



Accident survenu à l'avion MUDRY - CAP10BK
immatriculé **F-GGYC**
le 23 mai 2021
à Peyrolles-en-Provence (13)

Heure	Vers 19 h 45 ¹
Exploitant	Aerobatic Club de la Méditerranée
Nature du vol	Voltige
Personnes à bord	Pilote et passager
Conséquences et dommages	Pilote et passager décédés, avion détruit

**Perte de contrôle lors d'un vol de voltige,
collision avec la surface d'un lac**

1 DÉROULEMENT DU VOL

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

Le pilote, accompagné de son fils, décolle de l'aérodrome d'Aix-Les Milles (13) vers 19 h 30 et se dirige vers l'axe de voltige de Pont de Pertuis situé au-dessus de la rivière de la Durance. À 19 h 38 (voir *Figure 1*, point ①), il contacte MARSEILLE Information², indique qu'il se trouve à la verticale de la Durance et qu'il s'apprête à « débuter les évolutions entre 5 000 et 6 000 ft d'altitude ».

À 19 h 39 (point ②), le contrôleur lui indique qu'il n'y a pas d'aéronef dans le secteur et le pilote répond qu'il débute les évolutions. C'est le dernier message radio émis par ce dernier.

À 19 h 46 (point ⑥), des témoins voient l'avion en vol rectiligne horizontal, se mettre subitement en descente vers le sol avec une assiette à piquer (voir § 2.6). L'avion disparaît de leur vue puis ils entendent un bruit sourd. Ils se rendent en voiture sur le lieu présumé de l'accident et préviennent les secours.

Entre-temps, à 19 h 52, ne détectant plus l'avion au radar, l'agent de MARSEILLE Information tente de joindre le pilote par radio, sans succès³. À 20 h 01, n'arrivant pas à rétablir le contact radio avec le pilote ni le contact radar sur l'avion, il déclenche une phase de détresse.

Des débris de l'avion sont retrouvés à 20 h 48 par l'hélicoptère de la Sécurité Civile, à la surface d'un plan d'eau. L'épave est localisée dans la nuit au fond de l'eau par les plongeurs, au centre du plan d'eau.

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

² Il s'agit du centre d'information de vol du CRNA sud-est.

³ Aucun appel de détresse n'a été reçu.

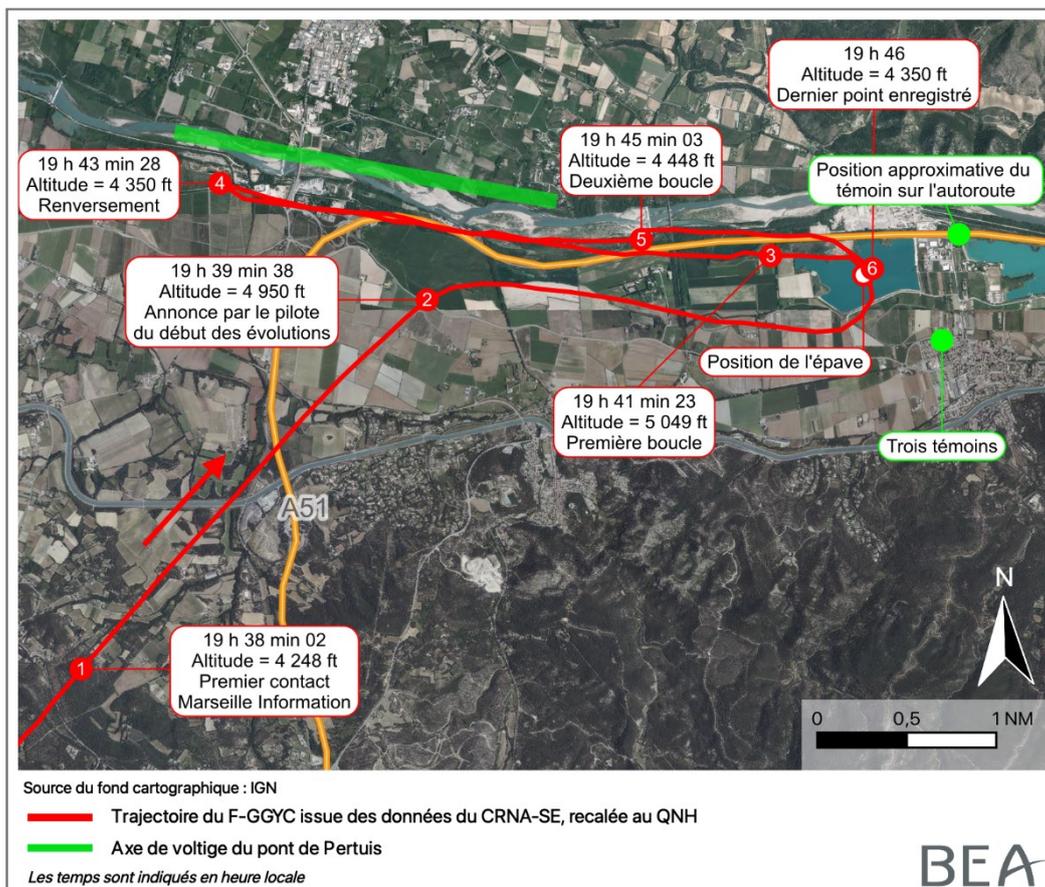


Figure 1 : fin de la trajectoire du vol de l'avion

2 RENSEIGNEMENTS COMPLÉMENTAIRES

2.1 Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques au moment de l'accident, estimées par Météo-France, étaient les suivantes : vent faible de secteur ouest, pas de turbulence, CAVOK. Le soleil se trouvait dans l'azimut 287° et à 12° au-dessus de l'horizon.

2.2 Examen du site et de l'épave

L'épave repose dans le plan d'eau des Chapeliers, situé à 200 m d'altitude, par quinze mètres de fond. Elle est totalement disloquée. La faible visibilité au fond de l'eau n'a pas permis de déterminer si l'aéronef était entier. Le pilote et le passager portaient leurs parachutes qui ont été retrouvés déployés par les plongeurs. Il n'a pas été possible de déterminer si les parachutes se sont déployés consécutivement à la collision avec la surface de l'eau. En raison des déformations multiples de la structure de la verrière, la position de la poignée de déverrouillage de la verrière n'a pu être déterminée.

En raison de la fragmentation de l'avion, tous les éléments constitutifs de celui-ci n'ont pas pu être récupérés. La structure du fuselage, la voilure et l'empennage ont été détruits. L'examen des ruptures des différents débris récupérés montre que les dommages constatés sont tous consécutifs à la collision avec la surface de l'eau, et atteste d'une collision de l'avion à haute énergie, résultant d'une vitesse élevée associée à une forte assiette à piquer.

Il est constaté des déformations dissymétriques entre les trains principaux qui peuvent s'expliquer par une inclinaison de l'avion sur l'axe de roulis au moment de la collision avec la surface de l'eau. L'observation des chaînes de commande des gouvernes montre qu'elles étaient continues au moment de l'accident. Cependant, les gouvernes associées ayant été détruites ou non retrouvées, l'hypothèse d'une défaillance technique affectant la contrôlabilité de l'avion ne peut pas être totalement exclue.

Les examens sur le moteur ont été limités en raison des nombreux dommages consécutifs à l'accident. Aucune rupture n'est constatée dans le bloc moteur ; les composants sont en position sans indice de défaut de lubrification survenu lorsque le moteur était en fonctionnement. Le réglage interne du bloc d'injection ne répond pas aux recommandations du constructeur. D'après les spécialistes consultés, le réglage relevé conduirait à un mélange anormalement pauvre qui pourrait conduire à un régime moteur instable, voire une perte de puissance lorsque la commande des gaz est sollicitée vers le régime ralenti. La continuité du circuit carburant n'a pas pu être vérifiée dans son intégralité. La position exacte du robinet de carburant n'a pu être validée.

La carte mémoire de la caméra GoPro qui se trouvait à bord de l'avion s'est rompue lors de l'accident et il n'a pas été possible de récupérer les données. L'accéléromètre numérique de l'avion a pu être récupéré et analysé⁴.

2.3 Renseignements sur l'axe de Voltige Pont de Pertuis

L'activité permanente n°6921 Voltige « PONT DE PERTUIS » est publiée dans l'AIP EN ROUTE 5.5 Activités Aériennes sportives et récréatives. Elle se compose d'un axe de 2 km de long orienté au 102°/282°. L'altitude du plancher de l'activité est à 2 000 ft et le plafond à 5 906 ft. Des consignes internes affichées dans l'aéroclub réhaussaient le plancher de l'activité à 3 000 ft et rappelaient de respecter les limites est et ouest de l'axe, dans la mesure du possible.

2.4 Renseignements sur l'avion

2.4.1 Généralités

L'avion était utilisé pour la pratique de la voltige par le DTO Aerobatic Club de la Méditerranée⁵, en partenariat avec l'aéroclub AirFrance Provence Aviation. C'était un CAP 10B qui avait été modifié en CAP 10BK par le renforcement carbone du longeron principal afin d'augmenter la résistance à la fatigue de la structure, conformément au bulletin de recommandation n°2014/01⁶ émis par la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) en 2014, en réponse à la consigne de navigabilité n°2003-375⁷. Le domaine de vol de l'avion était +6g/-4,5g et la vitesse maximale lors des manœuvres déclenchées était limitée à 160 km/h. Au moment de l'accident, l'avion se trouvait dans les limites de masse et centrage définies par le constructeur de l'avion.

⁴ L'avion était équipé d'un accéléromètre numérique TL Elektronik TL-3424 doté d'un capteur mesurant les accélérations verticales de l'avion, dans une plage allant de -15 g à +15 g et avec une précision de +/-0,1 g.

⁵ L'aéroclub délivre des formations aux qualifications additionnelles pour le vol en montagne et pour le vol acrobatique.

⁶ <https://documentation.osac.aero/view/200346>.

⁷ <https://documentation.osac.aero/view/221070>.

2.4.2 Dernière opération de maintenance et derniers vols du F-GGYC

Le moteur totalisait 500 h depuis la dernière révision générale. L'avion avait subi une visite 100 heures à l'issue de laquelle il avait été convoyé le 21 mai 2021 jusqu'à l'aérodrome d'Aix-Les Milles, par le président de l'Aerobatic Club de Méditerranée. Il n'avait rien remarqué d'anormal pendant ce vol. L'avion totalisait 4 h 10 depuis cette visite et les cinq derniers vols avaient été réalisés par le chef-pilote de l'aéroclub AirFrance Provence Aviation qui avait effectué des séances de voltige d'environ 30 minutes chacune durant lesquelles il n'avait rien remarqué d'anormal.

2.5 Témoignages de personnes au sol

Un premier témoin qui roulait en voiture sur l'autoroute A51 en direction de l'ouest (voir Figure 1) indique que l'avion a volé pendant près d'une minute en vol rectiligne horizontal avant de piquer subitement vers le sol sans effectuer de vrille, perpendiculairement et dos à l'autoroute.

Trois autres témoins mentionnent avoir entendu des ratés moteur puis l'avion a ensuite piqué brusquement vers le sol. L'un d'eux précise avoir vu de la fumée noire et qu'avant de plonger, l'avion a viré légèrement à droite sur l'axe de lacet. Ils l'ont ensuite perdu de vue et ont entendu le bruit de la collision avec la surface de l'eau. Ils se sont rendus au Plan d'eau des Chapeliers, lieu présumé de l'accident. En arrivant sur place, ils ont remarqué une nappe de carburant et des débris à la surface de l'eau.

Un cinquième témoin indique ne pas avoir perçu le bruit du moteur au moment de la collision. Aucun des témoins n'indique avoir entendu d'explosion ou vu d'éléments se détacher de l'avion en vol.

L'origine des ratés moteurs décrits par les témoins n'a pas été identifiée, mais d'après l'expérience du BEA, cela peut arriver sur certains avions lors d'évolutions qui suivent du vol dos. Avec la distance entre l'avion et la position des témoins, il est fortement probable que le son a été entendu avec un certain décalage.

2.6 Exploitation des données radar et de l'accéléromètre numérique

Les données des radars de Marseille et du Mont Ventoux ont été récupérées. Ces données ont été synchronisées avec les données de l'accéléromètre⁸ en utilisant les variations d'altitude (voir Figure 2).

⁸ Les accélérations sont enregistrées avec une fréquence d'échantillonnage de 10 Hz (0,1 s entre deux points).

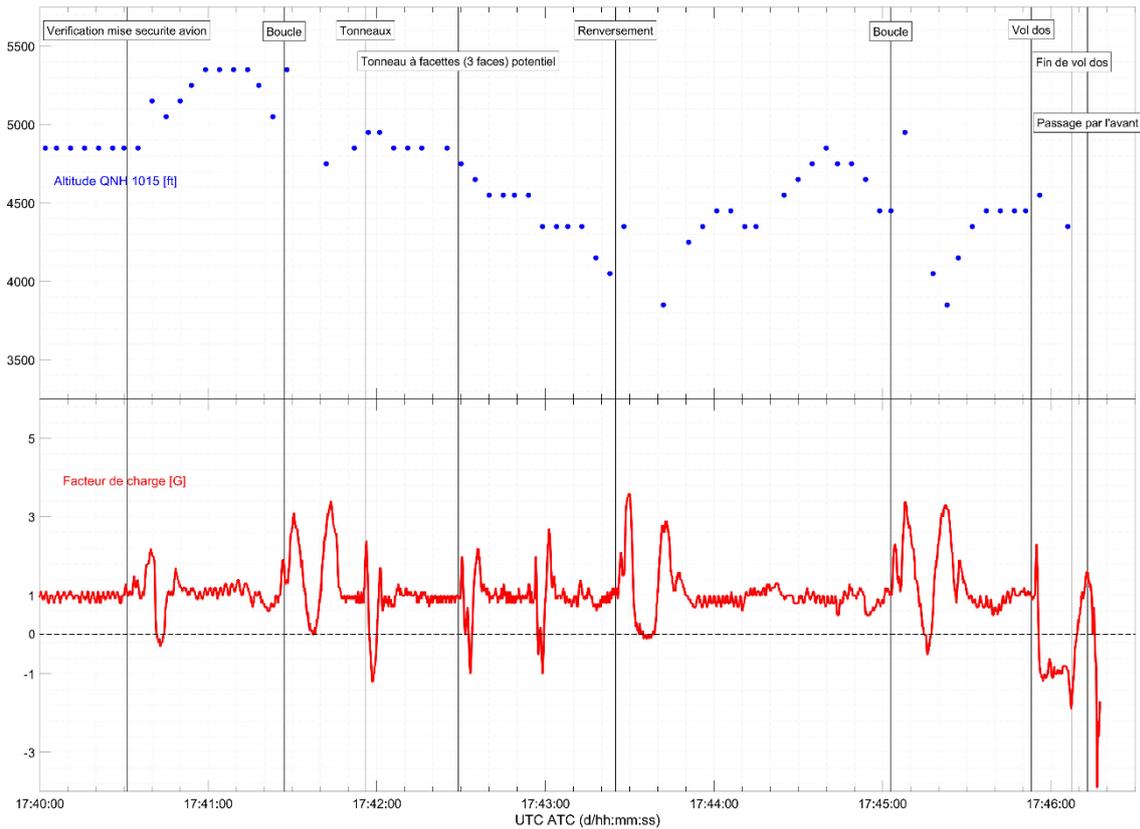


Figure 2 : données d'altitude issues des radars⁹ et données de l'accéléromètre (Source : BEA)

L'analyse des données de l'accéléromètre, complétées par celles des radars, a permis d'identifier que le pilote a très probablement réalisé les figures de voltige suivantes¹⁰ :

Heures	Types de figures	Durée	Variation du facteur de charge vertical (Nz) et durée d'exposition	Valeur moyenne
19 h 40 min 36	Un tonneau ou une ressource/abatée qui semble cohérent avec la vérification de sécurité que les pilotes de voltige réalisent avant de débiter les évolutions, afin de s'assurer que tout est bien arrimé dans l'habitacle et que les occupants sont bien attachés. (voir Figure 1, point 1)	9 s	de +2,2 g à -0,3 g Nz > +1 g pendant 5 s Nz < 0 g pendant 3 s	+0,9 g

⁹ L'échantillonnage des données radar varie entre 5 et 15 secondes. Un écart de 15 secondes entre deux positions peut entraîner une perte de visibilité des manœuvres de l'avion. Ce faible échantillonnage et la précision à 100 ft du Mode C peut limiter la détection de manœuvres particulières comme une figure de voltige et/ou fournir des variations d'altitude grossières.

¹⁰ L'accélération enregistrée durant ce vol a été comparée avec celles de deux vols d'essai réalisés en 2019 par la Direction Générale de l'Armement (DGA). Lors de ces vols, des figures de voltige ont été réalisées avec un avion doté du même modèle d'accéléromètre. Cette comparaison a permis d'étayer l'identification des figures.

19 h 41 min 27	Probablement une boucle. Note : l'échantillonnage variable des données ne permet pas de l'affirmer. (Point 2)	20 s	Augmentation à +3,1 g puis diminution à 0 g puis augmentation de nouveau à +3,4 g Nz > +1 g pendant 15 s Nz > 0 g pendant toute la période	+1,7 g
19 h 41 min 56	Un tonneau	7 s	Augmentation à +2,3 g, diminution à -1,2 g puis augmentation à nouveau à +1,7 g Nz > +1 g pendant 2.5 s Nz < 0 g pendant 3 s	-0,4 g
19 h 42 min 29	Probablement un tonneau irrégulier à facettes. (Point 3)	10 s	Alternance rapide de facteurs de charge négatifs et positifs, à plusieurs reprises allant de +2,1 g à -1 g Nz > +1 g pendant 4 secondes Nz < 0 g pendant 2 secondes	-0,9 g
19 h 42 min 56	Probablement un second tonneau irrégulier à facettes.	7 s	Alternance de facteurs de charge positifs et négatifs, allant de -1 g à +2,7 g Nz > +1 g pendant 4 s Nz < 0 g pendant 2 s	+0,9 g
19 h 43 min 25	Probable renversement à l'extrémité ouest de l'axe de voltige. (Point 4)	25 s	Augmentation à +2,1 g, diminution à +1,6 g, augmentation à +3,6 g, diminution et stabilisation à 0 g, augmentation à +2,8 g, stabilisation autour de +1 g Nz > +1 g pendant 16 s Nz > 0 g pendant toute la période	+1,3 g
19 h 45 min 03	Probable boucle avec une perte d'altitude. (Point 5)	28 s	Alternance de facteurs de charge positifs et négatifs, allant de +3,4 g à -0,5 g puis augmentation à +3,3 g Nz > +1 g pendant 21 s Nz < 0 g pendant 3 s	+1.7 g
19 h 45 min 53	Vol dos probable	14 s	Augmentation du facteur de charge à +2,3 g puis diminution à -0,9 g Nz > +1 g pendant 1 s Nz < 0 g pendant 11 s	-1.2 G Nz = -1 g pendant 10 s
19 h 46 min 06	Sortie du vol dos	1,2 s	Diminution du facteur de charge de -0,9 g à -1,9 g Nz < 0 g	-1.3 g
19 h 46 min 07	/	5 s	Augmentation du facteur de charge de -1,9 g à +1,6 g. Nz < 0 g pendant 2 s Nz > +1 g pendant 3 s	+0.2 g
19 h 46 min 13	Passage par l'avant	3 s	Diminution du facteur de charge de +1,6 g à -0,1 g puis à -3,9 g Nz > +1 g pendant 1,5 s Nz < 0 g pendant 1 s	+0.3 g
19 h 46 min 16	/	/	Augmentation du facteur de charge de -3.9 g à -1,7 g	-2.5 g
19 h 46 min 17	/	/	Arrêt de l'enregistrement	/

Figure 3 : figures réalisées par le pilote au cours du vol (Source : BEA)

Pour les derniers points de trajectoire enregistrés par le radar, le sol est à 670 ft d'altitude. L'avion se trouve à 4 350 ft QNH 1 015 hPa, soit une hauteur de 3 700 ft environ. La dernière position radar

de l'avion est détectée à 19 h 46 min 06. La projection au sol de la position de l'avion à ce moment précis le situe à environ 120 m du lieu où a été retrouvée l'épave.

Les données de l'accéléromètre numérique montrent que les valeurs maximales du facteur de charge atteintes au cours du vol de l'accident sont $+3,6 \text{ g} / -3,9 \text{ g}$, compatibles avec le domaine de vol de l'avion. Les données de l'accéléromètre sont considérées valides jusqu'à la fin de l'enregistrement qui s'arrête à 19 h 46 min 17.

À 19 h 46 min 07, on observe une alternance de facteur de charge négatif puis positif allant dans un premier temps de $-1,9 \text{ g}$ à $+1,6 \text{ g}$ en cinq secondes. Cette variation de facteur de charge a pu possiblement faire apparaître des symptômes proches de ceux liés à l'effet push-pull (voir § 2.9.2). Puis cinq secondes après, on observe une figure qui s'apparente très probablement à un passage par l'avant durant lequel le facteur de charge diminue en 5 s environ de $+1,6 \text{ g}$ jusqu'à $-3,9 \text{ g}$. Un tel facteur de charge négatif n'a pu être atteint qu'à la suite d'un effort suffisamment important exercé vers l'avant et de manière continue sur la commande de profondeur.

2.7 Passage par l'avant

Cette figure consiste à réaliser une mise en descente avec une assiette fortement à piquer depuis un vol ventre. À la fin de la manœuvre, l'avion est sur le dos (voir Figure 4).

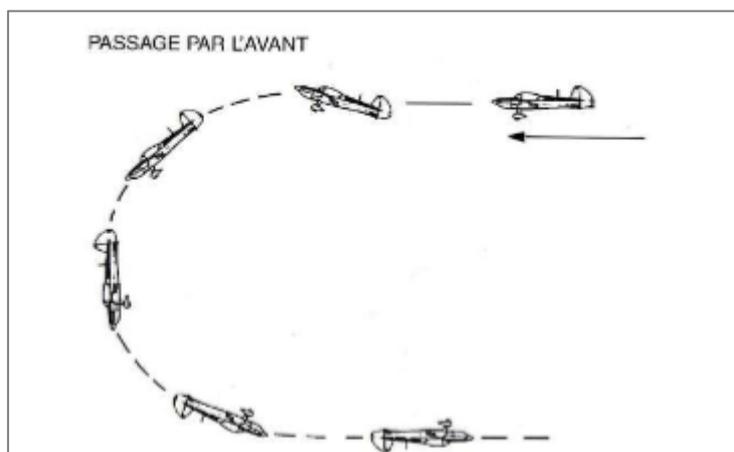


Figure 4 : passage par l'avant (Source : Guide de l'Instructeur Voltige)

D'après le Guide de l'Instructeur Voltige¹¹, cette figure doit être exécutée avec une bonne précision et avec une cadence suffisante. Il s'agit d'une figure délicate du fait de son aspect « irréversible ». En effet, il n'est plus possible d'interrompre la figure une fois passée la verticale descendante. La vitesse maximum d'entrée de figure est de 100 km/h et il est nécessaire de garder beaucoup de puissance en début de figure pour bien alimenter la gouverne de profondeur, et de ne pas pousser brutalement sur le manche pour éviter un décrochage dynamique sous facteur de charge négatif.

Selon un instructeur voltige de l'ENAC, pour réaliser un passage par l'avant, il est recommandé de débiter cette figure à une hauteur de 3 500 ft. La perte d'altitude est variable ; elle est en moyenne de 1 000 ft à 1 200 ft. Il précise que pour réaliser ce type de figure, il faut ralentir l'avion sur le ventre à 110 km/h, proche du décrochage. Au moment de piquer en poussant très fort sur la

¹¹ Gautier Guérard, 2013, éditions Volez !, remplacé par le *Guide de l'instructeur voltige et du voltigeur* du même auteur, Éditions Cépaduès, 2^{ème} éd. 2020.

commande de profondeur, il faut mettre plein gaz en même temps. Il peut alors y avoir un raté moteur à la reprise accompagné d'un dégagement de fumée noire. Il faut ensuite conserver la puissance maximale jusqu'au passage de la verticale puis réduire la puissance à moitié pour que l'avion n'accélère pas trop dans la seconde partie de la figure.

L'instructeur voltige indique qu'en cas d'arrêt du moteur avant le passage de la verticale, il est possible d'interrompre la figure et de faire une ressource souple positive. Après le passage de la verticale, il est possible soit de faire un demi-tonneau et de faire une ressource souple en positif, ou bien de terminer la figure en continuant à pousser sur le manche. Toutefois, cela peut être surprenant pour le pilote. De plus, si le pilote est en retard durant la figure, soit parce qu'il ne pousse pas assez sur le manche ou n'ose pas pousser plus, ou qu'un événement fortuit survient dans l'habitacle (objet non attaché, réflexe du passager par exemple) l'avion accélèrera très rapidement.

Cet instructeur ajoute qu'en cas de vol avec un passager, il faut lui faire tenir les sangles du harnais d'épaule pour éviter toute action réflexe inadaptée de sa part.

2.8 Renseignements sur les occupants

Le pilote, âgé de 54 ans, était titulaire d'une licence de pilote d'avion PPL(A) depuis 1992 et d'une qualification « vol acrobatique » depuis mars 2018 par conversion d'une qualification additionnelle nationale « pratique de la voltige élémentaire » obtenue en novembre 2015 sur SV4 STAMPE au Centre de Perfectionnement et de Voltige Aérienne d'Angers. Il exerçait la fonction de responsable sécurité au sein de l'Aerobatic Club de la Méditerranée.

Il totalisait environ 460 heures de vol dont 45 sur type et environ dix dans les trois mois précédents dont six sur type (toutes sur le F-GGYC). Il avait effectué un vol en double commande sur le F-GGYC le 18 février 2021 et son dernier vol en voltige en qualité de commandant de bord remontait au 23 avril 2021.

D'après plusieurs responsables de l'aéroclub, c'était un pilote appliqué, précautionneux, sérieux et prudent, qui ne faisait pas de compétition et n'hésitait pas à se remettre à niveau avec un instructeur. Selon un des instructeurs, le pilote avait commencé en mars 2021 à travailler les figures de voltige avancée (rotations verticales, déclenchés, avalanches...) ¹². Aucun des différents instructeurs ayant pratiqué la voltige en double commande avec le pilote n'a indiqué lui avoir montré comment réaliser un passage par l'avant.

Le pilote a noté dans son carnet de vol les valeurs minimales et maximales de facteur de charge atteintes lors des 23 derniers vols en CAP10 effectués depuis le 1^{er} janvier 2019. Il y a eu deux vols au cours desquels le facteur de charge est allé au-delà de -2 g (-3,1 g et -3,2 g). Ces deux vols ont été réalisés en solo. Il y a eu également neuf vols où le facteur de charge est allé au-delà de +4 g, variant entre +4 g et +4,8 g.

Environ deux heures avant le vol, le pilote a indiqué par téléphone à un collègue qu'il répétait au sol ses figures de voltige avant de faire un vol avec son fils. Deux fiches de voltige ont été retrouvées au domicile du pilote. Les figures réalisées au cours du vol de l'accident (voir § 2.6) ne correspondent pas à la répétition de ces programmes. Selon l'un de ses fils, il ne les suivait pas

¹² Le cursus de voltige avancée comprend également l'enseignement de la manœuvre de passage par l'avant.

systématiquement. Ces programmes ne prévoyaient aucun passage par l'avant. Ils comportaient néanmoins un virage dos¹³ après un tonneau à gauche.

Le pilote détenait un certificat d'aptitude médicale de classe 2 valide jusqu'au 1^{er} octobre 2021 avec une limitation VDL¹⁴ qu'il avait prorogé auprès d'un médecin agréé le 1^{er} octobre 2020. Lors de la précédente demande de prorogation de son certificat établie le 15 mai 2019 par le même médecin, il avait déclaré sur le formulaire de demande, pratiquer la voltige sur CAP10. Il avait passé un électrocardiogramme à cette occasion. Il prenait depuis plusieurs années un traitement contre l'hypertension artérielle¹⁵, bithérapie qui avait été renouvelée deux jours avant le vol de l'accident par son cardiologue et comprenant :

- un diurétique (HYDROCHLOROTHIAZIDE). Les diurétiques ont pour propriété d'augmenter l'élimination urinaire d'eau corporelle, par conséquent, de réduire la composante hydrostatique¹⁶ de la pression artérielle ;
- un inhibiteur de l'angiotensine II (VALSARTAN). Cette classe de médicaments entraîne un relâchement des parois artérielles et par conséquent peut diminuer la réponse sympathique.

Selon l'Institut de Recherche Biomédicale des Armées (IRBA) et le Centre d'Expertise Médicale du Personnel Navigant (CEMPN), les médicaments de la famille des sartans ne sont pas connus pour engendrer des effets secondaires non compatibles avec la voltige, en particulier si le traitement est ancien et habituellement bien toléré par le patient. En revanche, même si les diurétiques ne sont pas règlementairement contre-indiqués, ils ne sont pas vraiment recommandés chez les pilotes pratiquant la voltige.

Le cardiologue qui suivait le pilote assurait principalement le suivi de la pression artérielle et de la biologie (surveillance du potassium sanguin et autres électrolytes compte tenu de la prise de diurétiques). Aucune anomalie, notamment échographique, n'a été décelée au cours de ce suivi.

L'autopsie pratiquée sur le corps du pilote indique que la cause du décès est un polytraumatisme sur choc à haute énergie. Un examen du système cardiovasculaire n'a pas été possible. Par ailleurs, les analyses toxicologiques ont confirmé la présence des médicaments correspondant au traitement prescrit.

Le passager, âgé de 19 ans, ne détenait aucune licence de pilote ni qualification aéronautique. Il volait occasionnellement avec son père. Selon les proches, le pilote ne lui laissait jamais les commandes.

Par ailleurs, un des fils du pilote, âgé de 22 ans qui volait régulièrement avec lui depuis plusieurs années indique que son père ne lui laissait pas les commandes lors des figures de voltige.

¹³ Manœuvre de voltige élémentaire consistant à réaliser un virage en palier en vol dos. Au cours de cette manœuvre, le facteur de charge devient négatif mais reste néanmoins proche de -1 g.

¹⁴ Obligation du port d'un moyen de correction optique adapté en vol pour corriger la vision de loin ; implique l'emport d'une paire de lunettes de secours en cabine.

¹⁵ Élévation pathologique de la tension artérielle qui augmente significativement les risques d'infarctus du myocarde, d'accident vasculaire cérébral, notamment.

¹⁶ Pression de la colonne de sang à l'intérieur de l'arbre vasculaire.

2.9 Description du phénomène et risques associés aux altérations de la conscience sous facteur de charge désignés ci-dessous par LOC¹⁷

Selon l'ouvrage intitulé « Physiologie aéronautique »¹⁸, « le risque majeur de l'exposition aux accélérations [radiales positives] +Gz de longue durée (supérieures à 5 s), est celui de l'altération de conscience sous facteur de charge qui est lié à la fois à l'intensité de l'accélération, au taux de mise en accélération (jolt¹⁹) et aux circonstances qui, pendant le vol, ont précédé la phase d'accélération. En fonction de ces différents facteurs, la perte de conscience revêt des caractères d'apparition ou d'évolution multiples. »

Deux types d'altérations de conscience²⁰ y sont décrits :

- la quasi-perte de conscience, appelée A-LOC (*Almost Loss of Consciousness*), au cours de laquelle le pilote ne perd pas totalement conscience mais est dans l'impossibilité d'agir de façon cohérente et adaptée sur les commandes. Cela se traduit par l'apparition d'un état de confusion, associant un certain degré de désorientation spatiale et des troubles du jugement. Sous une forme et un niveau de gravité variables, le pilote est partiellement conscient, hébété, capable d'entendre et de voir, mais incapable d'agir, ou du moins d'agir avec pertinence ;
- la perte de conscience totale induite par facteur de charge, identifiée sous le nom de G-LOC (*G-Induced Loss of Consciousness*), responsable d'une incapacité totale du pilote.

2.9.1 Phénomènes associés à des manœuvres sous facteur de charge positif

La description des phénomènes présentés ci-dessous s'appuient sur des publications de différents organismes ou chercheurs au cours des dernières décennies, des échanges avec des médecins du Pôle médical de la DGAC, le médecin cardiologue de la Fédération Française Aéronautique (FFA), et les médecins de l'IRBA.

Dans le cas de manœuvres à facteur de charge positif, « pour des vitesses de mise en accélération²¹ modérées (contrairement à celles observées sur avion de chasse à hautes performances) et de longue durée », les symptômes de la perte de conscience sont décrits en quatre phases :

- la première phase débute avec l'augmentation du facteur de charge et dure cinq secondes environ. Durant cette phase, le pilote est conscient ;
- la deuxième phase est représentée par la perte de conscience totale d'une durée allant de trois à trente secondes. À la fin de cette phase, apparaît une activité musculaire désordonnée, à l'origine de mouvements amples ou de tremblements²². Une activité cérébrale de nature hallucinatoire apparaît également, souvent perçue et mémorisée comme un rêve ;
- la troisième phase est le retour progressif vers un état normal de perception de l'environnement. Sa durée moyenne est d'environ quinze secondes, mais elle peut atteindre une minute. Aucune action pertinente n'est possible de la part du pilote ;
- la quatrième phase est la phase de récupération. Pendant les quinze premières secondes, le pilote n'est capable d'effectuer que des actions simples sur les commandes de son aéronef, mais reste incapable de faire une opération mentale simple. La durée totale de cette phase est supérieure à deux minutes.

¹⁷ *Loss of consciousness.*

¹⁸ Dr H. Marotte, 2004, Éditions SEES.

¹⁹ Unité mesurant la rapidité de l'augmentation du facteur de charge, exprimées en g/s (Note du BEA).

²⁰ Les troubles de la conscience sont en grande partie expliqués par un mécanisme d'hypoxie du cerveau d'origine circulatoire.

²¹ Comprendre ici la vitesse d'augmentation du facteur de charge positif.

²² Assimilables à des convulsions.

Avec l'augmentation du facteur de charge positif, le sang dans le corps aura tendance à se déplacer de la tête vers les pieds. Avec l'augmentation de l'intensité et de la durée d'exposition, cela peut se manifester progressivement par :

- la réduction du champ visuel et de la vision périphérique ;
- la perte de vision des couleurs (« voile gris ») ;
- la perte complète de la vision mais en conservant la conscience (« voile noir ») ;
- l'altération de conscience (« A-LOC ») ;
- la perte de conscience (« G-LOC »).

Le voile gris et le voile noir n'apparaissent toutefois que si le taux de mise en accélération est progressif (valeurs du jolt faibles).

À basse hauteur, ces effets momentanés peuvent s'avérer fatals. Des pilotes, même très expérimentés, peuvent passer directement à une condition G-LOC, sans percevoir les signaux visuels avant-coureurs (voile gris, voile noir) qui pourraient être utilisés comme signaux d'alerte pour s'abstenir de maintenir ou d'augmenter le facteur de charge. Les seuils auxquels ces effets se produisent sont variables d'un individu à l'autre et, pour un même individu, d'un moment à l'autre. La tolérance au facteur de charge dépend de l'entraînement, de l'âge et de la condition physique de l'individu à un instant donné.

Selon l'IRBA, les principaux facteurs qui affectent la tolérance aux accélérations +Gz sont :

- la prise de certains médicaments (en particulier les médicaments antihypertenseurs ou à visée cardiovasculaire) ;
- la consommation de certains toxiques (alcool) ;
- le niveau de fatigue et la dette de sommeil éventuelle ;
- la déshydratation ;
- être à jeun ;
- la condition physique : absence de pratique sportive, ou au contraire réalisation d'un sport d'endurance dans les heures qui précèdent le vol ;
- l'absence d'habituation cardiovasculaire, en particulier le sous-entraînement (c'est le cas des pilotes qui ne pratiquent la voltige qu'occasionnellement) ;
- l'exposition préalable à des accélérations radiales négatives (-Gz) et l'effet push-pull (voir § 2.9.2). Les conséquences de cette exposition sont susceptibles de perdurer pendant au moins deux heures.
- l'absence de réalisation adéquate de manœuvres musculo-respiratoires dites « manœuvres anti-G ».

À la suite d'un accident mortel survenu en 1987, impliquant un avion Bellanca 8KCAB Decathlon durant une séance de voltige, l'autorité d'enquête de sécurité de l'Australie, ATSB, a mené en 1988 des recherches sur les taux d'apparition de G-LOC et les niveaux de facteurs de charge rencontrés par un pilote d'avion léger lors de figures classiques de voltige²³. L'objectif était de relier les données obtenues à partir de la recherche à d'autres données disponibles auprès des autorités militaires, afin d'évaluer la possibilité ou non qu'un pilote d'avion léger subisse un G-LOC en voltige. La conclusion de ces recherches est que le G-LOC sans symptôme avant-coureur qui pourrait l'alerter est une possibilité réelle dans de tels avions.

²³ [The possibility of G-induced loss of consciousness \(G-LOC\) during Aerobatics in a light aircraft.](#)

Le rapport de l'ATSB pointe cependant que de nombreux pilotes civils doutent du fait qu'une perte de conscience instantanée puisse survenir sans aucun avertissement. Ces pilotes affirment que l'individu ne subit en réalité qu'un voile gris ou un voile noir.

Des études internationales ont révélé que le phénomène peut apparaître chez des sujets sains ne présentant aucune pathologie, à des niveaux aussi bas que +2 à +3 g. Lors d'enquêtes dans la Royal Air Force, l'US NAVY et la Royal Australian Air Force, de nombreux cas de G-LOC ont été rapportés impliquant des aéronefs à faible performance. En France, le rapport de l'autorité militaire d'enquête de sécurité²⁴ sur un accident mortel d'un TB30 Epsilon²⁵ conclut à une incapacité subite en vol consécutive à une perte de conscience sous facteur de charge G-LOC.

En l'état actuel des connaissances, l'hypertension artérielle modérée et équilibrée par un traitement n'est pas une contre-indication pour la pratique de la voltige. Néanmoins, la prise de médicaments antihypertenseurs est susceptible de réduire l'adaptation cardiovasculaire et la tolérance au facteur de charge qui s'en trouve dégradée. De surcroît, aucune étude sur l'effet des accélérations n'a été réalisée chez des pilotes hypertendus traités.

2.9.2 Phénomènes associés à des manœuvres sous facteur de charge négatif

Les accélérations négatives -Gz sont rencontrées en voltige inversée. Les forces d'inertie résultantes sont dirigées du siège vers la tête. Il en découle que la répartition du volume sanguin se modifie dans le sens des membres inférieurs vers la tête. La pression artérielle augmente dans la tête et les yeux. À -3 g, les yeux semblent sortir des orbites et des céphalées violentes peuvent apparaître et persister après l'arrêt de l'accélération. Au-delà, peut apparaître et persister plusieurs heures un état de confusion mentale avec incoordination motrice. Une valeur de -4,5 g est une limite physiologique admise. La tolérance est de l'ordre de cinq secondes pour -4,5 g et de trente secondes environ pour -3 g. Un facteur de charge négatif soutenu plus de quelques secondes déclenche un ralentissement de la fréquence cardiaque qui réduit considérablement la tolérance à un facteur de charge positif dans la minute qui suit.

Les accélérations négatives -Gz sont moins bien supportées que les accélérations positives +Gz. Il n'existe pas de protection efficace contre les accélérations -Gz. La principale difficulté liée aux accélérations -Gz est celui de la dégradation induite de la tolérance aux accélérations +Gz. Cette situation est désignée par le terme « *push-pull effect* », ou « effet push-pull » en français aéronautique. Le voile noir et la perte de conscience peuvent ainsi apparaître à des valeurs de l'ordre de +2 à +3 g. D'après l'ouvrage du Dr H. Marotte²⁶, traitant en particulier des accélérations, des pertes de conscience ont été observées sous +2 g après une manœuvre de voltige inversée et ce phénomène semblerait être un réel problème dans l'aviation sportive.

Le BEA a publié un rapport sur un accident survenu à un Extra 200 lors d'une séance de voltige²⁷. Le pilote a perdu connaissance sous facteur de charge positif après des manœuvres sous facteur de charge négatif. Un enregistrement vidéo à l'intérieur du cockpit avait permis d'établir la perte de conscience du pilote au cours de la figure de voltige. Toutefois, les données disponibles n'étaient pas suffisantes pour déterminer les valeurs des facteurs de charge subis par le pilote au cours des manœuvres.

²⁴ Bureau enquêtes accidents pour la sécurité de l'aéronautique d'État (BEA-É) depuis 2018.

²⁵ [Accident du TB30 de la patrouille Cartouche Doré immatriculé F-SEVR survenu le 14 mars 2007 sur la base aérienne 709 de Cognac \(16\)](#).

²⁶ Op. cit., § 2.9.

²⁷ [Accident de l'avion Extra 200 immatriculé F-GZXV survenu le 15 août 2016 à Salon-Eyguières \(13\)](#).

2.10 Publications associées aux conséquences d'une exposition à des facteurs de charge négatifs et à celles de « l'effet push-pull »

La Circulaire d'information « *A Hazard in Aerobatics – Effects of G-Forces of pilots* »²⁸ publiée en 1984 par l'autorité des États-Unis en charge de l'Aviation civile (FAA) décrit, en particulier, les conséquences physiologiques associées aux facteurs de charge négatifs et traite de la tolérance aux variations rapides de facteurs de charge de négatifs à positifs. En outre, elle souligne que les effets du facteur de charge négatif sont globalement moins étudiés et moins connus.

Un article publié en janvier 2020 dans la revue « *Aerospace Medicine and Human Performance* »²⁹ explique que les risques associés à un vol acrobatique sous facteur de charge positif élevé, en particulier la perte de conscience induite par facteur de charge (G-LOC), sont bien connus. En revanche, les effets néfastes du vol sous facteur de charge positif succédant à des manœuvres sous facteur de charge négatif, désignés par « effet push-pull », le sont moins. L'article préconise que ces effets soient connus et soulignés lors de la formation et l'entraînement des pilotes à la voltige aérienne.

Le 30 mars 2020, la Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile (DSAC) a mis en ligne sur le Portail sécurité de l'Aviation légère, un article rédigé par le médecin aéronautique et cardiologue de la FFA à destination des pilotes de voltige pour les sensibiliser à la perte de conscience sous facteur de charge, ainsi qu'une affiche présentant les dix principes élémentaires visant à limiter la survenue du voile noir et plus particulièrement du G-LOC³⁰. Sur cette affiche, les risques liés à l'alternance d'une exposition à des facteurs de charge négatifs et positifs sont signalés.

2.11 Exigences médicales pour la pratique de la voltige

2.11.1 Hors cadre de compétition

En dehors des certificats médicaux de classe 1 et 2, il n'existe pas de critères médicaux d'aptitude applicables spécifiquement aux pilotes qui pratiquent la voltige hors cadre de compétition. Toutefois, à l'occasion d'une demande de prorogation ou de renouvellement de ces certificats, le médecin agréé peut vérifier si l'état de santé du pilote lui permet d'exécuter son activité en sécurité, en particulier de supporter les accélérations relatives à la pratique de la voltige. En cas de doute, une procédure de renvoi-concertation du médecin agréé vers l'autorité (Pôle médical de la DGAC) est faite systématiquement pour les détenteurs d'un certificat de classe 1 et 2.

Une limitation « voltige exclue » peut être alors prononcée par le Pôle Médical de la DGAC sur la base de particularités physiopathologiques cardiovasculaires et neurovégétatives³¹. Le médecin délivre ensuite le certificat médical, assorti le cas échéant d'une ou plusieurs limitations, en fonction de la décision du Pôle Médical de la DGAC. D'après le Pôle Médical, une hypertension artérielle traitée par bithérapie et équilibrée ne constitue pas un motif de concertation obligatoire. C'est pourquoi le cas du pilote n'a pas fait l'objet de concertation et une éventuelle limitation n'a pas été discutée.

²⁸ AC n° 91-61.

²⁹ M.M. Metzler, [G-LOC due to the Push-Pull Effect in a fatal F-16 mishap](#).

³⁰ [Dr. P.-H. Deschamps-Berger, G-Loc, les 10 commandements du doc.](#)

³¹ Parties du système nerveux qui assurent en particulier les fonctions vitales telles que la respiration, la circulation sanguine, la digestion, etc.

C'est le même médecin agréé qui a prorogé le certificat médical de classe 2 du pilote en 2018, 2019 et 2020. Il n'a pas été possible de récupérer le formulaire de demande renseigné par le pilote en 2020 et en 2018. Le pilote avait mentionné sur le formulaire de demande en 2019 son traitement contre l'hypertension artérielle. Le médecin indique avoir transmis le formulaire de demande de certificat médical et le rapport d'examen médical au Pôle Médical de la DGAC sans enclencher de procédure de renvoi du dossier pour recueillir un avis.

2.11.2 En compétition

En plus des certificats médicaux de classe 1 ou 2, un certificat de non contre-indication à la pratique de la voltige³² daté de moins d'un an est requis au titre de l'article L231-2-3 du Code du sport³³. Les exigences médicales applicables aux pilotes sont précisées par l'article A231-1 alinéa 7 du Code du sport³⁴ qui dispose que « pour les disciplines sportives comportant l'utilisation d'un aéronef, une attention particulière est portée sur :

- l'examen neurologique et de la santé mentale ;
- l'examen ophtalmologique (acuité visuelle, vision des couleurs) ;
- l'examen ORL (tympons, équilibration/perméabilité tubaire, acuité auditive, évaluation vestibulaire) ;
- l'examen de l'épaule pour les pratiquants du vol libre et du parachutisme ;
- l'examen du rachis pour les pilotes de planeur léger ultra motorisé de classe 1. »

Cet arrêté ne comprend aucune disposition relative aux fonctions cardiovasculaires ou à la régulation neurovégétative de ces fonctions.

2.11.3 Mesures applicables aux sportifs de haut niveau

Le protocole de surveillance médicale des sportifs listés et reconnus de haut niveau comporte, en particulier pour les pratiquants de la voltige un examen électrocardiographique et tous les quatre ans, une échographie cardiaque.

Cette évaluation cardiovasculaire n'est exigée que chez les sportifs de haut niveau alors que tous les pratiquants de voltige aérienne, quel que soit le cadre, sont exposés à des contraintes physiologiques insidieuses, principalement liées aux enchaînements (négatifs/positifs) qu'ils sont amenés à réaliser. Ces contraintes ne sont prises en compte ni dans la classe 2 ni dans la voltige de compétition hors cadre de haut niveau.

Cependant, ces examens cardiovasculaires permettent principalement de détecter des pathologies cardiovasculaires et ne permettent pas d'évaluer la résistance d'un sujet à la survenue des phénomènes A-LOC ou G-LOC, qui résultent de mécanismes purement physiologiques d'adaptation du système cardiovasculaire.

³² Tout médecin est habilité à remplir ce certificat après un examen médical.

³³ [Version en vigueur le jour de l'accident.](#)

³⁴ [Version en vigueur le jour de l'accident.](#)

3 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

Après cinq minutes et trente secondes au cours desquelles il a enchaîné plusieurs figures de voltige sous facteurs de charge, le pilote a effectué du vol dos durant environ dix secondes, puis est repassé en vol ventre. Durant cette manœuvre, le facteur de charge est passé de -1,9 g environ à +1,6 g en cinq secondes. La trajectoire de l'avion s'est ensuite incurvée brusquement vers le sol, sous l'effet d'une action à piquer sur la commande de profondeur. Le facteur de charge a diminué et a atteint -3,9 g. Cette trajectoire finale s'apparente à une manœuvre de passage par l'avant d'après les données enregistrées par l'accéléromètre. L'avion a poursuivi sa trajectoire verticale vers le sol jusqu'à la collision avec la surface du plan d'eau.

L'enquête n'a pas pu déterminer avec certitude si l'action aux commandes a été volontaire ou non.

Les hypothèses suivantes peuvent être envisagées pour expliquer la perte de contrôle par le pilote :

- la survenue d'une incapacité partielle ou totale résultant de l'enchaînement de figures sous facteurs de charge négatif et positif et se terminant par une prise de fort facteur de charge négatif. Cette incapacité a pu se manifester par une altération de conscience sous facteur de charge (A-LOC), une perte de conscience (G-LOC), un malaise consécutif à un problème cardiaque ou d'une autre nature, ou une désorientation spatiale. Le traitement médicamenteux que prenait le pilote pour soigner son hypertension artérielle a pu diminuer sa tolérance aux variations d'accélération ;
- la réalisation non maîtrisée d'une figure de voltige par le pilote ;
- la survenue d'un événement fortuit à bord pendant la réalisation de la figure après le passage de la verticale (objet mal attaché dans l'habitacle, action réflexe du passager par exemple) qui aurait pu perturber le pilote ;
- la survenue d'un dysfonctionnement technique, que l'enquête n'a pas permis d'écarter avec certitude.

Enseignements de sécurité

Dégradation de la tolérance aux facteurs de charge positifs

L'exposition préalable à des accélérations radiales négatives (-Gz) dégrade fortement la tolérance aux accélérations radiales positives (+Gz). En effet, l'exposition à une phase de vol avec pesanteur nulle ainsi que la voltige inversée (facteurs de charge négatifs) désadaptent la régulation du système cardiovasculaire. Le voile noir et la perte de conscience peuvent alors apparaître à des valeurs très basses de facteur de charge positif, de l'ordre de +2 g à +3 g. Cet effet est susceptible de perdurer pendant au moins deux heures après l'exposition. Ce phénomène semble insuffisamment connu de la part des pratiquants.

La survenue d'un trouble de la conscience sous facteur de charge est un danger inhérent à la pratique de la voltige. Les capacités de manœuvre des avions de voltige sont susceptibles d'exposer le pilote à des facteurs de charge qui dépassent les capacités d'adaptation du système cardiovasculaire du corps humain.

Effet des traitements antihypertenseurs

Les effets des troubles de la régulation de la pression artérielle sur la pratique de la voltige demeurent largement méconnus. Avec ou sans traitement antihypertenseur ou autre, tout pilote de voltige est susceptible de présenter un trouble de conscience sous facteur de charge.

Aucune prise d'un traitement antihypertenseur n'est anodine et ce traitement est susceptible de diminuer la tolérance aux accélérations +/-Gz. Les médecins agréés et les pilotes concernés sont invités à recueillir un avis spécialisé en cas de pratique de la voltige aérienne, discipline exigeante au regard des effets des accélérations sur le corps humain.

4 RECOMMANDATIONS DE SECURITE

4.1 Critères médicaux d'aptitude à la pratique de la voltige hors cadre de compétition

L'enquête a mis en évidence qu'il n'existe pas d'exigence médicale particulière pour définir des critères médicaux d'aptitude à la pratique de la voltige hors compétition. En revanche, il existe des caractéristiques physiologiques qui permettent au médecin évaluateur d'exclure la pratique de la voltige.

L'opération par laquelle on peut prononcer une limitation « voltige exclue » est conditionnée par le constat d'un écart à la norme et un renvoi à l'autorité, alors que les conditions physiologiques d'exclusion de la voltige peuvent exister sans écart à la norme. C'est pourquoi il conviendrait de rechercher expressément ces conditions physiologiques, au-delà de la norme du certificat médical de classe 2.

Le BEA recommande que :

- *considérant que rien au-delà de la classe 2 n'est exigible pour la pratique de la voltige hors compétition ;*
- *considérant que la voltige expose le pilote à des contraintes physiologiques qui dépassent celles de la vie courante et de l'aviation légère, quel que soit son niveau de pratique ;*
- *considérant que la pratique de la voltige présente de nombreux risques, en particulier cardiovasculaires, à prendre en compte par les médecins notamment au moment de délivrer le certificat médical d'aptitude de classe 2 ;*
- *considérant l'absence de critères médicaux identifiés permettant aux médecins de renvoyer le dossier d'un pilote vers l'autorité afin d'examiner une limitation éventuelle à la pratique de la voltige ;*
- *considérant l'absence d'obligation de détenir un certificat de non-contre-indication de la pratique de la voltige hors cadre de compétition :*

la DSAC, par l'intermédiaire de son Pôle Médical, sensibilise les médecins agréés aéronautique pour qu'ils puissent être en mesure de prodiguer des conseils adaptés à l'état de santé des pilotes pratiquant la voltige, et de leur prescrire le cas échéant une exploration médicale pour évaluer de la façon la plus complète leur capacité à supporter les contraintes physiologiques liées à la pratique de cette activité. [Recommandation FRAN-2023-011]

4.2 Conséquences de l'« effet push-pull » et risques associés au G-LOC

Le BEA recommande que :

- *considérant que la voltige expose le pilote à des contraintes physiologiques qui dépassent celles de la vie courante et de l'aviation légère en général, quel que soit son niveau de pratique ;*
- *considérant que l'enchaînement de manœuvres sous facteur de charge négatif précédant des manœuvres sous facteur de charge positif peut être réalisé dès la pratique de la voltige élémentaire ;*
- *considérant que les effets néfastes de ce type d'enchaînement de manœuvres sont insuffisamment connus ;*
- *considérant que la tolérance d'un pilote aux facteurs de charge peut être affectée par divers facteurs liés à sa condition physique et à son hygiène de vie ;*
- *considérant les conséquences potentiellement fatales d'une altération ou d'une perte de conscience en vol :*

*la FFA sensibilise les pilotes pratiquant la voltige sur la dangerosité de certaines évolutions qui peuvent amener aux limites physiologiques du corps humain.
[Recommandation FRAN-2023-012]*

Les enquêtes du BEA ont pour unique objectif l'amélioration de la sécurité aérienne et ne visent nullement à la détermination de fautes ou responsabilités.