



Accident de l'avion CIRRUS - SR22 immatriculé N918SE survenu le 28 septembre 2020 à La Chevillotte (25)

⁽¹⁾Sauf précision contraire, les heures figurant dans ce rapport sont exprimées en heure locale.

Heure	Vers 10 h 20 ⁽¹⁾
Exploitant	Société Civile de Moyens M.C.S.
Nature du vol	Navigation
Personnes à bord	Pilote et deux passagers
Conséquences et dommages	Pilote et passagers décédés, avion détruit

Approche non stabilisée, perte de contrôle lors de l'approche interrompue, collision avec le sol puis incendie

1 - DÉROULEMENT DU VOL	2
2 - RENSEIGNEMENTS SUR L'AVION	4
2.1 Caractéristiques principales	4
2.2 Conduite de l'approche LPV sous PA	4
2.3 Examens du site et de l'épave	5
3 - RENSEIGNEMENTS SUR L'EXPLOITATION	6
3.1 Conditions météorologiques	6
3.2 Aérodrome de Besançon-La Vèze	7
3.3 Licences et qualifications	8
3.4 Hypoxie et symptômes post-hypoxiques	10
3.5 Enregistrements radiophoniques et radar	15
4 - CONCLUSIONS	16
5 - RECOMMANDATIONS DE SÉCURITÉ	17

1 - DÉROULEMENT DU VOL

Note : Les informations suivantes sont principalement issues des témoignages, des radiocommunications et des données radar.

Le pilote, accompagné de deux passagers, décolle en régime de vol aux instruments (IFR) de l'aérodrome de Caen Carpiquet (14) vers 8 h 10 à destination de l'aérodrome de Besançon-La Vèze (25). Le passager en place avant droite est un ami du pilote. La passagère en place arrière est attendue à Besançon pour un rendez-vous professionnel. La trajectoire issue des données radar laisse supposer que la majorité du vol est réalisée avec le pilote automatique (PA) engagé. Vers 8 h 30, le contrôleur accepte la demande du pilote de monter, pour « *plus de confort* », du FL 110 (niveau de vol déposé au plan de vol) vers le FL 130 puis le FL 150.

Vers 9 h 30, le pilote indique au contrôleur qu'il souhaite réaliser l'approche Performance de navigation requise (RNP) à l'arrivée avec un passage par le repère d'approche initiale (IAF) QM403 (voir [§3.2](#)). Le pilote précise que c'est pour arriver « *tranquillement* ». À l'approche du VOR de Dijon DJL vers 9 h 45, le pilote est autorisé à débuter la descente vers le point LISMO situé à environ 25 NM au sud-ouest de l'aérodrome de Besançon-La Vèze, pour éviter des zones militaires actives.

Vers 9 h 50, le contrôleur répond au pilote, à sa demande, que la piste 23 est en service sur l'aérodrome de destination, que la visibilité est de 4 000 m et le plafond de 400 ft.

Vers 10 h, à 9 NM de LISMO, le contrôleur demande au pilote de virer à gauche direct QM403, de descendre au FL 080 et de contourner une zone sur la trajectoire. Ce dernier lui répond qu'il ne la connaît pas et qu'il est au-dessus de la couche. Le contrôleur lui demande de faire route dans un premier temps vers l'IAF QM402.

À 12 NM de QM403 (voir [Figure 1](#), point ①), le contrôleur demande au pilote de faire route vers QM403 « *avec la descente à convenance* ». La vitesse verticale de descente est de 500 ft/min, la vitesse sol est de l'ordre de 180 kt. L'avion passe le travers de QM403 à 6 500 ft (voir [Figure 1](#), point ②).

À environ 2 NM de QM402 (voir [Figure 1](#), point ③), la descente s'accentue avec une vitesse verticale de l'ordre de 1 250 ft/min, la vitesse sol diminue vers 130 kt. L'avion passe QM402 à 4 300 ft. Quelques secondes plus tard, la vitesse verticale de descente diminue à 500 ft/min (voir [Figure 1](#), point ④). Le pilote contacte alors l'agent AFIS de l'aérodrome pour donner sa position. Une trentaine de secondes plus tard, l'agent AFIS indique au pilote qu'il a allumé le balisage lumineux au maximum (indicateur de pente d'approche (PAPI) et piste). Le pilote lui répond qu'il « *finira sur la LVP*^② ».

À 10 h 16 min 03, à 0,6 NM de QM406 (correspondant au point de descente finale), l'avion débute le palier à 3 500 ft (voir [Figure 1](#), point ⑤). Quinze secondes plus tard, l'avion passe QM406. La descente finale est débutée trente secondes plus tard, avec une vitesse verticale de descente de 1 400 ft/min. L'avion est alors environ 1 NM après QM406 (voir [Figure 1](#), point ⑥). La vitesse sol diminue vers 95 kt. À 5,5 NM du seuil de la piste 23 (voir [Figure 1](#), point ⑦), l'avion débute un palier à environ 2 800 ft, il est alors sous le plan de descente. Le pilote informe l'agent AFIS du passage de QM406 et lui demande le plafond^③. L'agent AFIS lui indique « *aux alentours des 500 ft* ».

^② Le pilote fait probablement référence à la procédure RNP Z RWY23(LPV only) – voir [§3.2](#).

^③ Dernier message émis par le pilote.

Vers 10 h 17 min 25, à 5 NM du seuil de la piste, l'avion intercepte le plan de descente (voir Figure 1, point 8). L'avion reprend la descente avec une vitesse verticale de l'ordre de 2 000 ft/min.

À 10 h 17 min 42, à 2 100 ft (hauteur de 800 ft), l'avion est à 4,5 NM du seuil de la piste, sous le plan de descente. Une montée avec une vitesse verticale de l'ordre de 2 000 ft/min débute (voir Figure 1, point 9), l'altitude augmente de 800 ft. S'en suit une descente pendant laquelle l'altitude diminue de 700 ft. À 10 h 18 min 15, l'avion remonte et l'altitude augmente de 1 100 ft. Les témoins indiquent avoir entendu l'avion remettre les gaz avec un bruit de moteur de plus en plus fort.

À 10 h 18 min 35, à une altitude de 3 330 ft (hauteur d'environ 2 000 ft) et à 3 NM du seuil de la piste (voir Figure 1, point 10), l'altitude de l'avion diminue brusquement. Les témoins voient l'avion sortir de la couche nuageuse, en vrille, puis disparaître derrière les arbres cinq secondes plus tard. Ils ont vu l'extracteur du parachute sorti, mais le parachute n'a pas eu le temps de s'ouvrir.

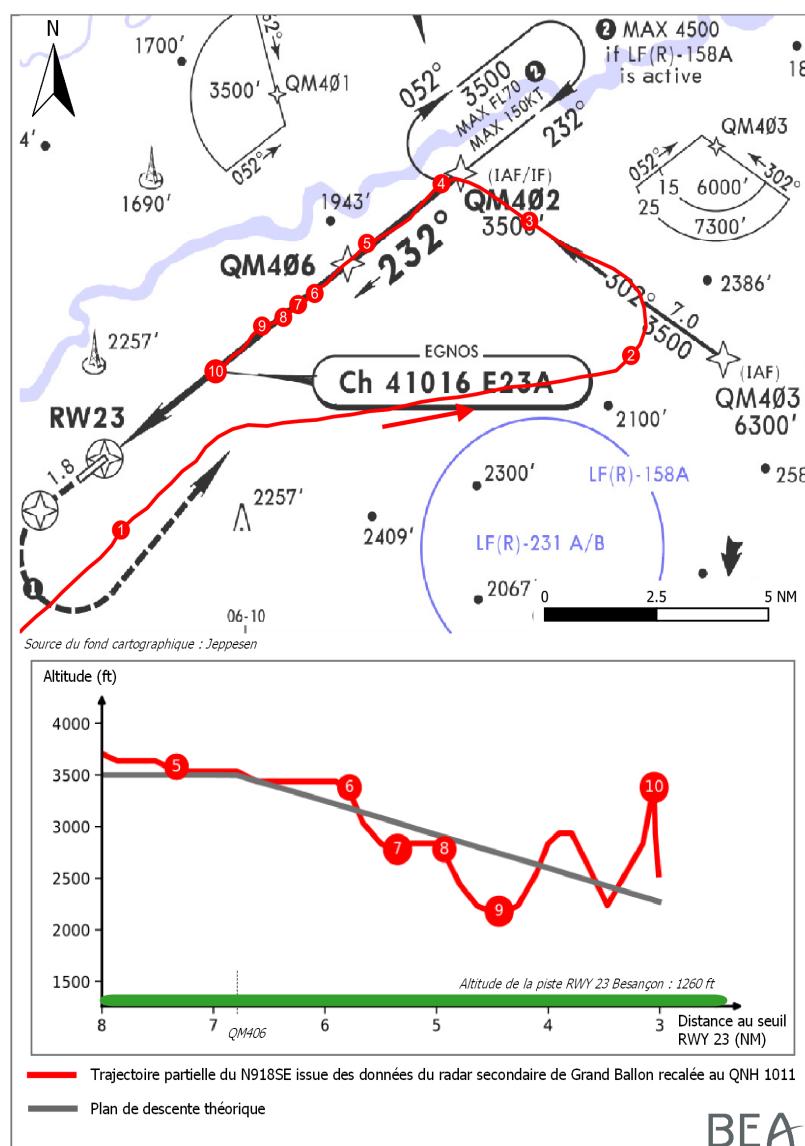


Figure 1 : Trajectoire finale du N918SE

2 - RENSEIGNEMENTS SUR L'AVION

2.1 Caractéristiques principales

L'avion appartenait à des associés d'une société créée pour l'exploitation de cet avion. Les associés propriétaires de l'avion regroupaient quelques pilotes, utilisateurs de l'avion et amis, ainsi que l'entreprise qui employait la passagère en place arrière et dont le père était le gérant. Le pilote était l'un des associés. Il réalisait régulièrement des vols avec la passagère ou son père dans le cadre de rendez-vous professionnels. Il n'était pas rémunéré.

Le Cirrus SR22 de génération 2 (G2) N918SE était notamment équipé :

⁽⁴⁾ Cirrus Airframe Parachute System.

- d'un moteur Continental IO-550 N délivrant 310 ch ;
- d'un système de parachute d'avion CAPS⁽⁴⁾. Les hauteurs démontrées pour l'utilisation de ce système sont :
 - 400 ft en vol rectiligne stabilisé ;
 - 920 ft en vrille.
- d'un système de distribution d'oxygène Precise Flight. L'atelier de maintenance qui entretenait cet avion a indiqué que le système de distribution d'oxygène n'était pas fonctionnel. Ce système n'était pas maintenu, à la demande des propriétaires selon leurs priviléges relatifs au régime FAA, et il était placardé par une étiquette « INOP ». La bouteille d'oxygène était vide.

L'avion était équipé d'un écran de vol primaire (PFD) et d'un afficheur multifonction (MFD), d'un PA et de deux calculateurs GNSS dont l'un disposait depuis novembre 2019 de la fonctionnalité pour la conduite des approches RNP avec guidage vertical LPV (voir §[2.2](#) et [3.2](#)).

Les principales vitesses d'approche et de décrochage de l'avion sont :

- vitesse d'approche, volets rentrés, vitesse indiquée (IAS) = 90-95 kt ;
- vitesse d'approche, volets 50 % (recommandé par le constructeur Cirrus), IAS = 85-90 kt (VFE volets 50 % = 119 kt) ;
- vitesse d'approche, volets 100 %, IAS = 80-85 kt ;
- vitesse de décrochage en lisse = 70 kt ;
- vitesse de décrochage volets 50 % = 67 kt.

2.2 Conduite de l'approche LPV sous PA

Ce type d'approche peut être conduit en manuel ou en pilotage automatique. Le directeur de vol (FD), lorsqu'il est engagé, présente une image du profil de vol correspondant aux modes sélectionnés et engagés.



Source : Meggitt

Figure 2 : Sélecteur et écran du PA

⁽⁵⁾ Vertical Deviation Indicator.

⁽⁶⁾ Horizontal Deviation Indicator.

Avec le PA engagé, la réalisation d'une approche LPV nécessite que :

- la source de navigation **Nav** soit définie sur **GPS** et que le navigateur (calculateur GNSS) ait l'approche chargée et activée ;
- le PA reste en mode **GPSS** jusqu'à l'interception du segment final d'approche ;
- lorsque le VDI⁽⁵⁾ est affiché et que l'indicateur HDI⁽⁶⁾ est « **GPS APPR** », le mode **APR** soit activé sur le sélecteur du PA. Si le mode **ALT** est sélectionné et que l'avion est à moins de 50 % de déviation sur le HDI, le mode **GS** et la capacité de capture du plan de descente seront armés.

À l'approche du plan de descente, le mode **GS** devient actif pour suivre la trajectoire de descente générée par le système GNSS. Ce comportement est similaire à la fonction GS d'une approche ILS. Le PA suit alors le guidage horizontal et vertical fourni par le calculateur GNSS de la même manière qu'il suivrait un ILS.

Lorsque l'approche est conduite sous PA, le pilote doit surveiller que la trajectoire suivie est bien celle attendue. Dans tous les cas, le pilote doit également surveiller que l'intégrité du signal GNSS est conservée.



Figure 3 : PFD lors d'une approche LPV (source : Avidyne)

2.3 Examens du site et de l'épave

L'épave est localisée dans un bosquet d'arbres à environ 3 NM au nord-est du seuil de la piste 23 de l'aérodrome de Besançon-La Vèze, dans l'axe de piste. L'avion a entièrement brûlé lors de l'incendie post-impact. Il est entier, et orienté au cap 300°. L'accident n'a laissé aucune chance de survie aux occupants.

Des restes de parachute sont visibles dans la végétation autour de l'épave. La fusée d'éjection du parachute est localisée à environ 80 m de l'épave. La trappe du logement du parachute est retrouvée dans la forêt entre la fusée et l'épave principale, à environ 60 m de l'épave.

Sur l'épave, la continuité des commandes des trois axes a pu être entièrement vérifiée. Les câbles étaient encore tous connectés aux différents éléments (gouvernes ou bielles de commande), sauf dans l'empennage de l'avion où les attaches avaient fondu. Aucune rupture statique n'a été constatée. La continuité des commandes des volets ainsi que leur position n'ont pas pu être déterminées du fait des dommages sur l'avion.

Sur le moteur, aucune rupture du carter n'a été constatée. La fin de la trajectoire suivie par l'avion était cohérente avec un moteur qui délivrait de la puissance avant la collision avec le sol.

L'émetteur de localisation d'urgence (ELT) de l'avion s'est activé lors de la collision avec le sol. Les opérations de recherche et de sauvetage (SAR) ont été déclenchées par le Centre de coordination de sauvetage aéronautique (ARCC Lyon). L'ELT de l'avion ayant été installé aux États-Unis et les propriétaires n'ayant pas enregistré cet équipement sur le registre américain des balises de détresse, aucune information complémentaire (notamment nom du propriétaire et contacts d'urgence) n'était disponible pour les équipes en charge des opérations SAR. Ces opérations ont tout de même été facilitées par les informations fournies par des témoins situés à proximité du site de l'accident.

3 - RENSEIGNEMENTS SUR L'EXPLOITATION

3.1 Conditions météorologiques

3.1.1 En vol

Pendant le vol et sur la trajectoire, le ciel est couvert de couches nuageuses (ciel morcelé (BKN) à couvert (OVC)) dont la base est comprise entre 1 000 et 4 000 ft et le sommet entre 12 000 ft et plus de 15 000 ft. L'isotherme 0 °C se situe vers le FL 100, avec localement du givrage modéré au-dessus de cette altitude.

Aux alentours de l'aérodrome de Besançon-La Vèze, de la pluie et de la bruine, avec une visibilité réduite entre 1 500 et 8 000 m, ainsi que de la brume et du brouillard peuvent être présents localement. Selon les images satellites de Météo-France, le sommet de la couche nuageuse aux abords de l'aérodrome diminue jusqu'à 5 000 ft.

L'aérodrome de Besançon-La Vèze ne dispose pas d'installations fournissant des METAR et des TAF. Le TAF de 7 h de l'aérodrome de Dole Tavaux (altitude 645 ft), aérodrome de dégagement indiqué dans le plan de vol déposé, situé à environ 30 NM de l'aérodrome de Besançon-La Vèze (altitude 1 270 ft) indiquait : vent du 220° pour 5 kt, visibilité supérieure à 10 km, ciel OVC à une hauteur de 1 200 ft, temporairement (TEMPO) entre 8 h et 11 h, visibilité réduite à 3 000 m avec de la pluie et de la bruine (RADZ) et un ciel OVC à une hauteur 300 ft, amélioration (BCMG) entre 11 h et 13 h, vers un ciel OVC à une hauteur de 2 000 ft.

Avant le départ, le pilote du N918SE avait indiqué à un autre pilote qu'il ne faisait pas beau aux alentours de la destination. Un pilote de la société indique que le pilote utilisait une tablette avec notamment l'application ADLConnect qui permet d'obtenir les données météorologiques en vol.

3.1.2 Sur le site de l'accident

Météo-France estime les conditions suivantes au moment de l'accident :

- Un ciel OVC à une hauteur de 650 / 1 000 ft, un ciel OVC à une hauteur de 2 000 ft, un sommet de la couche nuageuse vers 5 250 ft ;
- De la brume possible ;
- Une visibilité supérieure à 10 km, mais possiblement réduite par la brume de 2 000 à 5 000 m ;

- Un vent moyen du sud-ouest de 3 à 5 kt au sol et un vent du sud de 10 à 15 kt vers 5 000 ft ;
- Une température de 9 °C et point de rosée 8,5 °C.

L'agent AFIS estime qu'au moment de l'accident, la visibilité était de 4 000 m et le plafond aux alentours de 500 ft sur l'aérodrome.

3.2 Aérodrome de Besançon-La Vèze

L'aérodrome de Besançon-La Vèze se situe à 5,5 km au sud-est de la ville de Besançon. Un agent AFIS y rend le service d'information de vol et d'alerte. L'altitude de référence de l'aérodrome est de 1 270 ft.

L'aérodrome dispose d'une piste 05-23 revêtue de 1 400 m de long. Un PAPI est présent en piste 23, matérialisant une pente de 4°. Plusieurs procédures d'approche aux instruments sont possibles en piste 23, notamment la procédure RNP Z RWY 23 - LPV only (opération de Navigation basée sur la performance (PBN)), conduite par le pilote. Dans cette procédure, la descente finale débute à QM406, situé à 6,8 NM du seuil de la piste, avec une pente de descente de 3°. Les minima sont : hauteur de décision (DH) 420 ft et portée visuelle de piste (RVR) 1 500 m.

Trois secteurs d'aires d'altitude minimale, et donc trois IAF, sont matérialisés sur la carte d'approche RNP Z RWY 23 :

- QM401 pour les arrivées par le nord-ouest, avec une altitude minimale de 3 500 ft ;
- QM402 pour les arrivées par le nord-est, avec une altitude minimale de 3 500 et 6 300 ft en fonction du secteur d'arrivée ;
- QM403 pour les arrivées par le sud, avec une altitude minimale de 7 300 puis 6 000 ft.

Le PBN est un concept développé par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) permettant de spécifier les performances opérationnelles requises dans un espace aérien, sur une route ou sur une procédure d'approche. Deux types de spécifications de navigation y sont associés : Performance de navigation requise (RNP) et Navigation de surface (RNAV).

La procédure d'approche utilisée par le pilote sur l'aérodrome de Besançon-La Vèze était une procédure RNP - LPV, basée uniquement sur l'utilisation du GNSS, tant pour le guidage horizontal que vertical. Le guidage GNSS est complété par un système d'augmentation SBAS⁽⁷⁾ qui permet, grâce à une constellation de satellites et de stations au sol dédiées, d'améliorer la précision du signal GNSS en vérifiant son intégrité et en corrigeant les erreurs.

Le jour de l'accident, la performance de la constellation GNSS permettait la réalisation de l'approche RNP Z RWY23 (LPV only).

⁽⁷⁾ Satellite Based Augmentation System : WAAS aux États-Unis et EGNOS en Europe.

3.3 Licences et qualifications

3.3.1 Qualification IR et formation PBN

⁽⁸⁾ Agence américaine en charge de l'Aviation civile.

⁽⁹⁾ Pour voler en IFR.

⁽¹⁰⁾ Special Federal Aviation Regulation.

⁽¹¹⁾ Agence européenne de la sécurité aérienne.

⁽¹²⁾ [Règlement de la Commission du 3 novembre 2011 déterminant les exigences techniques et les procédures administratives applicables au personnel navigant de l'aviation civile.](#)

Pour obtenir la qualification FAA⁽⁸⁾ de vol aux instruments IR⁽⁹⁾, les pilotes doivent avoir suivi une formation complétée par un examen en vol. Afin de pouvoir exercer le privilège de sa qualification IR, le pilote doit pouvoir justifier d'une expérience récente, notamment d'un minimum de six approches en conditions météorologiques de vol aux instruments (IMC) réelles (présence de nuages sur le segment d'approche finale, transition vers le vol à vue sur ce segment) ou simulées, en vol ou en simulateur, effectuées dans les six mois précédant le mois du vol. En l'absence d'expérience récente, le pilote doit subir un examen de compétence.

En raison de la pandémie de la COVID-19, la FAA a publié une réglementation temporaire (SFAR⁽¹⁰⁾) valable du 25 juin 2020 au 31 mars 2021. Ce document spécifie que les pilotes disposent d'une période de neuf mois au lieu de six pour justifier de leur expérience récente pour les vols réalisés entre juillet et septembre 2020 afin de maintenir leur qualification IR.

Pour obtenir la qualification AESA⁽¹¹⁾ de vol aux instruments IR, les pilotes doivent avoir suivi une formation complétée par un examen en vol. Pour voler selon le concept PBN, les pilotes doivent avoir suivi une formation spécifique, complétée par un examen en vol. Cette formation contient une partie théorique et une partie pratique en vol ou en simulateur avec au moins quatre approches RNP, et notamment une interruption consécutive à la simulation d'une situation dégradée. Une mention sur la licence du pilote est alors apposée, justifiant que le titulaire est bien détenteur d'une qualification IR-PBN. Pour conserver la validité de cette qualification, le pilote doit se soumettre à un examen en vol chaque année (incluant des procédures PBN). Depuis le 25 avril 2021, aucun pilote ne peut plus proroger ou renouveler sa qualification IR sans le privilège PBN. En France, la Direction de la sécurité de l'aviation civile (DSAC) a publié un [guide](#) relatif à la formation et à l'exploitation PBN. Un [document similaire](#) est également publié par la FAA.

La qualification IR FAA peut être convertie en qualification IR AESA après avoir suivi une formation théorique et pratique, complétée par un examen en vol.

À partir du 20 juin 2022, dans le cadre de la mise en œuvre de l'accord bilatéral sur la sécurité aérienne entre l'Union Européenne et les États-Unis d'Amérique (BASA UE/US), les pilotes privés détenteurs d'une licence américaine résidant en Europe devront détenir une licence européenne et ses qualifications associées conformément au règlement (UE) n°1178/2011, dit « *Aircrews* »⁽¹²⁾, y compris pour voler sur un avion immatriculé aux États-Unis. À ce titre, les pilotes doivent satisfaire à des exigences de formation théorique et pratique ainsi qu'à un examen en vol.

3.3.2 Renseignements sur le pilote

Le pilote, âgé de 73 ans, était titulaire d'une licence française puis européenne (AESA) de pilote privé PPL(A) depuis 1984, délivrée en France. Il détenait la qualification monomoteur à piston (SEP). Il détenait également une qualification IR délivrée par la FAA, obtenue en 2009 après avoir suivi une formation en France.

Selon le carnet de vol du pilote, ce dernier totalisait environ 3 600 heures de vol, dont une grande partie en régime de vol IFR. Il volait quasi-exclusivement sur le N918SE depuis quelques années. L'enquête n'a pas permis de déterminer avec exactitude le nombre d'heures de vol du pilote en régime IFR car lorsqu'il réalisait un tel vol, il n'en enregistrait qu'une fraction dans la colonne « *Temps en condition opérationnelle IFR* » de son carnet de vol. Par exemple, pour un vol en régime IFR d'une durée totale de soixante minutes, le pilote indiquait une durée de cinq minutes d'IFR quelles que soient les conditions météorologiques. Le pilote avait ainsi totalisé 365 h en régime IFR, mais il en avait probablement accumulé plus de 1 500, selon les témoignages.

Au cours des trois dernières années, le pilote ne s'était pas rendu sur l'aérodrome de Besançon-La Vèze.

Depuis novembre 2019 et selon son carnet de vol, le pilote avait réalisé sept approches RNP, réalisées dans de bonnes conditions météorologiques, et neuf approches ILS. Durant les mois qui ont suivi la période de confinement liée à la pandémie de la COVID-19 (entre mars et mai 2020), il avait réalisé sept approches (deux ILS, quatre RNP et une « visuelle ») dont trois en conditions IMC, selon les données des METAR aux heures et dates des vols indiqués. Des témoins, amis pilotes, indiquent qu'il pratiquait des approches LPV, et son carnet de vol en précise notamment une⁽¹³⁾.

Lors de sa formation IFR en 2009, le pilote n'avait pas été formé à la conduite des approches LPV. Mi-2019, peu avant l'évolution de l'avionique du N918SE (voir §2.1), le pilote s'était renseigné auprès d'instructeurs et d'organismes de formation pour recevoir une formation PBN et dans le même temps obtenir la qualification IR AESA, mais n'avait pas donné suite. En 2019, il avait néanmoins suivi un cours théorique de quelques heures comprenant un volet PBN. Selon son carnet de vol, au cours des trois dernières années, il n'avait pas effectué de vols d'instruction, hormis ceux pour proroger la qualification SEP associée à son PPL ou dans le cadre des révisions bisannuelles (BFR⁽¹⁴⁾) pour maintenir sa licence FAA (vols VFR). Il avait également fait quelques heures de simulateur en instruction en 2019, lors desquelles il avait travaillé uniquement des approches non RNP. Aucune formation pratique additionnelle sur les opérations PBN ne semble avoir été reçue par le pilote. L'enquête n'a pas permis de déterminer les compétences réellement acquises par le pilote pour la conduite des approches LPV.

3.3.3 Passager en place avant

Le passager en place avant droite, âgé de 72 ans, était titulaire d'une licence PPL(A) depuis 2000, délivrée en France. Il ne détenait pas de qualification IR. Il était également titulaire d'un brevet de pilote d'ULM multiaxe. Il totalisait plus de 1 000 heures de vol, selon les témoins.

Médecin, qualifié en médecine hyperbare, il était ami avec le pilote qu'il avait l'habitude d'accompagner en vol.

⁽¹³⁾ Il avait indiqué la mention « *LVP* » pour un vol réalisé début septembre 2020.

⁽¹⁴⁾ *Bi-annual Flight Review.*

3.3.4 Témoignages

Plusieurs témoins, notamment l'un des pilotes de la société, des amis pilotes et des instructeurs ayant volé avec le pilote au cours des dernières années, ont indiqué que le pilote était à l'aise avec les automatismes et l'avionique de bord. Il avait un bon pilotage selon eux. L'un d'eux indique que le pilote n'avait pas suivi la formation PBN (régime AESA). Le pilote de la société ajoute que le pilote avait déjà rencontré des conditions météorologiques similaires. Enfin, il mentionne qu'au cours des vols qu'il avait déjà réalisés avec le pilote, il avait évoqué la procédure d'utilisation du parachute et les différents scénarios conduisant à son utilisation.

La personne avec laquelle la passagère en place arrière avait rendez-vous à Besançon indique que ce rendez-vous avait déjà été reporté, notamment en raison d'un pneu crevé sur l'avion. Néanmoins, elle précise qu'il n'y avait pas d'urgence à la tenue de ce rendez-vous et qu'il aurait pu être reporté à nouveau.

3.4 Hypoxie et symptômes post-hypoxiques

L'avion a volé environ 90 minutes au-dessus du FL 100, dont environ 60 en palier au FL 150. Le plan de vol déposé par le pilote indiquait une croisière au FL 110. Le système de distribution d'oxygène installé dans l'avion n'était pas fonctionnel (voir §2.1). Par ailleurs, un oxymètre de pouls fonctionnel était à bord de l'avion (voir §3.4.4).

3.4.1 Réglementation FAA

⁽¹⁵⁾ Code des règlements fédéraux américains.

La sous-partie C de la partie 91 du *Code of Federal Regulations*⁽¹⁵⁾ Title 14 déterminant les exigences des équipements, instruments et certificats précise dans le paragraphe 91.211 « *Supplemental oxygen* » :

- (a) *Général. Nul ne peut exploiter un aéronef civil immatriculé aux États-Unis*
 - (1) *À des altitudes-pressions de cabine comprises entre 12 500 ft et 14 000 ft inclus, à moins que l'équipage minimal de conduite requis ne dispose et utilise de l'oxygène de subsistance pour cette partie du vol à ces altitudes pour toute période supérieure à 30 minutes ;*
 - (2) *à des altitudes-pressions de cabine supérieures à 14 000 ft, à moins que l'équipage minimum de conduite requis ne dispose et utilise de l'oxygène de subsistance pendant tout le temps de vol à ces altitudes ; et*
 - (3) *À des altitudes-pressions de cabine supérieures à 15 000 ft, à moins que chaque occupant de l'aéronef n'ait à disposition de l'oxygène de subsistance. [...] (Traduction BEA)*

Par ailleurs, la sous-partie H de la partie 91 du *Code of Federal Regulations* Title 14 relative à l'exploitation d'aéronefs immatriculés aux États-Unis en dehors des États-Unis précise dans le paragraphe 91.703 :

- (a) *Toute personne exploitant un aéronef civil immatriculé aux États-Unis en dehors des États-Unis doit :*
 - [...]
 - (2) *Dans un pays étranger, respecter les réglementations relatives au vol et à la manœuvre des aéronefs en vigueur à cet endroit ; [...] (Traduction BEA)*

De ce fait, le pilote survolant la France, État membre de l'Union Européenne, se devait également de respecter les règles relatives à l'oxygène de subsistance applicables en France. Un pilote de la société indique qu'ils utilisaient uniquement les critères de la réglementation américaine lors des vols.

3.4.2 Réglementation AESA

⁽¹⁶⁾ Règlement de la Commission du 5 octobre 2012 déterminant les exigences techniques et les procédures administratives applicables aux opérations aériennes ([Version en vigueur le jour de l'accident](#)).

⁽¹⁷⁾ Non-Commercial Other than complex aircraft.

⁽¹⁸⁾ Ce paragraphe a été modifié en 2016 afin de mieux prendre en compte la performance des équipages.

Le règlement UE n°965/2012, dit « *Air Ops* »⁽¹⁶⁾, précise dans le paragraphe NCO⁽¹⁷⁾.OP.190⁽¹⁸⁾ :

« *Utilisation de l'oxygène de subsistance*

- a) *Le pilote commandant de bord s'assure que, pendant l'exécution des tâches essentielles au fonctionnement sûr d'un aéronef en vol, tous les membres de l'équipage de conduite utilisent de manière continue l'équipement d'oxygène de subsistance lorsqu'il considère qu'à l'altitude du vol prévu, le manque d'oxygène risque de porter atteinte aux facultés des membres d'équipage et il veille à ce que les passagers disposent d'oxygène de subsistance lorsque le manque d'oxygène risque d'avoir des conséquences négatives pour eux.*
- b) *Dans tous les autres cas, lorsque le pilote commandant de bord ne peut déterminer les conséquences que le manque d'oxygène risque d'avoir pour tous les occupants à bord, il s'assure que :*
 1. *pendant l'exécution des tâches essentielles au fonctionnement sûr d'un aéronef en vol, tous les membres d'équipage utilisent l'oxygène de subsistance pendant toute période supérieure à 30 minutes au cours de laquelle l'altitude-pression du compartiment passagers se situe entre 10 000 ft et 13 000 ft; et*
 2. *tous les occupants utilisent l'oxygène de subsistance pendant toute période au cours de laquelle l'altitude-pression dans le compartiment passagers est supérieure à 13 000 ft ».*

Contrairement à ce que prévoit la réglementation FAA, le paragraphe NCO.OP.190 (a) de la réglementation AESA laisse l'opportunité au pilote de déterminer par lui-même les besoins en oxygène lorsqu'il réalise des tâches essentielles, quelle que soit l'altitude de vol. Des moyens acceptables de mise en conformité (AMC) et des documents d'orientation (GM) précisent ce paragraphe.

Des moyens de détermination du besoin en oxygène de subsistance permettant de se conformer au paragraphe précédent sont décrits dans l'AMC1 NCO.OP.190 (a). Ils intègrent la prise en compte lors de la préparation du vol de facteurs favorisant le risque d'hypoxie (altitude, durée du vol, facteurs individuels tels que l'âge, l'expérience à haute altitude, santé par exemple), et lors du vol, la surveillance de conditions propices à l'hypoxie ainsi que les décisions associées (descente dans la mesure du possible ou utilisation d'oxygène de subsistance).

En outre, le paragraphe GM1 NCO.OP.190 (c) précise que le pilote commandant de bord devrait avoir conscience que les vols en dessous des altitudes mentionnées dans le NCO.OP.190 (b) n'offrent pas de protection absolue contre les symptômes de l'hypoxie, si des conditions et des aptitudes individuelles prévalent. Enfin, dans le paragraphe GM2 NCO.OP.190, il est fait référence à la [brochure de sécurité éditée par l'AESA « Prévenir l'hypoxie »](#) qui donne des informations sur l'hypoxie et l'évaluation des conditions individuelles. Il est notamment mentionné que certaines méthodes de surveillance des symptômes précoce de l'hypoxie peuvent être facilitées par un équipement personnel, tel qu'un oxymètre de pouls monté sur le doigt.

3.4.3 Hypoxie d'altitude

La diminution avec l'altitude de la pression partielle en oxygène de l'air respiré par le pilote se traduit par une diminution de la quantité d'oxygène véhiculée (hypoxémie) vers les organes. Lorsque les organes ne reçoivent pas une quantité d'oxygène suffisante à leurs besoins, ils se trouvent en situation d'hypoxie, qui altère leur fonctionnement de manière plus ou moins durable. Les manifestations d'hypoxie peuvent apparaître au-dessus du FL 050 et plus régulièrement au-dessus du FL 070.

Ces manifestations correspondent à des réactions d'adaptation de l'organisme destinées à maintenir le même niveau d'oxygénation des organes qu'au sol. Elles se traduisent par une augmentation du débit cardiaque et de la ventilation pulmonaire, le plus souvent à l'insu du pilote qui peut être ainsi soumis à une véritable épreuve d'effort. Le cerveau, particulièrement sensible à l'hypoxie, est rapidement touché. Des troubles cognitifs peuvent apparaître en vol de manière insidieuse, et sont variables d'un pilote à l'autre et même d'un jour à l'autre chez un même pilote.

⁽¹⁹⁾ <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2021.665821/full>

L'hypoxie d'altitude provoque également des effets différés lors de la « récupération ». Ces effets se produisent dès la descente à des altitudes auxquelles un pilote n'est plus soumis à des altitudes-pressions insuffisantes (FL 070, voire FL 050). Dans un article de synthèse rédigé en 2021⁽¹⁹⁾, il est mentionné que « *les troubles cognitifs peuvent persister pendant plusieurs minutes à plusieurs heures après la réoxygénation du sang artériel* » à la suite d'une exposition à des conditions hypoxiques. En d'autres termes, « *l'exécution de tâches opérationnelles ou la mise en œuvre de procédures de récupération d'urgence peuvent continuer à être compromises après une récupération apparente de l'hypoxie* ».

⁽²⁰⁾ [Accident du Schleicher ASW22 immatriculé D-6393 survenu le 12/04/2017 à Valdeblore \(06\)](#)

⁽²¹⁾ [Accident du Dyn'Aéro MCR 4S immatriculé F-WVSG survenu le 10/10/2005 à Dijon Darois \(21\)](#)

À ces troubles cognitifs, peut s'ajouter un surcroît de fatigue dû à l'effort fourni par l'organisme lors de la compensation au cours du séjour en altitude (asthénie post-hypoxique), donc réduire la vigilance et augmenter la survenue d'erreurs. Par ailleurs, l'augmentation du temps de réaction liée à cette fatigue peut être préjudiciable à la bonne coordination des actions.

Par ailleurs, l'âge diminue les capacités d'adaptation à l'hypoxie d'altitude et augmente le risque de troubles post hypoxiques.

Les accidents du planeur D-6393⁽²⁰⁾ (vol de 2 h 30 entre le FL 065 et le FL 100) et de l'avion F-WVSG⁽²¹⁾ (vol de 4 h 30 entre le FL 090 et le FL 100) sont relatifs à des scénarios qui ont pu donner lieu à de tels phénomènes d'hypoxie.

3.4.4 Utilisation d'un oxymètre de pouls (saturomètre)

⁽²²⁾ Également appelée Saturation du sang en oxygène.

L'oxymètre de pouls indique le pourcentage d'hémoglobine qui transporte de l'oxygène (SpO_2 ⁽²²⁾). Il s'agit d'une indication instantanée. L'utilisation d'un oxymètre de pouls pour prévenir l'hypoxie fait appel à des connaissances avancées de la physiologie respiratoire. Un tel dispositif n'a pas fait l'objet d'évaluation scientifique pour encadrer son utilisation en aviation.

La [brochure « Prévenir l'hypoxie » éditée par l'AESA](#) précise en particulier qu'un pilote peut utiliser un oxymètre pour surveiller l'évolution de sa SpO_2 et détecter ainsi les premiers symptômes de l'hypoxie. Il est précisé qu'un pourcentage en dessous de 90 % doit être considéré comme un signe de gravité car c'est généralement en deçà de ces valeurs que les pilotes subissent le phénomène d'hypoxie.

⁽²³⁾ [FAA-PHAK, 2016, chapitre 7](#) page 39.

Le manuel de Connaissances aéronautiques du pilote élaboré par la FAA indique que « *En raison de leur portabilité et de leur rapidité, les oxymètres de pouls sont très utiles pour les pilotes opérant dans des avions non pressurisés au-dessus de 12 500 ft, où un supplément d'oxygène est nécessaire. Un oxymètre de pouls permet aux membres d'équipage et aux passagers d'un avion d'évaluer leur besoin réel d'oxygène supplémentaire* ». (Traduction BEA)⁽²³⁾.

La partie 9 du manuel de vol de l'avion Cirrus N918SE, dédiée au système de distribution d'oxygène, précise que l'oxymètre de pouls NONIN de FlightStat est disponible en option. Son fonctionnement est décrit dans le manuel de vol. Le constructeur du système de distribution d'oxygène recommande des vérifications périodiques au cours du vol, pour les vols en altitude, afin d'ajuster les apports en oxygène si une personne ressent les effets de l'hypoxie ou si la SpO2 diminue. Cet oxymètre de pouls n'est accompagné d'aucun guide d'interprétation des valeurs mesurées et ne fait pas l'objet de maintenance spécifique.

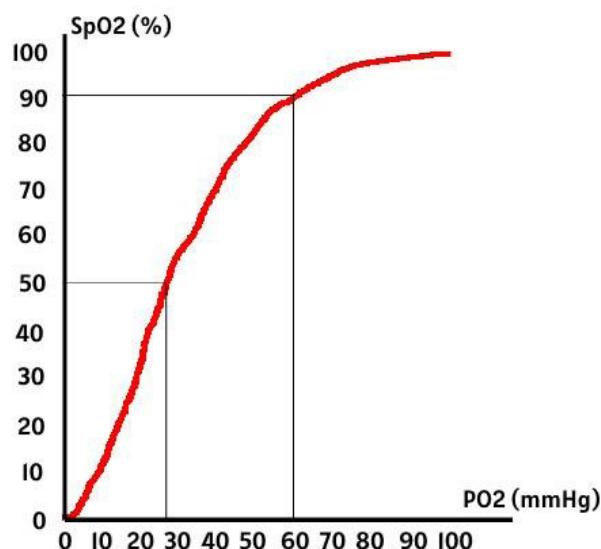
Un pilote de la société indique que les pilotes du N918SE avaient l'habitude de voler aux environs du FL 100. Ils volaient parfois ponctuellement un peu plus haut pour éviter par exemple des cellules orageuses. Il explique qu'ils utilisaient régulièrement l'oxymètre de pouls fourni. Il indique qu'à partir du FL 100, ils mesuraient la valeur toutes les dix minutes, et que la valeur habituellement lue était de 95 %. Il indique que pour lui, la valeur à surveiller était de 90 %, mais qu'il ne l'a jamais atteinte.

L'utilisation d'un oxymètre de pouls peut également permettre de détecter un dysfonctionnement dans le système de distribution d'oxygène de subsistance. L'AAIB⁽²⁴⁾ l'a mis en évidence dans un rapport d'enquête⁽²⁵⁾. Dans son analyse, l'AAIB précise que « [...] *La vigilance, l'utilisation d'un oxymètre de pouls et la prise des mesures rapides en cas de suspicion d'hypoxie peuvent assurer la sécurité de l'équipage et des passagers. Cependant, il faut aussi noter que l'hyperventilation - l'un des symptômes de l'hypoxie - peut faire que l'oxymètre de pouls n'indique pas au doigt ce qu'il est censé mesurer* ». (Traduction BEA) ».

3.4.5 Limite d'emploi d'un oxymètre de pouls

La relation entre la SpO2 et la pression partielle en oxygène du sang (PO2) interne aux alvéoles pulmonaires, en d'autres termes l'oxygénéation du sang, suit une courbe sigmoïde dont la plage critique est caractérisée par une faible diminution de la SpO2, entre 100 et 90 %, pour une forte diminution de la PO2, entre 100 et 60 mmHg.

⁽²⁶⁾ La courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine conserve sa forme sigmoïde quel que soit le pH du sang. Elle est néanmoins décalée vers la droite lorsque le pH diminue et vers la gauche quand il augmente.



Source : Université Médicale Virtuelle Francophone

Figure 4 : Courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine - pH 7,4⁽²⁶⁾ / PCO₂ 40 mmHg / T° 37°C

L'oxymètre fournit donc une information imprécise sur le point à partir duquel l'organisme entre en hypoxie (PO₂ en dessous de 80 mmHg, SpO₂ de 93-95 %). Sous ce seuil, les conditions d'oxygénéation de l'organisme ont amorcé leur dégradation en raison notamment de l'insuffisance, voire de l'épuisement, des mécanismes de compensation.

Ces données sont absentes de toutes les documentations consultées (manuel de vol, manuel d'utilisation de l'oxymètre, brochure de l'AESA et manuel de la FAA). Les affirmations sur l'utilité de ce dispositif ne sont étayées par aucune référence.

NONIN précise dans sa documentation que l'erreur de mesure est d'une déviation standard (la précision de la mesure de la SpO₂ avoisine en général 2 %). Il indique que la mesure doit être considérée comme approximative et qu'à haute altitude, l'interprétation de la mesure doit être effectuée en coordination avec un expert médical. L'indication fournie par l'oxymètre de pouls dépend également de la température du corps, ainsi que de la tonicité des vaisseaux sanguins (vasoconstriction).

À la précision de l'oxymètre près, la valeur de 90 % proposée par l'AESA (« genou » de la courbe sigmoïde) peut correspondre soit à une situation d'oxygénéation quasi-normale (93 % - PO₂ de l'ordre de 75 mmHg), soit à une situation dégradée (87 % - PO₂ de l'ordre de 55 mmHg). L'AESA précise que la valeur de 90 % doit être augmentée de l'erreur de mesure de la SpO₂ par l'oxymètre. Néanmoins cette information est rarement portée à la connaissance des pilotes.

Note : au FL 150, sans utilisation d'oxygène de subsistance, la valeur de SpO₂ est de l'ordre de 80-85 % soit une PO₂ de l'ordre de 50 mmHg.

3.5 Enregistrements radiophoniques et radar

La trajectoire de l'avion jusqu'à QM402 (voir [Figure 1](#), point ④) ne fait pas apparaître de signe évident de difficultés qu'aurait pu éprouver le pilote lors de l'exécution des tâches essentielles à la conduite du vol, telle que la maîtrise de la trajectoire. L'analyse de la trajectoire radar montre que cette partie du vol est très probablement réalisée sous PA.

L'analyse de l'ensemble des messages émis par le pilote à la fréquence ne fait pas apparaître de signe évident de fatigue, ni d'hypoxie d'altitude. Les changements de trajectoires étaient réalisés conformément aux instructions des contrôleurs aériens.

Le pilote et l'agent AFIS ont eu trois échanges au cours des trois minutes pendant lesquelles ils étaient en contact. Aucun message ne laissait présager d'une approche non stabilisée ou d'une panne quelconque. Le pilote n'a pas évoqué l'approche interrompue ni le dégagement vers un autre aérodrome. L'agent AFIS n'a pas ressenti d'inquiétude dans la voix du pilote.

Plusieurs raisons peuvent expliquer pourquoi l'avion n'est pas descendu au point de descente final QM406, les principales étant :

- Le PA n'était pas engagé et le pilote, en pilotage manuel, ne s'est pas rendu compte qu'il passait QM406 et l'a détecté tardivement ;
- Le PA était engagé, le mode APR pour l'approche RNP Z 23 était activé et le mode ALT n'avait pas été sélectionné au préalable, ce qui n'a pas permis la capture du plan de descente de manière automatique ;
- Le PA était engagé, mais le mode APR n'avait pas été activé alors que l'approche était correctement chargée et activée dans le calculateur GNSS, ce qui n'a pas permis la capture du plan de descente de manière automatique.

Il ne peut pas être exclu que le PA soit tombé en panne après le dernier virage.

Au cours de la dernière minute du vol (à partir du point ⑨), les taux moyens calculés étaient de l'ordre de +/- 2 000 ft/min. Le PA est limité à des taux de montée et de descente de +/- 1 600 ft/min. La trajectoire dans le plan vertical n'était pas commandée par le PA.

4 - CONCLUSIONS

Les conclusions sont uniquement établies à partir des informations dont le BEA a eu connaissance au cours de l'enquête. Elles ne visent nullement à la détermination de fautes ou de responsabilités.

Scénario

Une grande partie du vol IFR a été conduite au-dessus du FL 100, probablement pour voler au-dessus de la couche nuageuse. Le pilote et les passagers n'ont pas utilisé d'oxygène de subsistance, le système de bord étant hors service. Il est probable que le pilote a fait usage d'un oxymètre de pouls au cours du vol dans le but d'évaluer son état d'hypoxie, le pilote ayant l'habitude de l'utiliser au cours des vols précédents.

À l'approche de l'aérodrome de Besançon-La Vèze, le pilote a dû adapter la trajectoire de l'avion pour éviter différentes zones. Sur la trajectoire d'approche RNP, réalisée dans la couche nuageuse, la mise en descente finale a débuté trente secondes environ après le passage du point de descente finale. L'enquête n'a pas permis de déterminer si le pilote automatique (PA) était engagé ou non, à l'approche du point de descente finale. Le pilote a poursuivi l'approche et a cherché à rattraper le plan de descente par le haut, puis par le bas.

L'analyse des paramètres extraits des données radar lors de l'approche finale montre des écarts de trajectoire de part et d'autre du plan de descente nominal probablement liés à des actions importantes au manche de la part du pilote. La dernière manœuvre débutée par le pilote, toujours en l'absence de références visuelles extérieures, semble correspondre à une interruption de l'approche, pendant laquelle il a perdu le contrôle de l'avion.

Le déclenchement du parachute de sécurité à une hauteur insuffisante lors de la perte de contrôle n'a pas permis son déploiement complet avant la collision avec le sol.

Facteurs contributifs

Ont pu contribuer à la déstabilisation de l'approche et à la perte de contrôle lors de l'approche interrompue :

- une charge de travail élevée au cours de l'approche en raison des contraintes de trajectoire dans les plans horizontal et vertical ;
- une surveillance insuffisante des paramètres de vol et/ou des modes de guidage du PA à l'approche du point de descente finale ;
- des actions de pilotage manuel qui n'ont pas permis de revenir sur le plan de descente lors de l'approche finale ;
- la faible expérience récente pour la conduite d'approches IFR en l'absence de références visuelles extérieures ;
- l'absence probable de formation spécifique aux systèmes récemment installés sur l'avion permettant notamment la conduite d'approches LPV, dans de bonnes conditions de sécurité et la faible expérience dans l'utilisation des systèmes associés ;

(27) Affaiblissement de l'organisme, fatigue accablante.

Le vol en conditions hypoxiantes, notamment au-dessus du FL 100 pendant près de 90 minutes sans oxygène de subsistance, a pu générer des troubles cognitifs post-hypoxiques lors de la réoxygénation du cerveau durant la descente. De plus, une asthénie⁽²⁷⁾ post-hypoxique consécutive à l'effort d'adaptation de l'organisme a également pu s'installer. Ces effets, lorsqu'ils surviennent, sont généralement accentués avec l'âge. Cependant, en l'absence de signes positifs de troubles cognitifs pendant la descente vers le point d'approche initiale (communications normales avec le contrôle aérien), il n'a pas été possible de déterminer si un trouble post hypoxique a pu contribuer à la perte de contrôle. Il n'en reste pas moins que l'enquête a révélé une gestion discutable de l'oxygène de subsistance et des équipements associés, ainsi que des lacunes de la réglementation et de la documentation disponible relatives à l'utilisation d'oxygène de subsistance.

5 - RECOMMANDATIONS DE SÉCURITÉ

Rappel : conformément aux dispositions de l'article 17.3 du règlement 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, une recommandation de sécurité ne constitue en aucun cas une présomption de faute ou de responsabilité dans un accident, un incident grave ou un incident. Les destinataires des recommandations de sécurité rendent compte à l'autorité responsable des enquêtes de sécurité qui les a émises, des mesures prises ou à l'étude pour assurer leur mise en œuvre, dans les conditions prévues par l'article 18 du règlement précité.

Connaissance des effets et des conséquences de l'hypoxie d'altitude sur la conduite du vol (voir §3.4.3)

La brochure « Prévenir l'hypoxie », éditée par l'Agence européenne de la sécurité aérienne (AESA), évoque des situations au cours desquelles un pilote pourrait être confronté à des conditions d'hypoxie, en particulier en régime de vol aux instruments (IFR) à des altitudes plus élevées que celles prévues, en raison de conditions météorologiques dégradées. De plus, cette brochure est très orientée sur les moyens de préparation des vols et de conduite des vols qui permettraient d'éviter d'avoir recours à de l'oxygène de subsistance. La brochure n'incite pas les pilotes à se fixer des limites claires au-delà desquelles ils devraient s'imposer d'utiliser de l'oxygène de subsistance, alors que la rédaction actuelle de la partie NCO.OP.190 du règlement européen Air Ops a supprimé de la réglementation toute limite impérative d'altitude au-delà de laquelle l'utilisation d'oxygène de subsistance serait obligatoire. Cette brochure peut ainsi inciter à des comportements, vis-à-vis du risque d'hypoxie, similaires à celui observé lors de l'accident du N918SE.

La brochure précise que les moyens acceptables de mise en conformité (AMC) et documents d'orientation (GM) associés à l'exigence réglementaire NCO.OP.190 donnent des moyens aux pilotes pour évaluer leur besoin en oxygène de subsistance avant le vol et prendre les précautions adéquates s'il n'y a pas d'oxygène à bord, en vol. En réalité, ces AMC et GM listent uniquement des facteurs à prendre en compte, sans indication ou seuil associé.

Enfin, la brochure positionne à un même niveau des individus exceptionnels qui peuvent gravir l'Everest (FL 290) sans oxygène de subsistance et ceux moins rares, qui peuvent être sensibles à l'hypoxie dès le FL 070. Cette brochure peut ainsi amener les pilotes à faire une évaluation erronée de leur besoin en oxygène de subsistance. Par ailleurs, la proposition de réaliser des entraînements dans des caissons d'altitude de centres aéro-médicaux pour améliorer leur faculté à reconnaître l'hypoxie paraît quelque peu théorique.

De manière générale, les effets de l'hypoxie d'altitude portés à la connaissance des pilotes sont limités aux effets directs et aigus, d'altitudes-pressions supérieures à la plage FL 050 – FL 070. Historiquement, les effets les plus marqués, qui surviennent le plus souvent bien au-delà du FL 100, ont été les seuls à être reconnus comme manifestations de l'hypoxie. Aujourd'hui encore, cette tendance persiste malgré les travaux et les retours d'expérience de plus en plus nombreux sur l'hypoxie modérée (*mild hypoxia*).

Depuis un peu plus d'une dizaine d'années, des travaux scientifiques confirment les conséquences différenciées de l'hypoxie d'altitude sur la conduite des vols. Elles surviennent alors que le pilote se trouve à moins de 5 000 ft d'altitude après une exposition plus ou moins prolongée à de l'hypoxie, même modérée, et cherche à atterrir. Elles semblent résulter de l'effort de compensation de l'hypoxie durant le vol ainsi que des conditions de réoxygénération des cellules cérébrales, généralement lors de la descente et de l'approche. Ces conséquences sont caractérisées par une fatigue accrue et des troubles cognitifs post-hypoxiques. Les accidents du [D-6393 survenu en 2017](#) et du [F-WVSG survenu en 2005](#) sont relatifs à des scénarios qui ont pu donner lieu à de tels phénomènes d'hypoxie.

En conséquence, le BEA recommande que :

- **en l'absence de formation et d'information spécifiques aux troubles post-hypoxiques ;**
- **en l'absence de documentation actualisée et référencée à l'attention des pilotes, concernant l'hypoxie d'altitude et les troubles post-hypoxiques ;**
- **vu la liberté d'appréciation qu'offre au pilote commandant de bord le paragraphe NCO.OP.190(a) concernant l'emport d'oxygène de subsistance ;**
- **considérant l'amélioration des performances des avions légers non HPA⁽²⁹⁾ qui permettent de voler à des niveaux de vol de plus en plus élevés ;**

L'AESA amende la brochure « Prévenir l'hypoxie » en intégrant l'information sur l'hypoxie modérée et les troubles post-hypoxiques ainsi que leurs symptômes, et en incitant les pilotes à une approche plus prudente en cas de dépassement, sans utilisation d'oxygène de subsistance, des seuils mentionnés au paragraphe NCO.OP.190(b).

[Recommandation FRAN-2022-003]

⁽²⁹⁾ Avion hautes performances.

Oxymètre de pouls (voir §3.4.4)

Les manifestations d'hypoxie peuvent apparaître à partir du FL 050 sans toutefois s'accompagner d'effets immédiats décelables par le pilote et ses passagers. La compensation du manque d'oxygène en croisière crée un effort physiologique plus important et peut avoir pour conséquence une asthénie post-hypoxique.

L'utilisation d'un dispositif médico-technique dans un environnement non médical est assortie d'un risque de mésusage. La portabilité du dispositif ainsi que la convivialité de l'affichage d'une mesure ne reflètent pas la complexité des bases physiologiques de son fonctionnement et de son utilisation. Compte tenu de surcroît des effets délétères de l'hypoxie d'altitude sur les fonctions cognitives, les capacités d'un pilote à faire preuve de discernement dans l'utilisation d'un oxymètre de pouls lors de la phase critique d'un vol à une altitude-pression hypoxante peuvent être remises en question.

L'utilisation d'un oxymètre de pouls peut exposer le pilote à une illusion de sécurité par rapport au risque d'hypoxie. Ce sentiment de sécurité peut être renforcé par l'affichage d'une mesure, se référant à un seuil. Cependant, l'oxygénation réelle des tissus ne peut être déterminée avec fiabilité par l'oxymètre, du fait de la relation non linéaire entre la saturation pulsée du sang en oxygène (SpO₂), la pression partielle en oxygène du sang (PO₂) et la capacité de l'hémoglobine à libérer l'oxygène au niveau des organes. Les témoignages recueillis au cours de l'enquête suggèrent que les occupants du N918SE ont très probablement été victimes de cette illusion de sécurité lié à une confiance abusive dans la signification des indications d'un oxymètre de pouls.

Ainsi, l'oxymètre de pouls ne peut pas être considéré comme un système suffisant pour identifier les conséquences d'une exposition à des conditions hypoxiantes. Ce système doit être utilisé en complément d'autres dispositifs, en particulier en cas d'utilisation d'oxygène de subsistance pour évaluer s'il existe un besoin d'oxygène supplémentaire.

En conséquence, le BEA recommande que :

- **en l'absence de documentation actualisée et référencée à l'attention des pilotes, concernant l'usage de l'oxymètre de pouls comme moyen de déterminer le domaine de vol dans lequel l'oxygène de subsistance ne serait pas nécessaire ;**
- **considérant que l'oxymètre de pouls, utilisé seul, ne peut être considéré comme un système fiable suffisant pour permettre une évaluation objective de la pression artérielle en oxygène ;**
- **considérant que l'oxymètre de pouls, utilisé seul, ne peut donc pas être utilisé pour évaluer le besoin en oxygène de subsistance ;**
- **vu la liberté d'appréciation qu'offre au pilote commandant de bord l'exigence réglementaire NCO.OP.190(a) concernant l'emport et l'utilisation d'oxygène de subsistance ;**

L'AESA amende et actualise la brochure «Prévenir l'hypoxie» afin de supprimer la référence aux oxymètres de pouls comme moyen de détermination des besoins en oxygène de subsistance au-delà des seuils mentionnés dans l'exigence réglementaire NCO.OP.190(b), et limite la référence à l'oxymètre de pouls à celui d'un moyen complémentaire de s'assurer d'un apport en oxygène suffisant lors des phases de vol au cours desquelles l'oxygène de subsistance est utilisé.

[Recommandation FRAN-2022-004]