étendue des activités de surveillance de l'OFAC ne garantissait pas suffisamment le contrôle approfondi du respect des règlements par les exploitants concernés.

3.2 Causes

Dans le but d'accomplir sa mission de prévention, tout service d'enquête de sécurité doit se prononcer sur les risques et les dangers qui ont impacté l'incident examiné et doivent être évités à l'avenir. Les termes et formules utilisés ci-après s'entendent donc exclusivement dans une perspective préventive. La désignation des causes et facteurs ayant contribué à un accident n'implique aucune attribution de faute ni détermination de la responsabilité administrative, civile ou pénale.

3.2.1 Cause directe

L'accident est dû au fait qu'après avoir perdu le contrôle de l'avion, il n'y avait pas assez d'espace pour le redresser et il est entré en collision avec le terrain.

L'enquête a déterminé les causes directes suivantes:

- Les membres de l'équipage ont pris de grands risques en volant dans une vallée encaissée à faible altitude et sans changement de trajectoire possible.
- Les membres de l'équipage ont opté pour une vitesse de vol dangereusement faible par rapport à la trajectoire de vol.

Ces deux facteurs ont eu pour effet que les turbulences, auxquelles il faut s'attendre dans de telles situations, ont non seulement conduit à un bref décrochage (*stall*) avec perte de contrôle, mais aussi à une situation sans issu.

3.2.2 Facteurs contributifs directs

L'enquête a déterminé les facteurs contributifs directs suivants:

- L'équipage était habitué à passer outre les règles de sécurité reconnues et à prendre des risques élevés.
- Le centre de gravité de l'avion se situait au-delà de la limite de centrage arrière, ce qui a favorisé la perte de contrôle.

3.2.3 Cause Systémique

L'enquête a déterminé la cause systémique suivante:

- Les conditions requises pour une exploitation commerciale de l'appareil n'étaient pas remplies compte tenu de la base juridique applicable au moment de l'accident.

3.2.4 Facteurs contributifs systémiques

L'enquête a déterminé les facteurs contributifs systémiques suivants:

- Compte tenu des moyens de travail défaillants, le calcul de la masse et du centre de gravité des Ju 52 de l'entreprise de transport aérienne pouvaient pas être réalisés correctement.
- Lors des vols sur Ju 52, les membres d'équipage de la compagnie aérienne ayant suivi une formation de pilote militaire, notamment, avaient l'habitude d'enfreindre systématiquement les règles reconnues de la navigation aérienne et de prendre des risques élevés.
- L'entreprise de transport aérien n'a pas été en mesure d'identifier et d'éliminer les défauts et risques relevés pendant les vols ainsi que les infractions aux règlements, souvent commises par ses équipages.

- Comme de nombreux incidents et plusieurs événements graves n'ont pas été signalés aux autorités et services compétents, ceux-ci n'ont pas pu introduire des mesures de renforcement de la sécurité.
- L'autorité de surveillance n'a parfois pas été en mesure d'identifier les nombreux défauts et risques liés aux opérations aériennes ainsi que d'intervenir de manière efficace en faveur de leur élimination.

3.2.5 Autres risques

L'enquête a déterminé les facteurs de risque *(factors to risk)* suivants. Bien que leur impact sur la survenance de l'accident n'ait pas pu être démontré, ceux-ci doivent néanmoins être éliminés pour améliorer la sécurité des opérations aériennes.

- L'état technique de l'avion n'était pas réglementaire.
- L'appareil n'atteignait plus les performances de vol initialement attestées.
- La maintenance des avions de l'entreprise de transport aérien n'était pas organisée de manière efficace.
- La formation des équipages aux exigences spécifiques des opérations aériennes et au CRM (Crew Resource Management) était insuffisante.
- Les équipages n'étaient pas familiers de toutes les situations critiques pouvant survenir lors d'un décrochage.
- L'autorité de surveillance n'a pas identifié et corrigé les nombreux défauts techniques.
- Les connaissances spécifiques des personnes engagées par la compagnie aérienne, les entreprises de maintenance et l'autorité de surveillance étaient partiellement insuffisantes.

4 Recommandations de sécurité, avis de sécurité et mesures prises après l'accident

4.1 Recommandations de sécurité

Selon les bases juridiques internationales[42] et nationales[43], toutes les recommandations de sécurité sont adressées à l'autorité de surveillance de l'état responsable. En Suisse, il s'agit de l'Office fédéral de l'aviation civile (OFAC) ou de l'Agence supranationale de la sécurité aérienne de l'Union européenne (AESA). L'autorité de surveillance compétente doit décider dans quelle mesure ces recommandations doivent être mises en œuvre. Cependant, toutes les organisations, entreprises et personnes sont invitées à améliorer la sécurité aérienne conformément aux objectifs poursuivis par les recommandations de sécurité.

Le SESE publie les réponses de l'office fédéral compétent ou des autorités de surveillance étrangères sur son site (www.sust.admin.ch), offrant de la sorte un aperçu quant au degré de mise en œuvre de la recommandation de sécurité correspondante.

Dans le cas présent, le Service suisse d'enquête de sécurité a établi un rapport intermédiaire publié le 20 novembre 2018. Il y formulait la recommandation de sécurité n° 548 ainsi que l'avis de sécurité n° 25. Dans le cadre du rapport final, le SESE a formulé les recommandations de sécurité n° 561 à 567 ainsi que les avis de sécurité n° 32 à 37.

4.1.1 Contrôle des dommages dus à la corrosion et des défauts des composantes du système

4.1.1.1 Déficit de sécurité

De nombreuses traces de corrosion ont été observées sur l'épave de l'avion accidenté (HB-HOT), au niveau des longerons, des charnières, des ferrures des ailes et de la dalle de la cabine. Deux des trois moteurs étaient équipés de nouvelles cames présentant des lacunes.

Compte tenu de l'année de construction identique, du type d'exploitation similaire et des heures de service, on peut s'attendre à ce que les appareils apparentés HB-HOP et HB-HOS connaissent des défauts semblables.

4.1.1.2 Recommandation de sécurité n° 548

L'Office fédéral de l'aviation civile (OFAC) devrait, en coopération avec l'entreprise de transport aérien, garantir par des mesures appropriées que les appareils apparentés HB-HOP et HB-HOS soient contrôlés quant aux dommages dus à la corrosion et aux défauts des composantes du système.

[42] Annexe 13 de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) et article 17 du règlement (UE) n° 996/2010 du Parlement européen et du Conseil du 20 octobre 2010 sur les enquêtes et la prévention des accidents et des incidents dans l'aviation civile et abrogeant la directive 94/56/CE.

[43] Article 48 de l'Ordonnance sur les enquêtes de sécurité en cas d'incident dans le domaine des transports (OEIT) du 17 décembre 2014, état le 1er février 2015 (OEIT, RS *742.161*).

4.1.2 Établissement des bases nécessaires à une surveillance efficace basée sur les risques

4.1.2.1 Déficit de sécurité

L'enquête de sécurité a montré que la mise en œuvre, par l'autorité de surveillance et l'entreprise de transport aérien, des directives légales applicables aux vols sur des aéronefs à caractère historique se limitait essentiellement à des aspects formels. De nombreux processus décrits dans les manuels ne reflétaient que partiellement les exigences opérationnelles. Les risques déterminants pour les vols à vue sur des appareils visés par l'Annexe II du règlement européen 216/2008 (correspondant désormais à l'annexe I du règlement européen 2018/1139), notamment, n'étaient pas pris en compte dans leur intégralité. Globalement, la réglementation s'avère complexe et peu adaptée aux besoins réels des opérations aériennes. Quelle que soit la forme d'organisation choisie, elle devrait être en mesure de garantir le niveau de sécurité souhaité pour les opérations de transport de passagers. Une consultation sur d'éventuelles recommandations de sécurité a montré qu'une solution doit être recherchée au niveau national. Comme le processus législatif risque d'être long, il est recommandé d'adopter une approche en deux étapes.

4.1.2.2 Recommandation de sécurité n° 561

L'Office fédéral de l'aviation civile devrait être chargé de veiller à ce que des règles qui soient adaptées aux vols avec passagers utilisant des aéronefs cités dans l'annexe I du règlement (UE) n° 2018/1139 et qui tiennent compte des risques inhérents à ce type d'exploitation.

4.1.2.3 Recommandation de sécurité n° 562

En attendant la mise en œuvre de la recommandation de sécurité n° 561, l'Office fédéral de l'aviation civile devrait garantir la saisie et la réduction efficace des risques spécifiques au transport aérien de passagers dans des aéronefs indiqués dans l'annexe I du règlement (UE) n° 2018/1139, moyennant une charge de travail adaptée à la complexité et à l'étendue des opérations aériennes.

4.1.3 Octroi d'autorisations exceptionnelles

4.1.3.1 Déficit de sécurité

L'enquête de sécurité a montré que, lors de sa mise en service civile, l'avion avait été catégorisé en fonction de bases légales qui ont évolué au fil du temps. L'affectation de l'appareil n'était donc plus actuelle à la date de l'accident. Compte tenu de l'affectation initiale de l'aéronef, diverses dispositions relatives aux autorisations exceptionnelles ont été jugées non applicables. Ces décisions n'ont fait l'objet d'aucun contrôle au terme de révisions fondamentales des textes de loi.

4.1.3.2 Recommandation de sécurité n° 563

Lors de l'octroi d'autorisations exceptionnelles pour des aéronefs concernés par l'annexe I du règlement (UE) n° 2018/1139, l'Office fédéral de l'aviation civile devrait tenir compte des risques inhérents à ce type d'exploitation et contrôler lesdites autorisations sur une base régulière.

4.1.4 Surveillance des vols d'aéronefs à caractère historique

4.1.4.1 Déficit de sécurité

L'enquête de sécurité a démontré que, lors de vols sur des avions à caractère historique, les équipages avaient fréquemment enfreint les règlements en vigueur

et pris des risques élevés. En l'absence d'une gestion, d'une surveillance et d'un contrôle efficaces, ce comportement n'a été détecté ni par l'entreprise de transport aérien ni par l'autorité de surveillance. De nombreux autres événements en matière de sécurité n'ont pas été identifiés par la compagnie et l'autorité de surveillance, ou n'ont pas été traités dans un souci d'amélioration de la sécurité.

4.1.4.2 Recommandation de sécurité n° 564

L'Office fédéral de l'aviation civile devrait, en collaboration avec les organismes qui exploitent des aéronefs à caractère historique dans le but principal de transporter des passagers, définir des mesures de gestion et de surveillance efficaces et basées sur les risques qui permettent de saisir et de corriger rapidement les problèmes spécifiques à ce type d'exploitation.

4.1.5 Amélioration des modalités de la surveillance

4.1.5.1 Déficit de sécurité

L'enquête de sécurité a démontré que les audits et inspections effectués par l'Office fédéral de l'aviation civile ne rendaient pas réellement compte de l'exploitation effective et du véritable déroulement des opérations au sein de la compagnie aérienne et des entreprises de maintenance. La surveillance était dans une large mesure formelle et inefficace, notamment en raison de l'absence d'attitude critique au sein de l'autorité et du faible échange d'informations entre les inspecteurs techniques.

4.1.5.2 Recommandation de sécurité n° 565

L'Office fédéral de l'aviation civile devrait améliorer l'organisation des audits et inspections pour garantir un meilleur échange d'informations au sein de l'autorité, une analyse critique de l'entreprise en question et une identification efficace des problèmes déterminants.

4.1.6 Amélioration des compétences de l'autorité de surveillance

4.1.6.1 Déficit de sécurité

L'enquête de sécurité a montré que, lors des audits et inspections de la compagnie de transport aérien et des entreprises de maintenance, les collaborateurs de l'Office fédéral de l'aviation civile étaient souvent dans l'incapacité de saisir les problèmes en matière de sécurité. Le manque d'expertise technique et méthodologique de ces avions historiques a joué un rôle essentiel lors de la supervision du domaine technique, d'où une certaine dépendance vis-à-vis des connaissances et compétences des collaborateurs de la compagnie et des entreprises de maintenance. Dans le domaine de la surveillance opérationnelle, l'expertise des inspecteurs était certainement présente, mais ils ont montré peu d'attitude critique envers les pilotes de l'opérateur aérien. En conséquence, la fiabilité et l'efficacité de la surveillance de ces établissements n'a pas été suffisamment efficace.

4.1.6.2 Recommandation de sécurité n° 566

L'Office fédéral de l'aviation civile devrait acquérir les compétences techniques et méthodologiques nécessaires à la surveillance de l'aviation historique ou les mettre à disposition au moyen de sources indépendantes. L'OFAC doit également veiller à ce que le contrôle soit exercé de manière efficace.

4.1.7 Détermination des données sur la performance des aéronefs entièrement remis à neuf

4.1.7.1 Déficit de sécurité

L'enquête de sécurité a démontré que certaines données relatives à la performance et à l'exploitation des avions étaient obsolètes ou absentes. À titre d'exemple, les performances en vol de croisière ne pouvaient plus être atteintes, les données sur la vitesse des manœuvres étaient inconnues et la performance après la défaillance d'un moteur était insuffisamment documentée.

4.1.7.2 Recommandation de sécurité n° 567

En amont de la mise en service régulière des aéronefs Ju 52/3m g4e entièrement remis à neuf, l'Office fédéral de l'aviation civile devrait exiger que l'entreprise de transport aérien détermine les principales données sur la performance et adapte les documents correspondants.

4.2 Avis de sécurité

Le SESE peut publier des informations générales pertinentes sous forme d'avis de sécurité si une recommandation de sécurité[44] selon le règlement (UE) n°996/2010 ne semble pas appropriée, n'est pas formellement possible ou si un impact plus important peut être prévu grâce à la forme plus libre d'un conseil de sécurité.

4.2.1 Contrôle et amélioration des processus de maintenance

4.2.1.1 Déficit de sécurité

L'enquête portant sur les travaux de maintenance a mis à jour diverses irrégularités, notamment dans la documentation, qui concernent des modifications majeures et la gestion des pièces de rechange. De telles lacunes représentent un risque.

4.2.1.2 Avis de sécurité n° 25

L'entreprise de transport aérien et les entreprises de maintenance devraient, avec le concours de l'organisme de gestion du maintien de la navigabilité (*Continuing Airworthiness Management Organisation* – CAMO), contrôler les processus actuels et les améliorer de manière à garantir la traçabilité des travaux de maintenance et une gestion univoque des pièces de rechange.

4.2.2 Formation complémentaire des équipages

4.2.2.1 Déficit de sécurité

L'enquête de sécurité a montré que les pilotes de la compagnie aérienne Ju-Air avaient tendance à commettre des violations systématiques et imprudentes (*reckless violation*) des règles reconnues de l'aviation. Il s'est également avéré que les équipages de conduite ne disposaient plus des connaissances suffisamment actualisées des principes aéronautiques élémentaires tels que la structure des espaces aériens, la préparation des vols, les calculs de masse et du centre de gravité et la connaissance des dispositions du droit aérien.

[44] Article 56 de l'Ordonnance sur les enquêtes de sécurité en cas d'incident dans le domaine des transports (OEIT) du 17 décembre 2014, état le 1er février 2015 (OEIT, RS *742.161*)

4.2.2.2 Avis de sécurité n° 32

L'entreprise de transport aérien devrait soumettre ses équipages à des formations complémentaires axées sur la discipline, le respect des règles et, notamment, la sécurité aérienne en montagne et l'application des règles de base de la navigation aérienne.

4.2.3 Amélioration de la gestion des ressources d'équipage (CRM)

4.2.3.1 Déficit de sécurité

L'enquête de sécurité a montré que les équipages très expérimentés commettaient eux aussi des erreurs élémentaires (p. ex. violation de l'espace aérien), et ce de manière relativement fréquente. Les avions étaient souvent commandés par des pilotes aguerris portant les grades de capitaine, ce qui n'empêchait pourtant pas ces erreurs. Les contrôles en ligne ont parfois été réceptionnés sans aucune critique et les erreurs manifestes n'ont pas été identifiées ou thématisées aux fins de correction. Ce comportement révèle un déficit majeur en matière de collaboration, notamment de la part de membres d'équipage expérimentés et de même grade.

4.2.3.2 Avis de sécurité n° 33

L'entreprise de transport aérien devrait optimiser la collaboration (gestion des ressources de l'équipage – CRM) entre les membres de ses équipages de manière à respecter les exigences d'exploitation spécifiques (vol à vue, vol en montagne, grande expérience, même grade, etc.).

4.2.4 Amélioration du système de gestion de l'entreprise

4.2.4.1 Déficit de sécurité

L'enquête de sécurité a montré que les équipages de l'entreprise de transport aérien exploitaient souvent de manière irresponsable les libertés que leur offraient les conditions opérationnelles. Même les équipages expérimentés ayant opéré pendant de nombreuses années auprès de grandes compagnies affichaient eux aussi ce genre de comportement téméraire et passaient outre les règles de sécurité élémentaires. Leurs employeurs précédents disposaient tous d'un système efficace de conduite et de surveillance qui signalait sans tarder tout écart par rapport à la qualité de travail exigée. La compagnie Ju-Air, en revanche, ne gérait aucun support ni outil permettant de relever les infractions aux règles de sécurité. On peut en conclure que les équipages ayant évolué pendant longtemps dans un environnement orienté sécurité pouvaient finalement se relâcher de l'ancienne discipline en l'absence de tout système efficace de conduite et de surveillance.

4.2.4.2 Avis de sécurité n° 34

L'entreprise de transport aérien devrait développer et introduire un système de conduite et de surveillance permettant de reconnaître les infractions aux règles de base de la sécurité ou aux dispositions légales, et d'en assurer le respect.

4.2.5 Amélioration du système de gestion de la sécurité

4.2.5.1 Déficit de sécurité

L'enquête de sécurité à mis en lumière de multiples problèmes de qualité dans la maintenance des appareils de Ju-Air. Un grand nombre d'événements déterminants en matière de sécurité n'ont pas été signalés ou traités en bonne et due forme. Cette insuffisance a entravé ou tout au moins considérablement limité

l'effet didactique des incidents survenus. L'entreprise de transport aérien disposait certes d'un système de gestion de la sécurité mais celui-ci est resté, pour l'essentiel, sans effet.

4.2.5.2 Avis de sécurité n° 35

L'entreprise de transport aérien devrait améliorer ses processus internes, notamment dans les domaines de l'assurance qualité et de la gestion des risques, pour permettre une détection précoce des problèmes de sécurité et une intervention ciblée.

4.2.6 Réalisation d'analyses des événements et des risques

4.2.6.1 Déficit de sécurité

L'enquête de sécurité a démontré que l'entreprise de transport aérien n'avait jamais analysé les principaux risques inhérents aux opérations aériennes. En conséquence, le moindre dérangement pouvait se traduire par un accident. L'événement considéré est typique de la combinaison malheureuse entre une procédure souvent risquée et des conditions-cadres habituelles.

4.2.6.2 Avis de sécurité n° 36

L'entreprise de transport aérien devrait effectuer les analyses d'événements et de risques jusqu'ici négligées, et garantir une planification et une sélection judicieuses de la trajectoire permettant de terminer une mission en toute sécurité lors d'une défaillance de moteur et d'un vol en montagne.

4.2.7 Amélioration de l'entraînement aux conditions de vol critiques

4.2.7.1 Déficit de sécurité

L'enquête de sécurité a démontré que les équipages de l'entreprise de transport aérien ne disposaient pas des connaissances suffisantes sur le comportement du Ju 52/3m g4e avec passagers lors de conditions de vol critiques.

4.2.7.2 Avis de sécurité n° 37

L'entreprise de transport aérien devrait documenter les conditions de vol critiques dans des situations d'exploitation réalistes. Les équipages devraient être familiarisés au mieux avec ce genre de situations.

4.3 Mesures prises après l'accident

Le 16 août 2018, l'Office fédéral de l'aviation civile a décrété que l'entreprise de transport aérien devait équiper ses aéronefs d'un enregistreur permettant de surveiller et d'évaluer les vols. Il a ordonné, hormis au décollage et à l'atterrissage, des hauteurs de vols minimales de 1000 pieds au-dessus des zones inhabitées et de 2000 pieds au-dessus des zones habitées. L'OFAC a indiqué que les passagers devaient rester assis à leur siège et attachés pendant toute la durée du vol. Ju-Air était en outre tenue d'organiser un cours de remise à niveau pour l'équipage et le personnel de cabine sur les procédures d'exploitation standard et la gestion des ressources d'équipage (CRM).

Le 16 novembre 2018, l'OFAC a retiré les certificats de navigabilité des avions apparentés HB-HOP et HB-HOS.

En septembre 2019, le Service suisse d'enquête de sécurité a communiqué les conclusions disponibles à cette date ainsi que les déficits de sécurité relevés aux principaux responsables de la compagnie aérienne, des entreprises de maintenance et de l'Office fédéral de l'aviation civile. Il entendait ainsi mettre le plus rapidement possible toutes les informations nécessaires à disposition des organismes concernés pour que ces derniers puissent introduire des mesures efficaces de renforcement de la sécurité avant même la publication du rapport final. À ce jour, aucune autre mesure ne permet d'envisager une réduction des déficits de sécurité décrits.

Dans la prise de position du 29 juillet 2020, l'OFAC a fait état des mesures suivantes qui ont été prises pour améliorer la sécurité des vols, qui sont énumérées ci-dessous par le SESE sans commentaire :

Au cours du premier trimestre de 2019, trois audits ont été menés chez Ju-Air Partie 145, ce qui a entraîné la suspension du certificat de la Partie 145. Une inspection a ensuite révélé que Ju-Air continuait à effectuer des travaux d'entretien malgré le retrait du certificat Partie 145. Cela a conduit à une amende qui a été prononcée le 15.10.19.

Du 3 au 5 avril 2019, la société Naef Flugmotoren AG a fait l'objet d'un audit périodique qui s'est soldé par le retrait de l'homologation « moteur » de la Partie 145 (classe B2) et des privilèges de sous-traitance (subcontracting) à partir du 11 avril 2019. En préparation de cet audit, les dossiers ont été consultés auprès du SESE les 13 et 14 mars 2019.

Le 15 mai 2019, Ju-Air a rendu le certificat CAMO Partie M/G de son plein gré.

Le 11 juin 2019, la nouvelle compagnie Junkers Flugzeugwerke cherche à obtenir l'homologation Partie 145 pour les avions Ju-52. Ce processus n'est pas encore terminé.

Le 7 mai 2020, Naef a volontairement rendu le certificat de la Partie 145.

Le 24 juin 2020, Ju-Air a volontairement rendu le certificat de la Partie 145 suspendue.

Diverses activités ont été initiées en interne à l'OFAC.

Les 25 et 26 mars 2019, un atelier de deux jours a permis de tirer les leçons (lesson's learned) du rapport préliminaire du SESE dans les sections STOB et STOZ et de définir d'autres mesures.

Une formation de mise à jour sur les techniques et les tactiques d'audit avec des ateliers pratiques et des leçons tirées (lesson's learned) a suivi dans les sections STOZ & STOB les 23 et 24 septembre 2019.

En outre, un projet a été mis en place à l'OFAC qui tient compte du fait du vieillissement des avions. Une évaluation des risques a été réalisée à cet égard, qui devra également être intégrée dans la modification de la loi prévue.

L'OFAC a complété et affiné ses processus d'évaluation des risques des opérations aériennes. Cette mesure vise à garantir une meilleure planification de la surveillance ainsi qu'une saisie des risques particuliers qui ne sont pas suffisamment pris en compte par la réglementation. Cette évaluation des risques plus approfondie est appliquée depuis 2019.

Les opérations aériennes ayant été suspendues depuis un certain temps [...], il n'y a actuellement aucun besoin immédiat d'une nouvelle action opérationnelle concernant Ju-Air".

Hormis l'OFAC, aucune partie prenante n'a fait état de mesures prises depuis l'accident.

Ce rapport final a été approuvé par la commission du Service suisse d'enquête de sécurité SESE (art. 10, lit. h de l'ordonnance sur les enquêtes de sécurité en cas d'incident dans le domaine des transports du 17 décembre 2014).

Berne, le 22 décembre 2020 Service suisse d'enquête de sécurité