

Bureau enquêtes accidents défense

RAPPORT PUBLIC D'ENQUETE TECHNIQUE

BEAD-A-2003-021-A



Date de l'événement : 19 septembre 2003

Lieu de l'événement : Sarraud (84)

Appareil :

– Type : **TUCANO**

– Immatriculation : **N°502**

Organisme : Armée de l'air

**Unité : DV 05.312
Salon de Provence**

AVERTISSEMENT

COMPOSITION DU RAPPORT

Les faits, utiles à la compréhension de l'événement, sont exposés dans le premier chapitre du rapport. Les causes de l'événement, identifiées dans le second chapitre, sont résumées dans la conclusion, objet du troisième chapitre. Enfin, dans le dernier chapitre, des propositions en matière de prévention sont présentées.

UTILISATION DU RAPPORT

L'objectif du rapport d'enquête technique est d'identifier les causes de l'événement et de formuler des recommandations de sécurité. En conséquence, l'utilisation exclusive de la deuxième partie de ce rapport et des suivantes à d'autres fins que la prévention pourrait conduire à des interprétations erronées.

TABLE DES MATIERES

<i>Avertissement</i> _____	2
<i>Table des matières</i> _____	3
<i>Glossaire</i> _____	6
<i>Synopsis</i> _____	8
1. Renseignements de base _____	10
1.1. Déroulement du vol _____	10
1.1.1. Mission _____	10
1.1.2. Déroulement _____	10
1.1.2.1. Préparation du vol _____	10
1.1.2.2. Description du vol et des éléments qui ont conduit à l'accident _____	11
1.1.3. Localisation _____	11
1.2. Tués et blessés _____	12
1.3. Dommages à l'aéronef _____	12
1.4. Autres dommages _____	12
1.5. Renseignements sur le personnel _____	12
1.5.1. Élève pilote _____	12
1.5.2. Autre personnel _____	14
1.5.2.1. Surveillant solo _____	14
1.6. Renseignements sur l'aéronef _____	14
1.6.1. Maintenance _____	14
1.6.2. Carburant _____	15
1.7. Conditions météorologiques _____	15
1.7.1. Nébulosité _____	15
1.7.2. Vent _____	15
1.8. Aides à la navigation _____	16
1.9. Télécommunications _____	16
1.10. Renseignements sur l'aérodrome _____	16
1.11. Enregistreurs de bord _____	16
1.12. Renseignements sur l'épave et sur l'impact _____	19
1.12.1. Situation d'ensemble _____	19
1.12.2. Examen de la zone du crash _____	20
1.12.3. Examen de la zone de l'épave _____	21

1.13. Renseignements médicaux et pathologiques _____	24
1.14. Incendie à bord _____	24
1.15. Survie des occupants _____	25
1.15.1. Abandon de bord _____	25
1.15.2. Organisation des secours _____	25
1.16. Essais et recherches _____	26
1.16.1. EPNER _____	26
1.16.2. IMASSA _____	26
1.17. Renseignements sur les organismes _____	26
1.18. Renseignements supplémentaires _____	26
1.18.1. Cours « facteurs humains » _____	26
1.18.2. Balise de détresse _____	27
1.19. Techniques d'enquête spécifiques _____	28
2. Analyse _____	29
2.1. Reconstitution de la trajectoire de l'avion _____	29
2.1.1. Analyse de la dernière figure partiellement effectuée _____	30
2.1.2. Analyse des trente dernières secondes avant l'impact au sol _____	31
2.1.3. Phases de vol _____	32
2.2. Causes d'origine environnementale _____	34
2.2.1. Cause météorologique _____	34
2.2.2. Cause liée au péril aviaire _____	34
2.2.3. Conclusion sur les causes d'origine environnementale _____	35
2.3. Causes d'origine technique _____	35
2.3.1. Pannes relevées sur l'enregistreur de vol _____	35
2.3.2. Autres pannes _____	36
2.3.3. Conclusion sur les causes d'origine technique _____	37
2.4. Causes humaines _____	37
2.4.1. Éléments spécifiques à l'élève pilote _____	40
2.4.2. Éléments techniques _____	42
2.4.2.1. Détecteurs de cycle respiratoire _____	42
2.4.2.2. Pilotage du TUCANO en voltige _____	43
2.4.3. Analyse du vol _____	43
2.4.4. Origines de la perte de conscience en vol _____	44
2.4.4.1. Effet « fatigue » _____	45
2.4.4.2. Effet « push pull » _____	47
2.4.4.3. Effets du stress _____	47
2.4.5. Conclusion sur les causes d'origine physiologique _____	48
2.4.6. Caractérisation de la perte de conscience _____	49

3. Conclusion	52
3.1. éléments utiles à la compréhension de l'événement	52
3.1.1. Éléments relatifs à l'élève pilote	52
3.1.2. Éléments relatifs à la mission	52
3.1.3. Éléments relatifs à l'avion	53
3.2. Mécanisme de l'accident	53
4. Recommandations de sécurité	54
4.1. Mesures de prévention ayant trait directement à l'événement	55
4.1.1. Formation des personnels navigants	55
4.1.1.1. Instruction aux manœuvres anti-G	55
4.1.1.2. Hygiène de vie	57
4.1.2. Les programmes de vol	57
4.1.3. Détecteurs de cycle respiratoire	59
4.2. Mesures de prévention n'ayant pas trait directement à l'événement	60
4.2.1. Préparation à l'éjection	60
4.2.2. Compensateur de profondeur	60
4.2.3. Enregistreur de paramètres	61
4.2.4. Équipements de vol	62
4.2.5. Recherches et secours	63
4.2.5.1. Moyens aériens	63
4.2.5.2. Balise de détresse	63
Annexes	65
1. Description des figures de voltige	66
2. Restitution de la trajectoire de l'avion	69
3. Analyse du programme réalisé en vol	72
4. Comparaison des figures exécutées dans le plan vertical	74
5. Effets du stress	77
6. Manœuvre de « G-warm up »	78
7. Instruction conduite dans les armées étrangères sur la tolérance au facteur de charge	81
8. Rôle du « surveillant solo »	82
9. Examen du siège éjectable	83
10. Systèmes d'alarmes	86
11. Fonctionnement de la balise de détresse	88

GLOSSAIRE

BA.....	Base aérienne
BEAD.....	Bureau enquêtes accidents défense
CCS.....	Centre de coordination et de sauvetage
CEAA.....	Commandement des écoles de l'armée de l'air
CEMPN.....	Centre d'expertise médicale du personnel navigant
CEV.....	Centre d'essais en vol
CODIS.....	Centre opérationnel départemental d'incendie et de secours
DV.....	Division des vols
EPAA.....	École de pilotage de l'armée de l'air
EPI.....	Enquêteur de première information
EPNER.....	École du personnel navigant d'essais et de réception
ESCA.....	Escadron des services de la circulation aérienne
EUROCAE.....	<i>European organisation for civil aviation equipment</i> (organisation européenne pour l'équipement de l'aviation civile)
FDR.....	<i>Flight data recorder</i> (enregistreur de vol)
FL.....	<i>Flight level</i> (niveau de vol)
Ft.....	Pied (300 Ft = 100 mètres environ)
Gz.....	Accélération sur l'axe vertical
G-LOC.....	<i>G-induced loss of consciousness</i> (Perte de conscience liée au facteur de charge)
hPa.....	Hectopascal

IMASSA.....Institut de médecine aérospatiale du service de santé des armées

Kt.....Nœuds (1Kt = 0.5144 m/s)

LAMAS.....Laboratoire de médecine aérospatiale

OPJ.....Officier de police judiciaire

Psi.....*Pound force per square inch*
(Livres par pouce carré : 1500 Psi = 104 bar environ)

RESEDA.....Centre de restitution des enregistreurs d'accidents

SAR.....*Search and rescue* (sauvetage et recherche)

SYNOPSIS

- Date de l'événement : le vendredi 19 septembre 2003 vers 07 heures 30¹
- Lieu de l'événement : Sarraud (84)
- Armée : armée de l'air
- Commandement : commandement des écoles de l'armée de l'air (CEAA)
- Aéronef : TUCANO
- Nature du vol : entraînement à la voltige
- Nombre de personnes à bord : 1

Résumé de l'événement

Le 19 septembre 2003, à 07 heures 02, un élève pilote en solo, en phase pré spécialisation chasse, décolle du terrain de Salon de Provence pour effectuer une mission d'entraînement à la voltige. Une trentaine de minutes plus tard, l'avion percute le sol.

L'élève pilote est tué, le TUCANO est détruit.

Enquête technique

- Président du groupe d'enquête technique : un officier enquêteur du Bureau enquêtes accidents Défense (BEAD), nommé enquêteur désigné.
- Composition du groupe d'enquête technique :
 - ⇒ un enquêteur du BEAD, adjoint à l'enquêteur désigné,
 - ⇒ un enquêteur de première information (EPI),
 - ⇒ un officier pilote ayant une expérience sur TUCANO,
 - ⇒ un officier mécanicien ayant une expérience sur TUCANO,
 - ⇒ un officier contrôleur,
 - ⇒ un médecin du personnel navigant,
 - ⇒ deux officiers parachutistes d'essais.

¹ Sauf précision contraire, les heures figurant dans ce rapport sont exprimées en temps universel coordonné (UTC). Il convient d'y ajouter deux heures pour obtenir l'heure légale en vigueur en France métropolitaine le jour de l'événement.

- Autres experts consultés :
 - ⇒ IMASSA²
 - ⇒ EPNER³

Enquête judiciaire

- Le Parquet de Carpentras s'est initialement saisi de l'affaire. Le dossier a ensuite été transféré au Parquet de Nîmes.
- Un officier de police judiciaire (OPJ) de la brigade de la gendarmerie de l'air d'Orange (84) a été commis.

Organisation de l'enquête

Le vendredi 19 septembre 2003 à 08 heures, le BEAD est alerté par la réception d'un message « FLASH » rendant compte du crash présumé d'un TUCANO.

L'état-major de l'armée de l'air notifie formellement au BEAD l'accident à 09 heures 39.

Le déclenchement d'une enquête conduite par un enquêteur du BEAD est confirmé par message à 11 heures 08.

Dans l'après-midi, l'EPI accompagné d'un médecin et d'un pilote sur TUCANO se rendent sur les lieux de l'accident.

L'enquêteur désigné, son adjoint et l'expert mécanicien arrivent, par voie aérienne militaire, sur le site de Salon de Provence vers 18 heures.

Le samedi 20 septembre au matin, le groupe d'enquête se rend sur le lieu du crash. Il est alors convenu, avec l'autorité judiciaire présente sur le site, que l'enregistreur d'accident, sous scellés, sera convoyé vers le centre RESEDA⁴ à Brétigny (91) le lendemain dimanche pour une exploitation dès le lundi matin.

Le samedi, en fin d'après midi, l'ensemble des débris est acheminé sur la Base aérienne 115 d'Orange (84). En fin de soirée, le représentant de l'autorité judiciaire, présent sur le site, informe l'enquêteur désigné que le convoyage de l'enregistreur d'accidents ne pourra pas être réalisé avant le lundi matin.

Le lundi 22 septembre, en fin d'après midi, l'enregistreur d'accident est dépouillé.

² Institut de médecine aérospatiale du service de santé des armées.

³ École du personnel navigant d'essais et de réception.

1. RENSEIGNEMENTS DE BASE

1.1. DEROULEMENT DU VOL

1.1.1. Mission

Indicatif mission	COYOTE 253
Type de vol	COM V⁵
Type de mission	Entraînement à la voltige
Dernier point de départ	Base aérienne 701 (BA 701) Salon de Provence
Heure de départ	07 heures 02
Point d'atterrissage prévu	BA 701 – Salon de Provence

1.1.2. Déroulement

1.1.2.1. Préparation du vol

Ce vol d'entraînement à la voltige a été programmé pour cet élève pilote la veille et est référencé « mission PV6 ». Le matin du vol, il a été briefé par un instructeur pilote nominativement désigné par le commandant d'escadrille. Pendant l'exécution du vol PV6, cet instructeur a assuré, en vol, la fonction de « *surveillant solo* » (annexe 8 *Rôle du « surveillant solo* », page 82).

⁴ Centre de restitution des enregistreurs d'accidents.

⁵ COM V = circulation aérienne militaire de type *Victor* (vol exécuté selon les règles de vol à vue).

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

Nota : la chronologie présentée ci-après résulte de l'exploitation de l'enregistrement des communications radio par la tour de contrôle de Salon de Provence.

À 07 heures 02, l'élève pilote décolle en piste 34 du terrain de Salon de Provence. À 07 heures 13, il informe le contrôleur de l'ESCA⁶ de Salon de Provence qu'il a rejoint l'axe de voltige qui lui a été assigné pour cette mission. Dix minutes plus tard, conformément à la réglementation⁷, le contrôleur chargé du suivi du vol solo effectue un check radio positif avec l'élève pilote. Vers 07 heures 30, le contrôleur constatant la disparition du plot radar effectue, en vain, un nouveau check radio. Il informe alors le « *surveillant solo* » qu'il n'a plus de contact ni radar ni radio avec l'élève pilote. Le « *surveillant solo* » se rend sur l'axe de voltige de l'élève pilote. À 07 heures 33, il rend compte qu'il voit une fumée au nord de cet axe et qu'il lui semble discerner une trace d'impact. À 07 heures 35 il confirme ces premières informations et demande le déclenchement des secours. Ces derniers arrivent sur zone vers 08 heures et constatent le décès de l'élève pilote.

1.1.3. Localisation

➤ Lieu :

⇒ pays : France

⇒ département : 84

⇒ commune : Sarraud

⇒ coordonnées géographiques :

▪ N 44°00'54''

▪ E 005°24'54''

⇒ altitude du lieu du crash : 1010 mètres

➤ Moment : jour

⁶ Escadron des services de la circulation aérienne.

⁷ Consignes permanentes d'utilisation terrain (CPUT), chapitre C.2.2.3 *Travail sur axes et secteurs*.

- Aéroport le plus proche au moment de l'événement : Orange à 26 Nm dans le 290° du lieu de l'événement.

1.2. TUES ET BLESSES

Blessures	Membres d'équipage	Passagers	Autres personnes
Mortelles	1		
Graves			
Légères / Aucunes			

1.3. DOMMAGES A L'AERONEF

Aéronef	Disparu	Détruit	Endommagé	Intègre
TUCANO N° 502		X		

1.4. AUTRES DOMMAGES

Des dégâts ont été occasionnés à des champs d'un propriétaire terrien et une partie boisée a été partiellement incendiée.

1.5. RENSEIGNEMENTS SUR LE PERSONNEL

1.5.1. Élève pilote

- Age : 24 ans
- Unité d'affectation : division des vols (DV) – BA 701 Salon de Provence
- Spécialité : élève pilote, en formation pré spécialisation chasse

➤ Heures de vol comme pilote :

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	Sur tous types	Sur TUCANO	Sur tous types	Sur TUCANO	Sur tous types	Sur TUCANO
Total	121h30	13h35	50h30	13h35	7h40	7h40
Dont nuit	8h10	/	6h55	/	/	/
Dont VSV⁸	17h30	1h15	4h25	1h15	1h15	1h15

➤ Activité aérienne sur TUCANO

Dans le tableau récapitulatif de l'activité aérienne de l'élève pilote, les vols surlignés en bleu ont été effectués en solo⁹.

Date	Nature du vol	Temps de vol	Heures de vol TUCANO	Observation
22 juillet 2003	P1	1 h 15	1 h 15	Transformation sur TUCANO
25 juillet 2003	P2	1 h 10	2 h 25	
28 juillet 2003	P3	1 h 10	3 h 35	
29 juillet 2003	P4	1 h 10	4 h 45	
30 juillet 2003	P5	0 h 50	5 h 35	
30 juillet 2003	P6S ¹	0 h 20	5 h 55	
3 septembre 2003	VSV1	1 h 15	7 h 10	Entraînement au vol sans visibilité
4 septembre 2003	PV1	1 h 15	8 h 25	Entraînement à la voltige
8 septembre 2003	PV 2	1 h 30	9 h 55	
12 septembre 2003	PV3S ²	1 h 00	10 h 55	
15 septembre 2003	PV4	1 h 25	12 h 20	
16 septembre 2003	PF9	1 h 25		Vol d'information
17 septembre 2003	PV5	1 h 15	13 h 35	Entraînement à la voltige
19 septembre 2003	PV6S			Accident
¹ Laché sur TUCANO				
² Laché voltige sur TUCANO				

Activité aérienne sur TUCANO

⁸ Vol sans visibilité.

⁹ L'école ayant été fermée pendant le mois d'août, aucune activité aérienne n'a été effectuée durant ce mois.

1.5.2. Autre personnel

1.5.2.1. Surveillant solo

L'instructeur, qui a assuré la fonction de « *surveillant solo* », possède la qualification de chef moniteur. Il a briefé l'élève pilote avant le vol et en a assuré sa surveillance lors du vol. Au moment de l'événement, il effectuait un vol au profit d'un autre élève pilote en double commande, sur un autre axe de voltige proche.

1.6. RENSEIGNEMENTS SUR L'AERONEF

- Armée : armée de l'air
- Commandement opérationnel d'appartenance : CEEA
- Base aérienne de stationnement : BA 701 – Salon de Provence
- Unité d'affectation : DV 15.300
- Type d'aéronef : TUCANO

⇒ configuration : lisse

	Type - série	Numéro	Heures de vol totales	Heures de vol depuis dernier entretien NTI ¹⁰ 2	Heures de vol depuis dernier entretien NTI 3
Cellule	EMB 312 F	502	1607 h 30	135 h 00	Pas de visite de ce niveau
Moteur	P & W PT6 A25C	26354	2066 h 55	135 h 00	

1.6.1. Maintenance

L'examen de la documentation technique témoigne :

- d'un entretien conforme aux programmes de maintenance, en particulier sur le circuit d'oxygène,
- d'une visite journalière réalisée avant ce vol qui était le premier de la journée,

¹⁰ Niveau technique d'intervention de niveau.

- de la modification des poignées d'éjection des sièges de type MK8 avant et arrière¹¹ le 14 août 2003 conformément au programme de modification,
- d'un plein à 1500 psi¹² du circuit d'oxygène, ce qui correspond à la pression normale,
- de la non application de la modification S 013 sur le circuit oxygène¹³. Celle-ci devait être réalisée lors du passage au NTI 3¹⁴ du TUCANO n° 502.

1.6.2. Carburant

- Type de carburant utilisé : F34
- Quantité de carburant au décollage : 1140 livres

1.7. CONDITIONS METEOROLOGIQUES

Les conditions sont anticycloniques.

1.7.1. Nébulosité

Les observations des stations météorologiques d'Orange et de Salon de Provence font état d'un ciel clair. Les pilotes en vol au moment de l'accident confirment l'absence de toute nébulosité.

1.7.2. Vent

Le vent est faible. La station météorologique d'Orange donne les prévisions suivantes :

Niveau	Prévision pour 06 h 00		Prévision pour 09 h 00	
	Direction	Vitesse	Direction	Vitesse
FL ¹⁵ 030	140°	5 kt	130°	10 kt
FL 130	080°	10 kt	090°	15 kt

¹¹ Modification S 016.

¹² *Pound force per square inch* (livres par pouce carré avec 1500 psi correspondant à environ 104 bar)

¹³ Cette modification a pour objet d'abaisser le seuil de détection du détecteur de débit d'oxygène de 10 hPa à 5 hPa

¹⁴ Troisième niveau technique d'intervention.

¹⁵ *Flight level* (niveau de vol)

1.8. AIDES A LA NAVIGATION

Une dizaine de minutes avant l'accident, lors du contact radio entre le contrôleur de l'ESCA de Salon de Provence et l'élève pilote, ce dernier n'a signalé aucune difficulté concernant la tenue de son axe de voltige¹⁶. De plus, le contrôleur détecte effectivement l'avion sur l'axe qui a été attribué à l'élève pilote.

1.9. TELECOMMUNICATIONS

Tous les messages radio devant être transmis l'ont été.

Au moment de l'accident, l'élève pilote était sur une fréquence radio commune au contrôleur de Salon de Provence et au pilote « *surveillant solo* » qui était en vol.

1.10. RENSEIGNEMENTS SUR L'AERODROME

Sans objet.

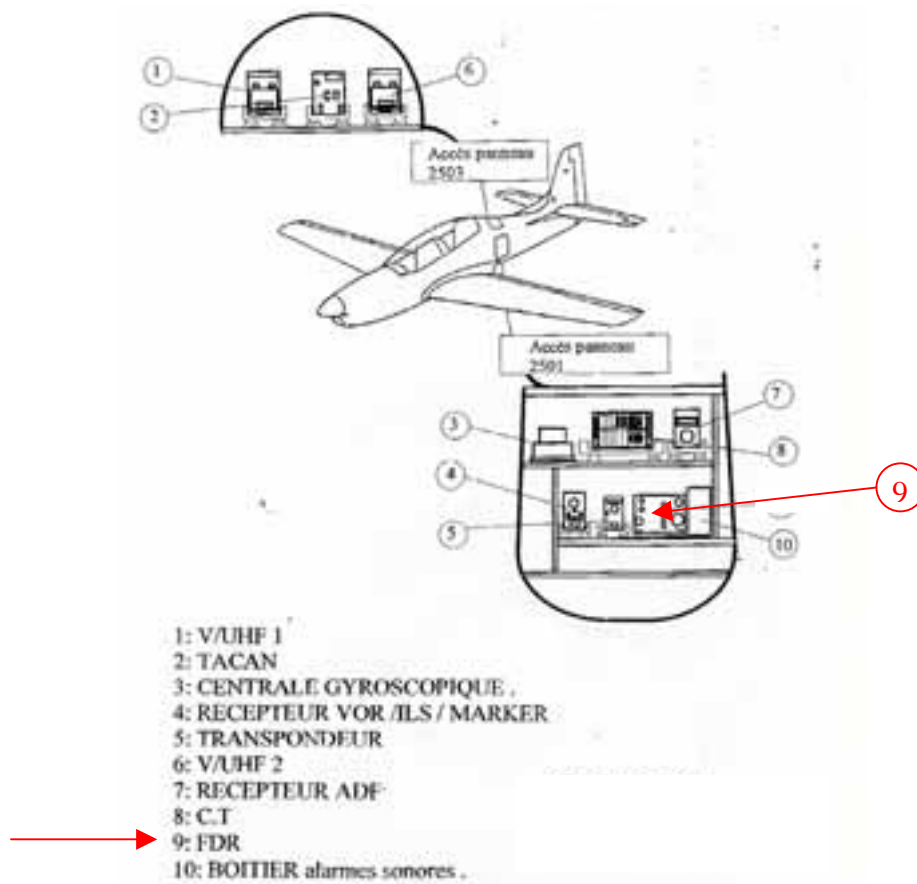
1.11. ENREGISTREURS DE BORD

Le TUCANO est équipé d'un enregistreur de paramètres de vol (FDR¹⁷), de type AF 250056, produit par la Société de fabrication d'instruments et de mesure (SFIM). Il a été développé pour équiper le TUCANO.

Le FDR garde en mémoire les paramètres des 80 dernières minutes de vol. Il est situé dans le compartiment électronique devant la soute à bagages.

¹⁶ L'écoute de la bande radio montre que la voix de l'élève est posée et calme.

¹⁷ *Flight data recorder*



Localisation de l'enregistreur de paramètres de vol

Les cycles d'enregistrement sont de 1 seconde et le FDR permet de sauvegarder :

- des paramètres identificateurs du cycle,
- des paramètres aérodynamiques,
- des paramètres moteur,
- des paramètres d'alarmes.

Paramètres	Type de paramètres	Étendue de mesure	Résolution	Source
Temps	Paramètre identificateur du cycle	4h30	1 s	Interne enregistreur
Numéro de vol		16 vols		
Mot de synchro				
Mot bite				
Vitesse indiquée	Paramètres aérodynamiques	0 à 300 kt	0,2 mb	Tube pitot gauche
Altitude pression		-1000 ft à +65.000 ft	0,25 mb	Prise statique haute gauche et basse droite
Température extérieure		-70°C à +70°C	0,7°C	Indicateur
Accélération verticale		- 4g à +8g	0,012 g	Accéléromètre sur le plancher derrière le siège avant
Assiette longitudinale		- 71° à + 101°	0,7°	Horizon secours avant
Assiette latérale		- 170° à + 170°	0,7°	Horizon secours avant
Cap		360°	0,7°	Centrale de cap
Couple moteur	Paramètres moteur	0 à 2200 lb/ft	2,7 lb	Indicateur de couple arrière
Régime moteur (Ng)		0 à 110%		Circuit Ng
Régime hélice (Nh)		0 à 110%		Circuit Nh
Température turbine (T5)		100°C à 1200°C	5°C	Indicateur avant
Position manette		Réduit – coupé – reverse		Manette avant : coupé et réduit Manette arrière : reverse
Alarme feu moteur	Paramètres d'alarmes			Circuit voyants FIRE
Alarme pression oxygène				Circuit voyants OXYG PRESS
Voyants train d'atterrissage				Circuit des voyants

Grille des paramètres du FDR

On peut noter, plus spécifiquement, les limitations suivantes :

- le dérapage n'est pas enregistré,
- les informations d'assiettes longitudinale et latérale sont issues de l'horizon de secours, gyroscopique. Elles sont donc entachées d'erreur lorsque l'avion évolue en voltige,

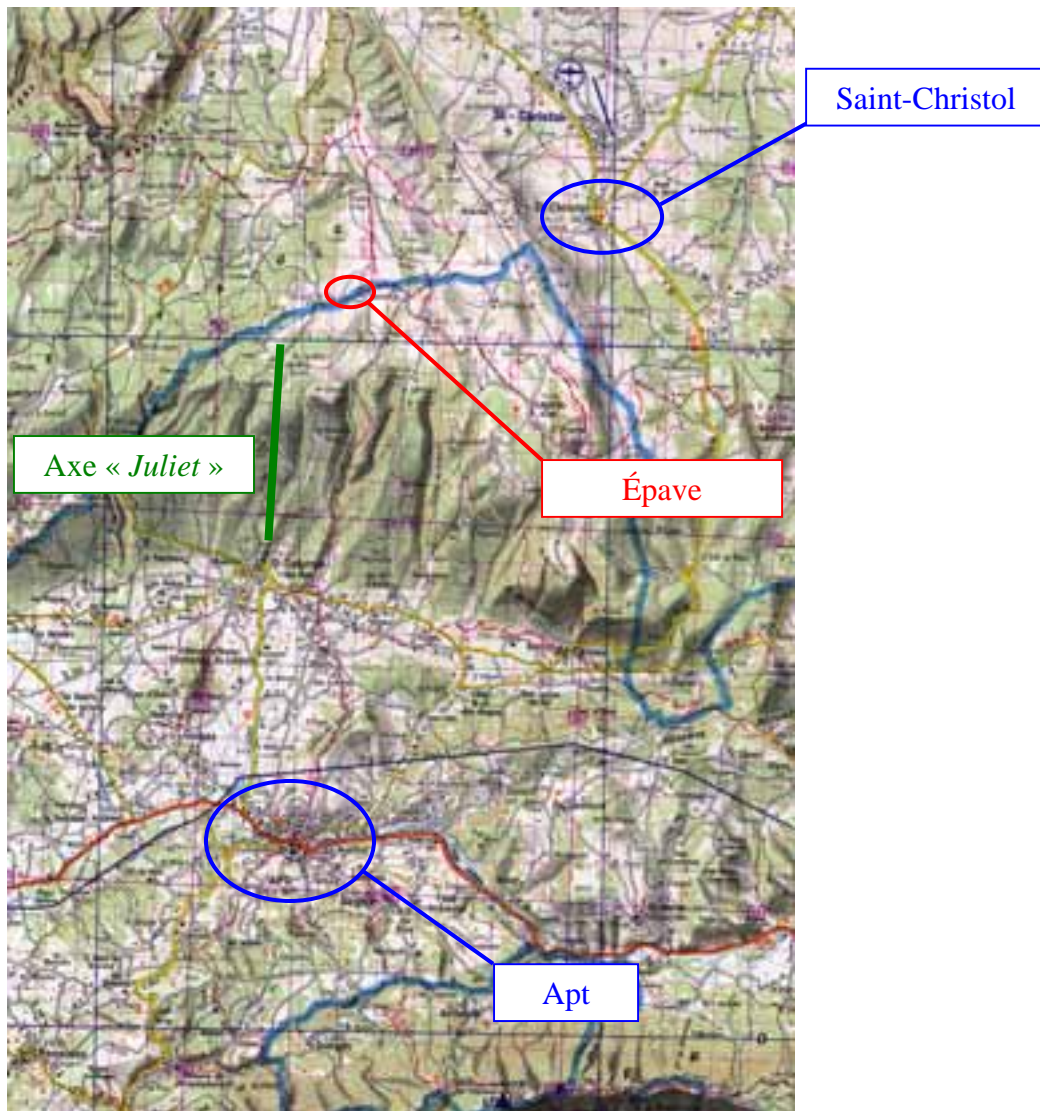
- la limitation de l'enregistrement de la vitesse à 300 kt,
- l'enregistrement non continu de la position de la manette des gaz,
- l'absence de l'enregistrement des pannes hormis les alarmes oxygène et feu moteur.

1.12. RENSEIGNEMENTS SUR L'ÉPAVE ET SUR L'IMPACT

1.12.1. Situation d'ensemble

L'axe de travail attribué à l'élève pilote pour la mission était l'axe « *Juliet* », orienté nord / sud, au nord de la ville d'Apt.

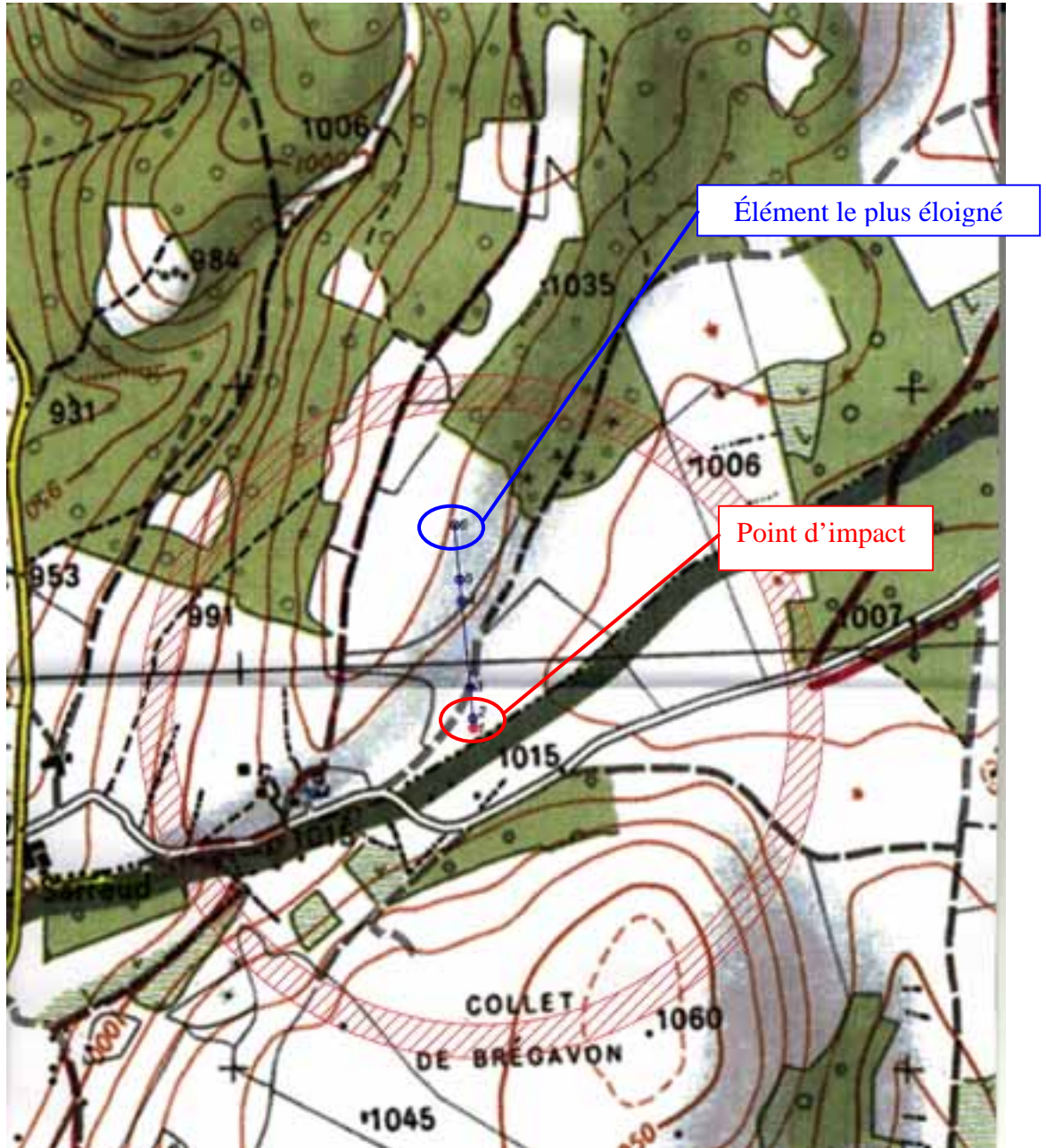
L'épave a été retrouvée sur le plateau de Vaucluse, sur le flanc nord d'une vallée menant à Saint-Christol.



Situation d'ensemble

1.12.2. Examen de la zone du crash

La zone de l'épave se situe à flanc de colline. Les débris se répartissent sur une zone de 300 mètres de longueur avec un dénivelé de 20 mètres entre le point d'impact initial et l'élément de l'épave le plus éloigné.



Zone de l'épave



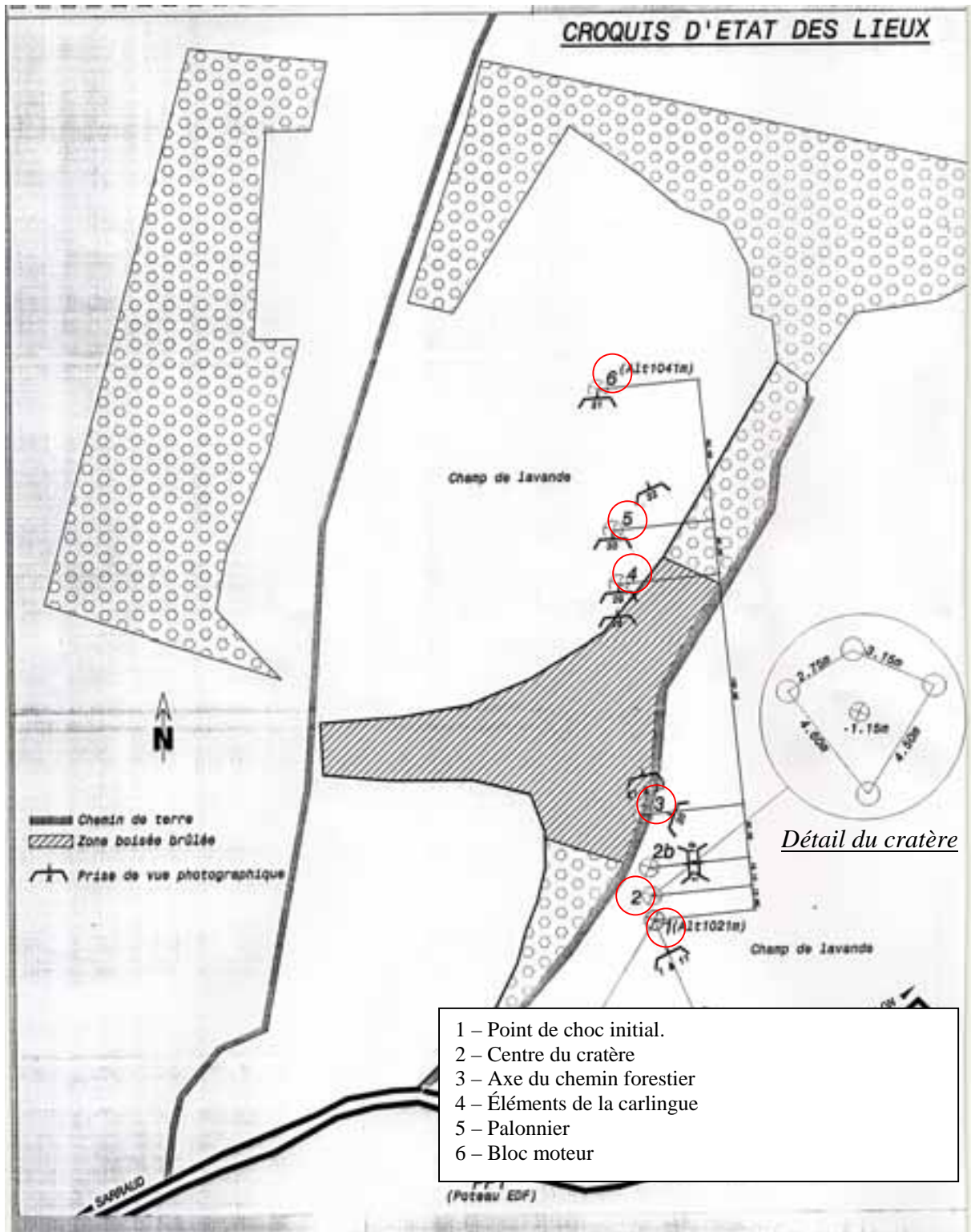
Photo de la zone de l'épave

Par rapport au cap du crash passant par le point d'impact initial, les débris se situent principalement du côté droit de cet axe.

1.12.3. Examen de la zone de l'épave

L'avion s'est écrasé dans un champ de lavande en contrebas d'une colline. Des débris sont retrouvés au nord de ce point dans une partie boisée et dans un second champ de lavande.

On relève en premier, dans le sens de la trajectoire suivie par l'avion, un impact peu profond correspondant au *saumon* d'une aile. Juste après, on note la présence du *strobe* de bout d'aile gauche. Puis, une dizaine de mètres plus loin, un cratère d'un peu plus d'un mètre de profondeur a été formé par l'impact de l'avion.



Plan détaillé de la zone de l'épave

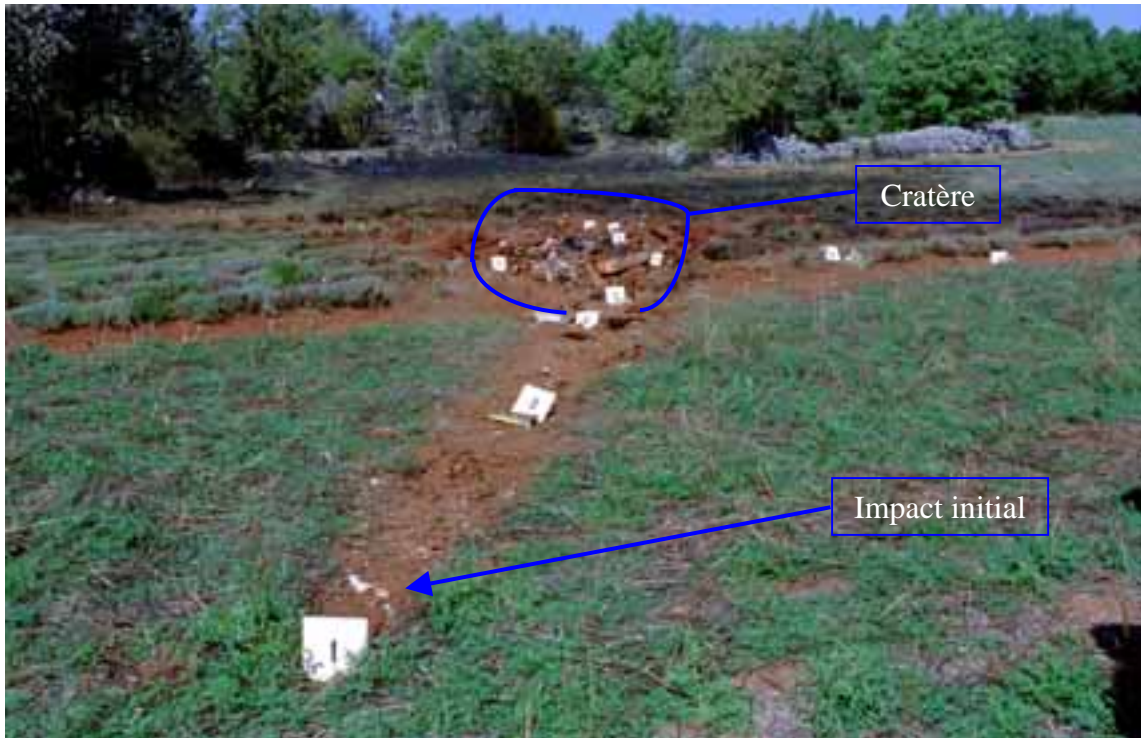


Photo de la zone d'impact initial

La présence d'éléments internes à la cabine de pilotage dans le cratère indique que l'avion a été désintégré lors de cet impact. Dans ce cratère, ainsi que dans son prolongement immédiat, on retrouve essentiellement des éléments implantés du côté gauche de l'aéronef.



Photo, du deuxième champ de lavande, en haut du dénivelé, prise depuis la sortie de la partie boisée

1.13. RENSEIGNEMENTS MEDICAUX ET PATHOLOGIQUES

- Dernière expertise du personnel navigant :
 - ⇒ type : visite systématique à l'unité (VSU)
 - ⇒ date : 31 juillet 2003
 - ⇒ résultat : apte
- Examen médical au CEMPN¹⁸ de Bordeaux :
 - ⇒ date : 10 janvier 2003
 - ⇒ validité : 1 an
- Examens biologiques : non réalisables compte tenu de l'état du corps de la victime.

1.14. INCENDIE A BORD

Néant.

¹⁸ Centre d'expertise médicale du personnel navigant

1.15. SURVIE DES OCCUPANTS

1.15.1. Abandon de bord

Le TUCANO est équipé de deux sièges éjectables de type MK BR 8 CL1.

Les constatations effectuées sur le siège de l'élève pilote permettent d'affirmer qu'il n'y a pas eu d'initialisation de la chaîne pyrotechnique (annexe 9 *Examen du siège éjectable*, page 83).

1.15.2. Organisation des secours

La restitution du déroulement du déclenchement de l'alerte a été réalisée d'après l'écoute des enregistrements des communications radio et téléphoniques de l'ESCA de Salon de Provence.

Vers 07 h 30, le contrôleur en poste à Salon de Provence constate, sur sa console radar, la disparition des plots primaires et secondaires correspondant à l'avion de l'élève pilote.

- 07 h 30 mn 43 : par quatre fois il tente, sans succès, d'établir le contact radio avec l'élève pilote,
- 07 h 31 mn 56 : le « *surveillant solo* » tente, sans succès, d'établir à son tour le contact radio avec l'élève pilote. Il décide alors de se rendre sur l'axe attribué à l'élève pilote,
- 07 h 33 mn 00 : le « *surveillant solo* » annonce qu'il voit de la fumée au nord de l'axe, un impact au sol et qu'il ne distingue pas d'épave,
- 07 h 33 mn 40 : le CCS¹⁹ est prévenu téléphoniquement par l'ESCA de Salon de Provence. Simultanément, les secours de la BA 701 sont mis en alerte,
- 07 h 35 mn 40 : le « *surveillant solo* » confirme la présence d'un feu et d'un impact au sol au nord de l'axe. Il demande le déclenchement des secours,
- 07 h 36 mn 05 : le CCS confirme qu'il a activé les secours,
- 08 h 05 mn 00 : l'hélicoptère du SAMU d'Avignon se pose sur la zone du crash,

- 08 h 09 mn 00 : l'hélicoptère SAR²⁰ en provenance d'Istres se pose sur la zone du crash,
- 08 h 20 mn 00 : le décès de l'élève pilote est constaté.

1.16. ESSAIS ET RECHERCHES

1.16.1. EPNER

L'exploitation des paramètres de vol stockés sur l'enregistreur d'accident a nécessité un traitement particulier pour pouvoir restituer, au plus près, la trajectoire de l'avion. L'EPNER a été chargé de ce travail d'analyse (annexe 2 *Restitution de la trajectoire de l'avion*, page 69).

1.16.2. IMASSA

Il a été demandé à l'IMASSA de formuler un avis sur les conséquences physiologiques des facteurs de charge en mission « manoeuvrante ».

1.17. RENSEIGNEMENTS SUR LES ORGANISMES

Néant

1.18. RENSEIGNEMENTS SUPPLEMENTAIRES

1.18.1. Cours « facteurs humains »

La prise en compte de l'instruction des pilotes de chasse, relative aux moyens et méthodes à mettre en œuvre pour améliorer leur tolérance au facteur de charge, est envisagée pendant leur cycle de formation au sein du CEAA. Aucune formation complémentaire n'est prévue au sein de la Force aérienne de combat (FAC).

Cette formation spécifique s'inscrit dans le cadre des cours « facteurs humains ».

¹⁹ Centre de coordination et de sauvetage.

²⁰ *Search and rescue* (recherche et sauvetage)

Elle se répartit tout au long des différentes étapes du cursus de formation :

- au début de la sélection en vol au CFIP²¹ (Cognac) pour les OSC²² ou pendant la formation militaire initiale à Salon de Provence pour les élèves de l'École de l'air et de l'École militaire de l'air,
- pendant la formation théorique de base à Salon de Provence, avant le début des vols sur Epsilon,
- au cours du tronc commun correspondant au pilotage de base sur Epsilon (Cognac),
- pendant la formation spécialisée à Cazaux pour les pilotes de chasse et à Avord pour les pilotes de transport.

Une formation psychopédagogique au profit des futurs instructeurs du CEAA est assurée au CFIP.

Cette formation au facteur humain qui étudie de façon précise les effets physiologiques liés aux accélérations verticales (Gz) n'envisage pas de façon suffisamment formelle les moyens et les méthodes pour y faire face (manœuvres musculo-ventilatoires). De plus, certains cours devant être dispensés par des médecins sur les bases aériennes ne sont pas systématiquement assurés.

1.18.2. Balise de détresse

La balise de détresse (annexe 11 *Fonctionnement de la balise de détresse*, page 88) est trouvée dans le deuxième champ de lavande. Les piles et l'antenne sont désolidarisées du boîtier.

Cette balise, de type DMELT8.1, a été fabriquée par la société DORNE-MARGOLIN (numéro de série 21358E).

Aucun signal de détresse n'a été capté ni par un aéronef ni par un service de contrôle.

²¹ Centre de formation des instructeurs pilotes

²² Officier sous contrat

1.19. TECHNIQUES D'ENQUETE SPECIFIQUES

La restitution de la trajectoire de l'aéronef a été réalisée au sein de l'EPNER par l'emploi d'un logiciel spécifique²³.

²³ Logiciel « *Fourmi* »

2. ANALYSE

Après une présentation des résultats de l'étude effectuée par l'EPNER permettant de reconstituer la trajectoire de l'avion, l'accident sera analysé en envisageant successivement les domaines environnemental, technique et humain.

2.1. RECONSTITUTION DE LA TRAJECTOIRE DE L'AVION

La reconstitution de la trajectoire de l'avion effectuée par l'EPNER a été validée en la confrontant au relevé ARISTOTE (Archivage restitution des informations STRIDA²⁴ opérationnelles et techniques).

En prenant comme origine de temps le début de la première figure réalisée sur l'axe de voltige (annexe 1 *Description des figures de voltige*, page 66), la chronologie des manœuvres effectuées est présentée ci-après.

Temps mn : s	Manoeuvre effectuée
0 : 00	Virage serré max
0 : 33	Retournement
1 : 32	Baquet
1 : 55	Demi tour
2 : 32	Tonneau
3 : 17	Tonneau barriqué
3 : 40	Oreille

²⁴ Système de traitement et de représentation des informations de la défense aérienne.

Temps mn : s	Manoeuvre effectuée
4 : 12	Boucle
4 : 41	Reprise d'altitude
7 : 02	Prise d'axe
7 : 26	Retournement
7 : 54	Boucle
8 : 19	Demi huit cubain ²⁵

Chronologie des figures exécutées

2.1.1. Analyse de la dernière figure partiellement effectuée

La dernière figure initiée dans le plan vertical serait un demi huit cubain. Cette figure peut être comparée, jusqu'au point haut, aux deux retournements et aux deux boucles réalisés précédemment (annexe 4 *Comparaison des figures exécutées dans le plan vertical*, page 74).

Plus spécifiquement, cette comparaison montre que :

- contrairement aux figures effectuées auparavant, la vitesse au départ du demi huit cubain n'est pas conforme aux prescriptions,
- l'accélération verticale au départ du demi huit cubain est inférieure à celle prise pour les autres figures,
- le demi huit cubain est réalisé de façon moins dynamique que les autres figures dans le plan vertical,

²⁵ Les deux figures précédentes étant enchaînées à cette dernière on peut penser que l'élève pilote réalisait un « enchaînement », auquel cas cette figure serait effectivement un demi huit cubain.

- Par rapport à la boucle qui précède :
 - ⇒ les variations d'incidence et de position de la commande de profondeur sont similaires,
 - ⇒ juste avant l'apogée, lors de la boucle l'action sur la commande de profondeur est maintenue (incidence conservée), alors que pour le demi huit cubain, l'incidence décroît rapidement, la profondeur semblant revenir à sa position trimée²⁶ (effort nul).

On relève également que :

- les vitesses de l'aéronef à la verticale ascendante et à l'apogée sont inférieures d'une quarantaine de nœuds aux vitesses de consigne,
- l'effort au manche serait constant dans la partie ascendante du demi huit cubain.

2.1.2. Analyse des trente dernières secondes avant l'impact au sol

A l'apogée du demi huit cubain, l'avion abat sur le dos. À cet instant le facteur de charge est négatif.

Dans un premier temps la descente accélérée se produit avec une incidence faible et constante. L'avion reste en vol dos jusque vers 100 kt, avec une assiette à piquer d'une cinquantaine de degrés. Dans un second temps l'avion amorce un tonneau qui se déroule lentement.

Vers 8000 ft / sol, l'avion est sur la tranche avec une vitesse de 250 kt, une vitesse verticale de 30.000 ft/mn et une assiette à 65° en piqué. Le facteur de charge est de 1Gz.

Vers 6000 ft / sol, la vitesse verticale est maximale (35.000 ft/mn). L'avion amorce une ressource lente²⁷, les ailes revenant à l'horizontale.

A 4500 ft / sol, le capteur de vitesse atteint sa butée de mesure, et reste par la suite figé sur cette butée.

²⁶ Les élèves pilotes compensent leur avion à 200 kt et ne modifient pas ce réglage pendant toute la durée du travail en voltige.

²⁷ Cette ressource s'effectue sans action sur le manche de pilotage. Elle est liée aux effets aérodynamiques et à l'action de la compensation.

Nota : dans ce qui suit, l'estimation de la vitesse est réalisée à partir de la pente et de la vitesse verticale. La vitesse verticale est déduite de la variation d'altitude et de la température air. La pente est déduite de l'assiette et de l'incidence.

Vers 2500 ft / sol, la vitesse atteindrait un maximum de 375 kt, l'incidence et le facteur de charge continuant de croître. On observe alors des oscillations en roulis qui s'expliquent par le dépassement de la VNE²⁸.

Vers 2000 ft / sol le facteur de charge est de 4 Gz. La vitesse de l'avion ainsi que la vitesse verticale diminuent fortement, l'accélération horizontale peut être estimée à - 1 Gz et le mach calculé en bout de pale de l'hélice est de 0.98²⁹.

A 1500 ft / sol, l'avion est en vol trois quart dos³⁰. La vitesse et le taux de descente croissent à nouveau. Juste avant l'impact, le facteur de charge atteint sa valeur maximale, 5 Gz. La vitesse est estimée à 340 kt et la vitesse verticale à 25.000 ft/mn.

2.1.3. Phases de vol

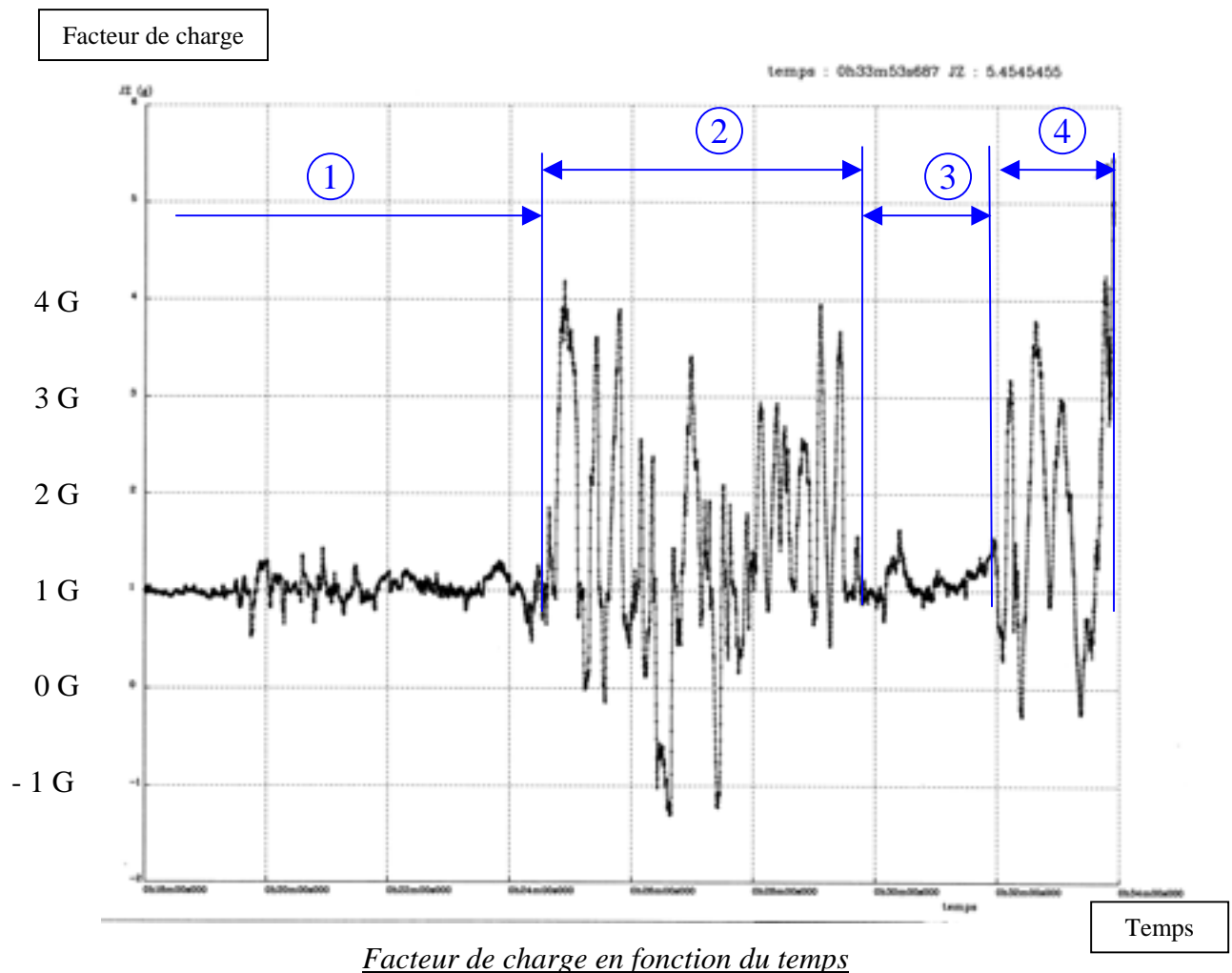
La courbe représentant l'évolution du facteur de charge en fonction du temps permet de découper le vol en quatre phases selon les valeurs atteintes du facteur de charge et de sa rapidité d'évolution.

Nota : la courbe présentée ci-dessous ne reprend que les vingt dernières minutes de vol.

²⁸ *Velocity never exceed* (vitesse à ne pas dépasser)

²⁹ Un témoin a entendu une très forte détonation lorsqu'il a été survolé par l'avion quelques secondes avant le crash. Elle pourrait correspondre à l'onde de choc due à la vitesse, proche du Mach, atteinte aux extrémités des pales.

³⁰ Un autre témoin relate qu'il a vu l'avion avec cette attitude en vol.



Ce découpage permet de mettre en évidence les contraintes physiques subies par l'élève pilote, engendrées par le facteur de charge.

- Première phase : elle débute au décollage et se termine au début de travail sur l'axe de voltige. Elle dure une quinzaine de minutes et n'engendre pas de contrainte particulière.
- Deuxième phase : elle correspond aux cinq premières minutes de voltige. Les figures sont réalisées de façon soutenue, sans pause, les demi tours en bout d'axe étant eux-mêmes effectués avec des facteurs de charge pouvant atteindre + 3,4 Gz. Cette phase peut être qualifiée de contraignante voire d'éprouvante.

- Troisième phase : d'une durée d'environ deux minutes pendant lesquelles l'élève pilote, tout en restant à proximité de son axe de travail, reprend de l'altitude en prévision de la phase suivante. Ce temps peut être considéré comme un temps de récupération partielle³¹.
- Quatrième phase : elle correspond au début de la réalisation d'un « enchaînement », à nouveau générateur de contraintes, et se termine par l'accident.

Ces contraintes sont de nature à engendrer, le cas échéant, une certaine fatigue physique.

2.2. CAUSES D'ORIGINE ENVIRONNEMENTALE

2.2.1. Cause météorologique

Les observations des stations météorologiques proches du secteur de travail (Orange, Salon de Provence et Carpentras) et les témoignages des pilotes en vol dans le même secteur au moment de l'accident s'accordent pour affirmer que les conditions météorologiques étaient favorables à l'exécution du vol de voltige PV6S. Plus précisément, l'horizon était marqué et il n'y avait pas de couche nuageuse. La météorologie du moment n'était donc pas une source de désorientation spatiale suite à une perte de référence d'horizontalité.

2.2.2. Cause liée au péril aviaire

L'exploitation de l'enregistreur d'accident ne montre aucune altération des paramètres moteur ce qui permet d'écarter, entre autres, l'hypothèse de l'ingestion d'un volatile.

De plus, l'analyse de la trajectoire de l'avion n'indique aucune variation brusque d'un quelconque paramètre de vol qui pourrait rendre compte d'une collision volatile sur un organe de pilotage de l'avion. Enfin, aucune annonce n'a été faite par l'élève pilote.

³¹ Le faible temps accordé à cette phase ne permettait pas à l'élève de récupérer totalement de la fatigue accumulée pendant la phase précédente.

Or, tous les témoignages (instructeurs pilotes et élèves) s'accordent à dire qu'un tel événement aurait fait, sans nul doute, l'objet d'une annonce radio.

Ces éléments permettent d'écarter une cause de l'accident liée au péril aviaire.

2.2.3. Conclusion sur les causes d'origine environnementale

Les différents éléments disponibles permettent de conclure à l'absence de toute cause d'origine environnementale à l'accident.

L'hypothèse qu'une cause d'origine environnementale (météorologie, péril aviaire) ait pu contribuer à l'accident est REJETÉE.

2.3. CAUSES D'ORIGINE TECHNIQUE

2.3.1. Pannes relevées sur l'enregistreur de vol

L'enregistreur de vol ne permet de restituer que l'état de deux voyants de panne, l'alarme « feu moteur » et l'alarme « pression oxygène ».

S'agissant de la première, aucune activation n'a été enregistrée permettant de conclure à l'absence d'un feu moteur avant l'impact au sol.

En revanche, environ 25 secondes avant le crash et alors que l'avion est en vol dos en commençant à piquer vers le sol, l'alarme « pression oxygène » a été activée et ce, jusqu'au crash. Cette signalisation, qui est doublée d'un signal sonore, intervient dans les cas suivants :

- défaut de pression d'oxygène :
 - ⇒ pression inférieure à 210 psi (14,5 bars) dans une bouteille d'oxygène,
 - ⇒ pression inférieure à 50 psi (3,45 bars) dans la tuyauterie de distribution vers les régulateurs.
- défaut de débit au niveau d'un des deux détecteurs de cycle respiratoire, avec une temporisation de 22 ± 3 secondes :
 - ⇒ détection d'un débit nul,
 - ⇒ détection d'un débit continu.

Cette alarme ne s'active qu'en cas de dysfonctionnement. Elle est inhibée lors de la sélection de EMERGENCY³² sur le boîtier de commande du régulateur d'oxygène, ce qui a pour effet de forcer un débit continu d'oxygène pur.

Si un dysfonctionnement technique avait été à l'origine d'un défaut de pression ou de débit, il aurait pu entraîner une incapacité de l'élève pilote, avec toutefois un délai vraisemblable puisqu'il évoluait à une altitude inférieure à 15.000 ft (altitude pour laquelle l'apport en oxygène n'est pas indispensable).

Dans ce cas, on aurait vraisemblablement observé une réaction aux commandes afin de positionner l'avion dans une configuration de vol stabilisé, permettant à l'élève pilote d'annoncer et de résoudre la panne. Or, on n'observe aucune modification notable de la trajectoire de l'avion à partir du moment où cette alarme se déclenche et aucune annonce radio en ce sens n'a pas non plus été faite. Plus spécifiquement, le voyant « *WARNING* » n'a pas été réarmé ce qui aurait eu pour effet immédiat de faire cesser l'alarme sonore (annexe 10 *Systèmes d'alarmes*, page 86) qui représente une gêne auditive certaine.

Il semble donc que l'alarme « pression oxygène », de par sa non prise en compte par l'élève pilote, ne serait pas consécutive à un dysfonctionnement d'origine technique sur ce circuit. Il est ainsi probable que l'allumage de cette alarme soit la conséquence d'une insuffisance respiratoire de l'élève (voir paragraphe 2.4 *Causes humaines*).

2.3.2. Autres pannes

La perte d'altitude de plus de 11.000 pieds en à peine plus de 30 secondes pourrait être la conséquence d'un problème mécanique majeur :

- perte en vol d'un élément de commande de vol : cette hypothèse est rejetée, tous les éléments de commande de vol ont été retrouvés sur la zone du crash et, de plus, la restitution, par l'EPNER, de la trajectographie de l'avion jusqu'au crash prouve que l'avion était intègre,

³² Cette position est notamment requise quand le pilote éprouve une gêne respiratoire.

- arrêt du moteur : cette hypothèse est rejetée, les paramètres moteur relevés sur l'enregistreur de vol témoignent qu'il était en fonctionnement au moment de la collision et qu'il n'a fait l'objet d'aucun dysfonctionnement préalable,
- blocage de la gouverne de profondeur : ce cas avait été rencontré lors d'un vol de réception par le CEV³³ où une tresse de métallisation était venu bloquer la commande de profondeur. La mesure préventive qui avait alors été retenue, couper cette tresse de métallisation sur l'ensemble des TUCANO, a été appliquée sur le TUCANO n° 502. De plus, l'étude de la restitution de la trajectoire de l'avion jusqu'au crash par l'EPNER montre qu'aucune des commandes de vol ne pouvait être bloquée. Cette hypothèse est donc rejetée.

2.3.3. Conclusion sur les causes d'origine technique

L'analyse des paramètres moteurs, la restitution de la trajectoire par l'EPNER et l'absence de tout indice révélateur du traitement, par l'élève pilote, d'une panne potentielle permettent de rejeter toute cause d'origine technique à l'accident.

L'hypothèse qu'une cause d'origine technique ait pu contribuer à l'accident est REJETÉE.

2.4. CAUSES HUMAINES

Hypothèse : l'activation de l'alarme « pression oxygène » résulte de la détection d'une baisse de débit d'origine respiratoire.

Les causes techniques qui auraient pu provoquer l'activation de l'alarme « pression oxygène » ayant été rejetées, son activation est donc liée à la détection d'un débit continu ou nul d'origine physiologique.

Physiologiquement, l'élève pilote n'a pas pu produire une inspiration ou une expiration continue pendant près de 50 secondes (25 secondes d'allumage de l'alarme avant la collision augmentées de la temporisation de 22 secondes).

³³ Centre d'essais en vol

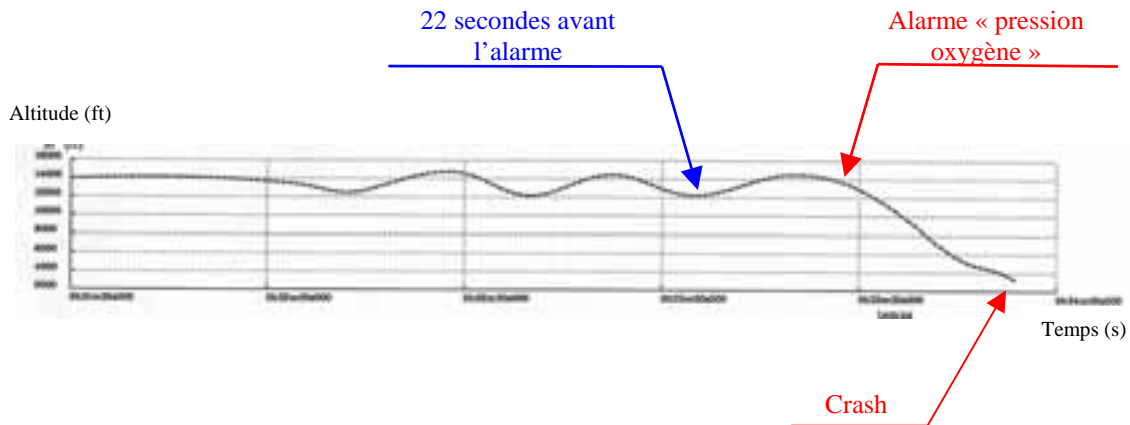
L'alarme « pression oxygène » ne pouvait donc pas être représentative de la détection d'un débit continu d'ordre physiologique. Elle a donc signalé une absence de débit d'origine respiratoire, correspondant à une « pause ventilatoire ».

L'hypothèse que l'activation de l'alarme « pression oxygène » résulte de la détection d'une baisse de débit d'origine respiratoire est CERTAINE.

Cependant, bien que cette alarme reste activée jusqu'au crash, elle ne signifie pas nécessairement que l'élève pilote ne respirait plus. En effet, s'il était dans un état d'inconscience, sa respiration pouvait être en dessous du seuil de détection du détecteur de débit. De surcroît, sa tête a pu basculer pendant que l'avion piquait vers le sol, ce qui aurait pu générer une fuite au niveau du masque.

Hypothèse : l'absence de débit d'oxygène est révélatrice d'une perte de conscience prolongée de l'élève pilote.

Cette « pause ventilatoire » aurait pu être, tout au moins pendant un premier temps, effectuée de façon consciente et volontaire. Le blocage de la respiration est un des moyens utilisés par les pilotes afin d'accroître leur tolérance au facteur de charge. Sur la reconstitution de la trajectographie du vol on note effectivement que la détection de l'absence de débit d'oxygène, 22 secondes avant le déclenchement de l'alarme, se situe au point bas de la dernière figure qui va être exécutée. Ainsi, il est possible que l'élève pilote ait effectué cette manœuvre de blocage respiratoire en prévision de la prise de facteur de charge au départ de la figure.



Altitude en fonction du temps (Restitution RESEDA)

Cependant, même si cette action était initialement intentionnelle, plusieurs éléments tendent à prouver que l'élève pilote n'avait plus toute sa conscience.

- Le facteur de charge décroît de façon continue pendant toute la ressource de la boucle qui précède et cette diminution se poursuit même au départ de la dernière figure,
- bien que la vitesse, 180 kt, au départ de la dernière figure soit de 20 kt plus faible à celle préconisée pour des figures dans le plan vertical comme le demi huit cubain, l'élève pilote poursuit sans effectuer de correction. Or, tous les exercices réalisés jusque-là, l'avaient été en respectant scrupuleusement les paramètres de vitesses requis,
- il ne réagit pas non plus, ni au passage à la verticale ascendante alors que sa vitesse est trop faible d'une quarantaine de nœuds, ni au point haut de la figure alors que son avion est à moins de 40 kt et que la vitesse de passage devrait être supérieure à 80 kt. Cette absence de réaction, alors que ces vitesses sont très nettement inférieures aux vitesses minimales pratiquées, semble inconcevable à ce niveau de la progression,
- l'élève pilote ne réagit pas plus au déclenchement de l'alarme « pression oxygène » (alarme visuelle et auditive), qui reste active jusqu'à la collision, alors que le simple fait d'inhaler l'aurait fait cesser,

- la restitution du vol, par l'EPNER, montre qu'à partir du point haut de la dernière figure les commandes de vol semblent être libres,
- avant la collision, il n'y a aucune rupture de la trajectoire de l'avion pouvant refléter la volonté de l'élève pilote à l'éviter³⁴.

L'hypothèse que l'absence de débit d'oxygène est révélatrice d'une perte de conscience prolongée de l'élève pilote est CERTAINE.

Une étude a été demandée à l'IMASSA afin de déterminer, dans la mesure du possible, l'origine de cette perte de conscience prolongée. Cette analyse a été faite aux vues :

- d'éléments spécifiques à l'élève pilote,
- d'éléments techniques,
- de l'analyse du vol.

2.4.1. Éléments spécifiques à l'élève pilote

- L'expertise de l'élève pilote dans le domaine aéronautique peut être qualifiée de faible. En effet, l'élève pilote :
 - ⇒ totalisait à peine plus de 120 heures de vol sur tous types d'appareils,
 - ⇒ avait effectué moins d'une quinzaine d'heures sur TUCANO,
 - ⇒ accomplissait son troisième vol en solo et son sixième vol en voltige sur TUCANO.

En conséquence, on peut admettre que l'élève pilote ne connaissait pas précisément ses limites physiologiques.

³⁴ L'étude menée à l'EPNER montre que le fléchissement de la trajectoire avant la collision s'explique de façon aérodynamique sans qu'il y ait nécessairement une action sur les commandes de vol.

- Concernant la formation sur les aspects physiologiques du vol, l'élève pilote avait bien reçu une formation théorique sur les effets des accélérations en vol. En revanche, son instruction théorique sur les manœuvres anti-G³⁵ pour accroître sa tolérance au facteur de charge, semble s'être limitée à un cours assuré par un médecin du personnel navigant lors de sa sélection en vol en avril 2001. Il n'a bénéficié d'aucune formation pratique, au sol comme en vol, permettant de s'assurer de la bonne exécution de ces manœuvres³⁶.

Aucun instructeur ou médecin du personnel navigant n'a pu contrôler que l'élève pilote effectuait de façon nominale ses manœuvres anti-G.

- Hygiène de vie :

⇒ il n'existe aucun antécédent médical particulier,

⇒ au cours de sa formation, l'élève pilote n'avait été ni malade en vol, ni sujet à un malaise,

⇒ au cours des précédents vols en voltige aucune survenue de « voile³⁷ » n'a été rapportée,

⇒ les témoignages et les éléments disponibles concordent pour :

- penser qu'il était en chambre la veille au soir au plus tard à 22 heures 30, et donc qu'il a pu bénéficier de repos avant le vol,
- affirmer qu'il avait déjeuné et dîné, la veille, de repas type « restauration rapide » qui, s'ils ne sont pas équilibrés, permettent néanmoins de subvenir aux besoins énergétiques nécessaires,
- conclure que le matin même il ne s'était vraisemblablement ni alimenté ni hydraté.

En conséquence, on relève qu'il n'y avait pas d'antécédent connu à des difficultés d'ordre physiologique et que l'élève pilote était vraisemblablement à jeun le matin du vol.

³⁵ Plus spécifiquement des manœuvres musculaires et respiratoires.

³⁶ L'audition de nombreux pilotes, experts comme novices, montrent que très peu réalisent correctement ces manœuvres musculo-ventilatoires.

³⁷ Défaut d'irrigation sanguine du cerveau, provoquant, lors d'accélérations positives, un rétrécissement du champ visuel.

➤ « Motivation ».

Des témoins rapportent que l'élève pilote :

- ⇒ avait eu des périodes de doute quant à sa réussite comme pilote de chasse suite au cursus à l'école de pilotage de l'armée de l'air (EPAA) de Cognac,
- ⇒ était animé d'une volonté de bien faire. Sa progression était qualifiée de « standard + »,
- ⇒ n'appréhendait pas les missions d'entraînement à la voltige. Il exécutait les figures en prenant un facteur de charge toujours proche de la limite haute conseillée.

On peut donc admettre que l'élève était soumis à un certain niveau de stress lié à la perception de son niveau de progression et à sa motivation pour réussir.

2.4.2. Éléments techniques

2.4.2.1. Détecteurs de cycle respiratoire

Le circuit d'oxygène du TUCANO comporte deux détecteurs de cycle respiratoire, chacun étant attribué à un poste de pilotage. Ces détecteurs permettent d'activer l'alarme « pression oxygène » lorsqu'un débit nul ou continu est détecté depuis plus de 22 secondes. Une modification concernant ces détecteurs a été retenue et est en cours de réalisation par l'industriel. Elle permet d'abaisser de 10 hPa à 5 hPa³⁸ leur seuil de détection. Cette modification résulte d'une étude du LAMAS³⁹ qui montrait que le seuil initial qui avait été retenu pouvait non seulement générer une fatigue, mais qu'il pouvait, de plus, provoquer une hyper ventilation chez certains pilotes. Ces deux conséquences avaient plus spécifiquement comme effet de diminuer leur tolérance au facteur de charge.

³⁸ Plus le seuil de détection est élevé et plus la respiration doit être ample pour ne pas déclencher l'alarme « pression oxygène ».

³⁹ Laboratoire de médecine aérospatiale.

Le jour de l'accident, l'élève pilote volait sur un avion dont les détecteurs de cycle respiratoire n'avaient pas encore été modifiés.

Une fatigue a pu être ainsi engendrée diminuant d'autant la tolérance de l'élève pilote au facteur de charge.

2.4.2.2. Pilotage du TUCANO en voltige

Le pilotage, en mission de voltige sur TUCANO, est qualifié, par certains pilotes, de « physique ». Plusieurs reconnaissent même, qu'en fin de mission, ils pilotent avec les deux mains sur la commande de profondeur en raison des efforts importants à fournir lors d'accélération positives.

Compte tenu de la lenteur de déplacement du compensateur de profondeur, il n'est pas utilisé au cours des évolutions en voltige. L'avion est alors compensé pour une vitesse de 200 kt et ce réglage est maintenu pendant toute la durée des évolutions.

Le pilotage du TUCANO en voltige peut entraîner une fatigue particulière qui est d'autant plus importante que la technologie retenue pour le compensateur sur la chaîne de profondeur n'autorise pas les pilotes à l'utiliser dans ce type de mission.

2.4.3. Analyse du vol

L'analyse du vol, au travers des travaux réalisés par l'EPNER, montre que moins de cinq minutes avant le crash, l'élève pilote avait réalisé une période dense de cinq minutes de voltige sans se ménager de moment de récupération. De plus, à plusieurs reprises, il avait effectué des figures le soumettant à des facteurs de charge négatifs.

2.4.4. Origines de la perte de conscience en vol

Hypothèse : la perte de conscience a une origine purement organique.

Une origine purement organique, type crise d'épilepsie, rupture d'anévrisme vasculaire ou survenue brutale d'un trouble du rythme cardiaque majeur est possible. Elle demeure très improbable compte tenu de l'absence d'antécédents médicaux et du contexte de survenue très particulier de la perte de conscience, après plus de cinq minutes d'applications répétées de facteurs de charge.

L'hypothèse que la perte de conscience a une origine purement organique est POSSIBLE.

Hypothèse : la perte de conscience en vol a été provoquée par un empoisonnement dû à un toxique contenu dans l'oxygène.

Les analyses des containers ayant permis d'avitailer le TUCANO en oxygène montre que ses caractéristiques étaient conformes aux normes exigées et confirment l'absence de tout contaminant.

L'installation était entretenue conformément aux programmes en vigueur et aucune intervention, propice à générer une contamination, n'a été réalisée après le vol précédent.

Si la contamination avait été interne à l'avion, l'agent toxique aurait dû être en concentration suffisante ou avec une toxicité telle que l'empoisonnement puisse se manifester brutalement après trente minutes de vol. Cette dernière hypothèse semble peu vraisemblable.

L'hypothèse que la perte de conscience en vol a été provoquée par un empoisonnement dû à un toxique contenu dans l'oxygène est REJETÉE

Hypothèse : la perte de conscience est consécutive, exclusivement, à un malaise hypoglycémique.

Lors du vol, l'élève était vraisemblablement à jeun, un malaise hypoglycémique aurait donc pu survenir. Toutefois, le tableau clinique d'un tel malaise chez un sujet sain ne correspond pas exactement à la situation. Il débute par une fatigue qui évolue progressivement vers un état d'épuisement, mais sans que ne survienne une véritable perte de conscience.

L'hypothèse que la perte de conscience est consécutive, exclusivement, à un malaise hypoglycémique est REJETÉE.

Toutefois l'absence d'alimentation et d'hydratation était propice à générer un *terrain hypoglycémique*, dont la conséquence est une diminution des réserves énergétiques.

Hypothèse : la perte de conscience en vol est la conséquence d'un G-LOC⁴⁰.

Plusieurs éléments étayaient cette hypothèse.

2.4.4.1. Effet « fatigue »

L'élève pilote a effectué, sur son axe de voltige, près de cinq minutes de voltige où les exercices se sont enchaînés de façon intensive (annexe 3 *Analyse du programme réalisé en vol*, page 72). Après une phase plus calme d'environ deux minutes pendant laquelle il a repris de l'altitude, il a débuté un « enchaînement ».

⁴⁰ *G-induced loss of consciousness* (perte de conscience liée au facteur de charge).

L'effet « fatigue », qui a résulté de l'enchaînement de ces phases physiologiquement éprouvantes⁴¹, a pu, de surcroît, être majoré par plusieurs éléments :

- l'élève pilote ne pouvait avoir qu'une expérience limitée à la pratique efficace des manœuvres anti-G⁴²,
- il était vraisemblablement à jeun et déshydraté,
- le TUCANO ne permet pas l'emport d'équipement anti-G⁴³,
- le pilotage en voltige sur TUCANO est qualifié de « physique » par les pilotes,
- les détecteurs de cycle respiratoire n'étaient pas encore modifiés,
- l'élève pilote avait rajouté des exercices éprouvants au programme prévu.

Par ailleurs, on constate que les valeurs d'accélération pour l'exécution du retournement et de la boucle sont plus faibles lors de la quatrième phase de vol que lors de la seconde (annexe 4 *Comparaison des figures exécutées dans le plan vertical*, page 74). De plus, ces figures, ainsi que le demi huit cubain, sont également exécutées de façon moins dynamique.

Cette évolution dans l'exécution des figures pourrait être le reflet d'une fatigue entraînant une baisse de la tolérance au facteur de charge, d'autant plus que l'élève pilote perd conscience au moment où il est soumis à un niveau d'accélération relativement faible (+3 Gz), habituellement bien toléré.

En conséquence, la densité du programme effectué avec l'ajout de figures éprouvantes, notamment pendant les cinq premières minutes de voltige, a pu générer une fatigue dont les conséquences physiologiques pouvaient être méconnues de l'élève pilote.

⁴¹ Cela équivaut à un exercice physique compris entre 50% et 70% de la puissance énergétique maximale aérobie de l'organisme (VO₂max).

⁴² Les pilotes ont tendance à effectuer une apnée pendant toute la durée d'application du facteur de charge. Or, si elle est maintenue plus de quatre secondes, la fatigue du pilote augmentera rapidement et sa tolérance au facteur de charge sera abaissée par le ralentissement cardiaque induit.

⁴³ Il n'est pas prévu de pouvoir brancher un pantalon anti-G et l'inclinaison à 16 degrés du siège n'améliore pas significativement la tolérance du pilote au facteur de charge.

2.4.4.2. Effet « push pull »

L'exécution du baquet en début de travail sur axe, a exposé le pilote à une accélération négative de longue durée (une quinzaine de secondes). Elle a un effet délétère rémanent qui abaisse la tolérance aux facteurs de charge positifs⁴⁴. Cet effet est connu des présentateurs de voltige aérienne pour lesquels on recommande de placer en fin de programme les figures les exposant à des facteurs de charge négatifs.

Ainsi, un effet « push pull » a pu contribuer à abaisser le seuil de tolérance, de l'élève pilote, au facteur de charge.

2.4.4.3. Effets du stress

La perte de conscience n'a probablement pas été subite. L'accélération enregistrée ne l'étant pas elle-même, un voile gris, puis un voile noir, ont pu la précéder. Néanmoins, l'élève pilote, vraisemblablement animé par la volonté de bien faire et par le désir de rechercher ses propres limites de tolérance⁴⁵, aurait accepté de poursuivre la manœuvre sans tenir compte de cette symptomatologie d'alerte.

Cette focalisation sur le pilotage, visible dès le début du travail dense réalisé sur axe, peut être la conséquence d'un niveau de stress élevé lié à l'objectif de réussite qu'avait pu se fixer l'élève (annexe 5 *Effets du stress*, page 77). Pour cela, il devait, sans faillir, accomplir sa mission de voltige avec un avion dont la connaissance lui semblait acquise mais qui, dans la réalité, était vraisemblablement insuffisante.

Ainsi, cette focalisation consécutive au stress aura pu favoriser l'oubli, ou la mauvaise application, des manœuvres anti-G, sans pour autant qu'une perte générale de contrôle de la situation ait pu inhiber durant une cinquantaine de secondes les fonctions motrices et respiratoires de cet élève.

⁴⁴ Ces effets, qui se manifestent lors de la prise de facteur de charge positif après avoir subi un facteur de charge négatif, peuvent survenir pendant les deux heures qui suivent l'exposition au facteur de charge négatif (effet push-pull).

⁴⁵ L'élève pilote n'avait pas encore accompli le huit cubain au programme, figure qui se réalise sans prise de facteur de charge, alors qu'il avait rajouté trois exercices certes connus mais engendrant des facteurs de charge élevés.

En effet, les évolutions, jusqu'au dernier point haut, semblent bien maîtrisées. Par ailleurs, ce stress généré par la forte motivation de l'élève pilote a eu pour effet de majorer la consommation de sucre pouvant conduire à un épuisement prématuré de la réserve de sucre et, corollairement, à une diminution de la tolérance au facteur de charge.

En conséquence, les effets du stress ne sont donc à considérer que comme un facteur aggravant sur la baisse de tolérance au facteur de charge à l'origine du G-LOC.

2.4.5. Conclusion sur les causes d'origine physiologique

L'activation de l'alarme « pression oxygène » résulte de la détection d'une absence de débit suite à une perte de conscience de l'élève pilote, elle-même consécutive à un G-LOC. Son origine serait une baisse progressive de la tolérance de l'élève pilote aux accélérations, au cours du vol, par « effet fatigue ». Celui-ci trouve sa source dans la réalisation de façon soutenue et dense des exercices en vol, dans l'ajout de figures éprouvantes et dans la non application des manœuvres musculo-ventilatoires idoines. L'ensemble est vraisemblablement aggravé par un état à jeun. Cet « effet fatigue » a certainement été amplifié par un effet « *push pull* », avec l'exécution d'un baquet en début de programme et par un « effet stress » lié à une forte motivation pour réussir.

L'hypothèse que la perte de conscience ait pour origine un G-LOC par « effet fatigue », amplifié d'un « effet *push pull* » et d'un « effet stress », en présence d'un terrain hypoglycémique, est POSSIBLE.

2.4.6. Caractérisation de la perte de conscience

Une perte de conscience par G-LOC se caractérise généralement par :

- une première période d'une quinzaine de secondes de perte de conscience totale,
- une deuxième période d'inconscience relative d'une quinzaine de secondes à l'issue de laquelle le pilote est apte à réagir pour entreprendre une manœuvre corrective de sauvegarde.

Le crash intervient une cinquantaine de secondes après la détection d'un débit nul. L'élève pilote n'a ni actionné la poignée d'éjection ni tenté de corriger la trajectoire de l'avion pour éviter la collision.

Hypothèse : au moment où l'élève pilote est en train de reprendre conscience, l'application d'un facteur de charge croissant l'amène de nouveau à un état d'inconscience.

L'étude de la variation du facteur de charge, Gz, après l'activation de l'alarme « pression oxygène » montre :

- qu'il est négatif pendant trois secondes et atteint $-0,26$ Gz,
- qu'il croît ensuite pour dépasser $+4$ Gz en 16 secondes.

En conséquence, si l'élève pilote était en train de reprendre conscience dans la phase de piqué, après le passage au point haut de la dernière figure tentée, l'application, d'une part, d'un facteur de charge négatif et, d'autre part, de valeurs élevées de facteur de charge positif, a pu le conduire à reperdre immédiatement conscience sans lui laisser le temps de construire un plan d'action pour sa sauvegarde⁴⁶.

L'hypothèse qu'au moment où l'élève pilote est en train de reprendre conscience, l'application d'un facteur de charge croissant l'amène de nouveau à un état d'inconscience est POSSIBLE.

⁴⁶ La reprise de conscience ne s'accompagne pas nécessairement d'une respiration suffisante pour arrêter l'alarme « pression oxygène ».

Hypothèse : une erreur de l'élève pilote dans la gestuelle pour saisir la poignée d'éjection ne lui aurait pas permis de l'initier.

L'examen de l'épave montre que la poignée d'éjection n'a pas été actionnée et que la goupille de sécurité⁴⁷ était effectivement retirée.

L'ergonomie des poignées d'éjection a fait l'objet d'une modification au mois d'août 2003 entraînant une gestuelle sensiblement différente pour les saisir. Les anciennes poignées étaient de forme allongée et plus longues de 10 cm que les nouvelles. Elles étaient ainsi saisies par un geste plus en hauteur.

Suite à cette modification, le commandement de l'école s'est assuré que tous les personnels avaient été instruits. Pour les élèves pilotes, cette formation a été programmée à la fin du mois d'août, avant la reprise de l'activité aérienne en septembre. Ils ont alors bénéficié d'une instruction théorique et pratique sur le simulateur d'éjection⁴⁸. L'élève pilote décédé lors de l'accident du 19 septembre s'y était entraîné le 29 août 2003.

En revanche, les entraîneurs de vol sont dotés de poignées d'éjection qui elles, n'ont pas été modifiées. Pourtant, afin d'entraîner les élèves pilotes à la prise de décision d'éjection, les instructeurs assurant la conduite des missions réalisées à l'entraîneur de vol, provoquent parfois une panne dont la seule issue possible est l'éjection⁴⁹. Celle-ci est alors commandée en utilisant une poignée d'ancienne génération, ne faisant pas appel à la même gestuelle que celle adaptée aux avions.

⁴⁷ La goupille de sécurité est retirée par le pilote, avant le décollage. Il la range ensuite dans le logement, sur la banquette droite, prévu à cet effet.

⁴⁸ On distingue : le simulateur d'éjection, qui permet de s'entraîner à l'éjection, l'entraîneur de vol qui est utilisé à l'instruction des procédures normales et secours, et le « siège » sur lequel les nouveaux personnels affectés apprennent à se brêler.

⁴⁹ Cela avait été le cas pour la victime lors de sa séance sur entraîneur de vol le 17 septembre 2003.

Le jour de l'accident, il est possible que l'élève pilote, reprenant momentanément conscience, ait voulu se saisir de la poignée d'éjection et que sa gestuelle ait correspondu au dimensionnement des anciennes poignées d'éjection. L'urgence de la situation et le fait qu'il n'ait pas encore retrouvé toute sa conscience, voire même qu'il soit retombé rapidement dans un état d'inconscience, ne lui aurait pas permis de corriger son geste erroné.

L'hypothèse qu'une erreur de l'élève pilote, dans la gestuelle pour saisir la poignée d'éjection, n'aurait pas permis de l'initier est POSSIBLE

3. CONCLUSION

3.1. ELEMENTS UTILES A LA COMPREHENSION DE L'EVENEMENT

3.1.1. Éléments relatifs à l'élève pilote

- Sa connaissance sur les manœuvres musculo-ventilatoires pour accroître sa tolérance au facteur de charge était théorique et incomplète,
- il était motivé pour devenir pilote de chasse,
- il faisait preuve de « mordant » pendant les vols, et plus spécifiquement lors des entraînements à la voltige,
- il avait une expérience faible sur TUCANO, mais suffisante à l'exécution de cette mission,
- les conditions d'un repos suffisant, la nuit précédent le vol, étaient réunies,
- il était vraisemblablement à jeun le matin du vol.

3.1.2. Éléments relatifs à la mission

- L'élève pilote réalisait son sixième vol d'entraînement à la voltige sur TUCANO. C'était son second vol de voltige en solo,
- la préparation et le briefing de la mission ont été jugés nominaux par le « *surveillant solo* »,
- les conditions météorologiques étaient favorables à la réalisation de la mission,
- l'élève pilote avait ajouté, à son initiative, trois exercices à son programme d'entraînement : un virage serré max et un retournement effectués en arrivant sur l'axe de voltige, ainsi qu'une boucle réalisée à la fin des cinq premières minutes de voltige,
- ces trois exercices ajoutés lui étaient connus et ont été réalisés, comme tous les autres, conformément à ce qui lui avait été enseigné. Cet ajout relèverait d'une volonté de l'élève d'approfondir ces figures de voltige,

- le travail sur l'axe de voltige a été réalisé par l'élève pilote de façon dense. Toutes les figures étaient réalisées de façon soutenue, le facteur de charge dépassant à plusieurs reprises 3,5 Gz,
- l'élève pilote a effectué un baquet et un tonneau lent en début de programme qui l'ont soumis, pendant des périodes pouvant atteindre une quinzaine de secondes, à des facteurs de charge négatifs atteignant $-1,29$ Gz,
- lors de l'exécution de la dernière figure, l'effort sur la commande de profondeur était nul.

3.1.3. Éléments relatifs à l'avion

- L'avion était entretenu conformément aux programmes d'entretien,
- la reconstitution de la trajectographie témoigne du bon fonctionnement de l'ensemble des systèmes moteur et de pilotage,
- l'alarme « pression oxygène » était active 25 secondes avant l'impact de l'avion,

3.2. MECANISME DE L'ACCIDENT

Cet accident résulterait d'une perte de connaissance par G-LOC suite à une diminution de la tolérance de l'élève pilote au facteur de charge par effet « fatigue ». Celle-ci s'expliquerait par la réalisation d'un programme de voltige dense, exécuté de façon soutenue et sans période de relâchement. De plus, l'élève pilote aurait été à jeun le matin du vol.

Cette diminution de la tolérance au facteur de charge a pu être amplifiée simultanément par un effet « *push pull* », les valeurs de facteur de charge pouvant atteindre $-1,29$ Gz, et par un effet « stress », l'élève faisant preuve d'une grande motivation pour devenir pilote de chasse.

Bien qu'un défaut de gestuelle pour déclencher l'éjection ne puisse être totalement écarté, il est vraisemblable que la raison pour laquelle l'élève pilote ne s'est pas éjecté soit essentiellement l'état d'inconscience provoqué par l'application répétée de facteurs de charge.

4. RECOMMANDATIONS DE SECURITE

4.1. MESURES DE PREVENTION AYANT TRAIT DIRECTEMENT A L'EVENEMENT

Ces mesures concernent la formation des personnels navigants, les programmes de vol et les détecteurs de cycles respiratoires.

4.1.1. Formation des personnels navigants

4.1.1.1. Instruction aux manœuvres anti-G

L'enseignement aux facteurs humains fait partie intégrante de la formation du personnel navigant de l'armée de l'air. Il se répartit sur les différentes étapes du cursus de formation, le premier module étant programmé au début de la sélection en vol.

Concernant la formation relative aux facteurs de charge, seule une instruction sur leurs effets est formalisée. Aucun enseignement théorique sur les manœuvres musculo-ventilatoires nécessaires n'est dispensé de façon systématique.

Aucune instruction pratique, en centrifugeuse par exemple, ne permet à ce jour de s'assurer d'une part de la réalisation efficace de ces manœuvres et, d'autre part, du niveau de tolérance des personnels navigants.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense recommande :

- **que l'enseignement aux facteurs humains soit complété par l'ajout d'une formation théorique et pratique sur la réalisation des manœuvres musculo-ventilatoires, améliorant la tolérance aux facteurs de charge,**
- **qu'une approche pratique de la tolérance au facteur de charge des personnels navigants soit entreprise par l'armée de l'air (détermination éventuelle d'un niveau de tolérance exigible, contrôle de ce niveau lors de séances pratiques).**

A titre d'exemple, un certain nombre d'éléments relatifs à la formation des pilotes de chasse américains, canadiens et néerlandais ont été réunis et peuvent servir de base à la réflexion (annexe 7 *Instruction conduite dans les armées étrangères sur la tolérance au facteur de charge*, page 81).

Ainsi, dans ces pays :

- l'instruction comporte une phase théorique suivie d'une phase pratique en centrifugeuse,
- cette instruction se situe au tout début de la formation en vol (équivalent école de pilotage à Cognac),
- l'instruction est spécifique selon le niveau d'équipement des personnels : avec ou sans pantalon anti-G,
- cette formation peut être répétitive pour tenir compte des spécificités des aéronefs (une première fois pendant le passage en école, une seconde fois lors de l'affectation sur avion de chasse),
- cette instruction est qualifiante, une norme minimale est définie. Tout personnel n'ayant plus d'entraînement régulier pendant une période considérée (changement d'avion, retour en unité de personnels d'état-major...) doit repasser cette qualification avant d'effectuer un vol,
- pour les jeunes pilotes, et une fois par an pour tous les autres pilotes, un contrôle basé sur l'écoute de la cassette audio pendant la réalisation du *G-warm up* permet à la hiérarchie de s'assurer de la réalisation correcte des manœuvres ventilatoires⁵⁰.

⁵⁰ Dans ce cas, l'écoute de la cassette se fait en la présence du médecin du personnel navigant et d'un pilote commandant d'escadrille ou Officier sécurité des vols.

4.1.1.2. Hygiène de vie

L'état de préparation physique des personnels navigants est d'une grande importance dans une approche « sécurité des vols », notamment par l'aptitude à la résistance au facteur de charge qu'elle confère.

L'audition de nombreux navigants, qu'ils soient confirmés ou non, révèlent qu'une minorité d'entre eux ne déjeunent pas le matin. Bien que les raisons avancées soient diverses (habitude sociale, perte de temps, coût du petit déjeuner, faible attrait de celui qui est proposé...) ces personnels arguent systématiquement qu'ils n'ont jamais ressenti de diminution de leurs résistance en vol, l'habitude tendant à les conforter dans leur choix.

La nécessité d'une alimentation et d'une hydratation avant le vol n'étant plus à démontrer, une démarche pédagogique pourrait être entreprise. Elle serait alors destinée à persuader l'ensemble des personnels navigants que si, le malaise hypoglycémique est rare pendant le vol, une alimentation et une hydratation adéquates permettront, le cas échéant, d'éviter le malaise en présence d'autres facteurs (fatigue, stress...).

Des mesures collatérales peuvent également être consolidées, s'agissant par exemple du caractère obligatoire et contrôlé du petit déjeuner des élèves pilotes et de la teneur adéquat de ces repas.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense recommande :

qu'une démarche pédagogique soit entreprise afin de convaincre l'ensemble des personnels navigant de la nécessité de la prise d'un petit déjeuner, tout en s'assurant de la teneur adéquate de ce repas.

4.1.2. Les programmes de vol

Une attention particulière devrait être apportée afin que l'enseignement en vol soit progressif pour permettre une adaptation des personnels navigants au facteur de charge. Cette progressivité devrait également se retrouver au sein de chaque vol et plus spécifiquement pour les vols d'entraînement à la voltige⁵¹.

⁵¹ Le premier vol d'entraînement à la voltige sur TUCANO, PV 1, débute, d'après le programme, par un virage serré max.

D'une part, il semble que les instructeurs disposent, à ce jour, de toute liberté afin d'organiser, pour un vol donné, l'ensemble des exercices au programme. Cette liberté s'étend aux élèves lorsqu'ils réalisent des vols en solo. Ils sont même parfois encouragés à rajouter, en plus des exercices au programme, des exercices déjà étudiés et pour lesquels ils souhaiteraient se perfectionner.

S'il est admis d'accorder cette liberté aux instructeurs, afin qu'en temps réel ils puissent tenir compte de l'environnement, les élèves et stagiaires n'ont pas l'expertise suffisante afin d'élaborer un programme équilibré en terme de fatigue. De plus, cette liberté consentie pour les instructeurs, devrait être bornée et contrôlée.

D'autre part, afin de limiter la probabilité de survenue d'un effet « *push pull* », les figures réalisées avec un facteur de charge négatif devraient être rejetées en fin de programme.

Enfin, une attention particulière devrait être accordée à l'enseignement de l'organisation du travail sur axe de voltige. L'instruction délivrée pourrait davantage insister sur les enjeux du respect de temps de récupération lors de ces séances et de la nécessité de la réalisation systématique d'un *G-warm up* en début de programme (annexe 6 *Manœuvre de « G-warm up »*, page 78).

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense recommande que :

- **la progressivité, tout au long du cycle de formation et à l'intérieur de chaque vol, de l'entraînement à la résistance au facteur de charge soit prise en compte,**
- **la latitude accordée aux instructeurs pour hiérarchiser les exercices d'une mission, soit bornée en tenant compte des différents effets possibles,**
- **la gestion de temps de récupération pendant le travail en voltige soit un objectif pédagogique,**
- **la réalisation d'un *G-warm up* en début de mission soit systématisée.**

4.1.3. Détecteurs de cycle respiratoire

Les études faites au LAMAS ont montré que la valeur élevée de 10 hPa pour le seuil de détection de débit d'oxygène génère une fatigue et peut entraîner, chez certains pilotes, de l'hyperventilation. Ces phénomènes sont d'autant plus sensibles que le vol est éprouvant, comme cela est le cas en mission d'entraînement à la voltige. Une modification des détecteurs de débit est en cours. Elle se déroule par noria chez l'industriel et a pour objet d'abaisser ce seuil à 5 hPa. Cependant, l'ensemble de la flotte TUCANO n'est pas encore modifié.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense recommande que :

- **soit étudiée la possibilité d'accélérer la modification de la totalité des TUCANO,**
- **dans l'attente de cette modification, des mesures limitatives soient envisagées (limitations d'emploi des avions non modifiés).**

4.2. MESURES DE PREVENTION N'AYANT PAS TRAIT DIRECTEMENT A L'EVENEMENT

Les mesures proposées relèvent de la préparation à l'éjection, des équipements de vol, du compensateur sur la chaîne de profondeur, de l'enregistreur de paramètres et des recherches et secours.

4.2.1. Préparation à l'éjection

Les moyens de simulation de vol et d'éjection doivent être similaires à la réalité pour une parfaite acquisition des actions réflexes liées à la sécurité.

L'examen des matériels disponibles montre que les poignées d'éjection des entraîneurs de vol n'ont pas été modifiées et que les systèmes de verrouillage de ces poignées ne servent qu'à les maintenir en place et n'offrent aucun effort de résistance à la traction. Ces équipements ne reflètent donc pas la réalité de la configuration réelle.

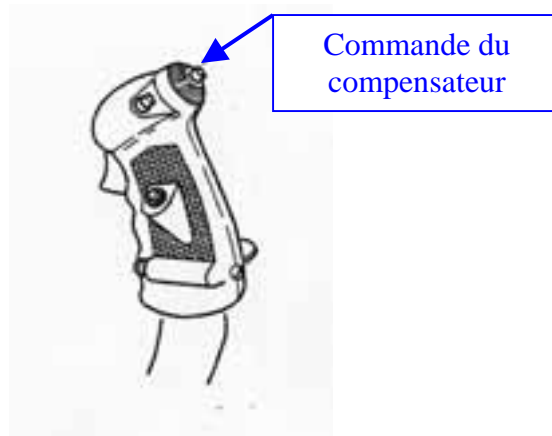
En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense recommande que :

les poignées d'éjection des entraîneurs de vol soient modifiées.

4.2.2. Compensateur de profondeur

En raison d'une plage de débattement très importante du compensateur de profondeur, l'armée de l'air a demandé que soit ralentie sa vitesse de déroulement. Cette exigence devait permettre de se prémunir, lors d'une action involontaire sur sa commande, de l'amener trop rapidement en butée.

Ce choix a pour corollaire, d'une part, d'augmenter le temps pour ramener le compensateur à une position neutre si jamais il a été positionné en butée et, d'autre part, d'en limiter son emploi lors d'évolutions rapides comme c'est le cas en voltige. L'importance des efforts à fournir sur la commande de profondeur peut alors générer une fatigue excessive.



Manche pilote

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense recommande que soit étudiée la possibilité :

- **de revenir à un déplacement plus rapide du compensateur de profondeur,**
- **d'en limiter techniquement sa plage d'utilisation,**
- **d'autoriser son utilisation en voltige afin de limiter les efforts à exercer sur la commande de profondeur.**

4.2.3. Enregistreur de paramètres

Les travaux réalisés par l'EPNER montrent que les paramètres fournis par l'enregistreur ne permettent pas de restituer de manière précise et sûre l'attitude de l'avion, sa vitesse et son altitude.

Ces mesures pourraient être complétées par des enregistrements des accélérations et des vitesses angulaires qui, en complétant les paramètres actuels, permettraient de reconstituer la trajectoire de l'avion avec une plus grande exactitude.

Les nouveaux capteurs souhaitables seraient :

- gyromètre de roulis P,
- gyromètre de tangage Q,
- gyromètre de lacet R,
- accéléromètre Jx,
- accéléromètre Jy.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense recommande que :

ces éléments de réflexion soient pris en compte pour la définition des enregistreurs d'accidents.

4.2.4. Équipements de vol

L'investigation sur les lieux de l'accident montre que l'élève pilote portait des chaussettes de sport. Bien que cet équipement ne soit pas un élément primordial dans la protection du pilote par rapport à d'autres équipements (casque, chaussures...), il participe à protéger les pieds du pilote de brûlures occasionnées par un feu à bord ou lors de la séquence d'éjection (principalement pour les sièges équipés d'un moteur fusées). Le port de chaussettes de sport n'assure pas la protection contre les brûlures. Au contraire, ces chaussettes peuvent contribuer à la propagation de la chaleur.

Il semble qu'un certain nombre d'élèves pilotes volent avec ce type de chaussettes en raison d'une attribution initiale insuffisante en mi-bas de vol.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense recommande que :

soit revue la première dotation des personnels navigants en équipements de vol et plus spécifiquement celle concernant les mi-bas de vol.

4.2.5. Recherches et secours

4.2.5.1. Moyens aériens

Différents moyens aériens ont été engagés pour les recherches et le déclenchement des secours :

- un TUCANO de l'école de Salon de Provence sous les ordres du directeur des vols de la DV,
- un hélicoptère du SAMU 84 déclenché par le CODIS⁵²,
- un hélicoptère SAR de l'EH 05.067 déclenché par le CCS de Lyon.

Il est à noter que l'hélicoptère du SAMU 84 aurait entamé des recherches afin de localiser l'élève pilote, sans que le CCS de Lyon en soit informé et sans autre coordination.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense recommande que :

soit établi une coordination des divers moyens aériens de secours pouvant être engagés, lors d'interventions, au travers d'une concertation entre le CODIS et le CCS.

4.2.5.2. Balise de détresse

La société EMBRAER a attiré l'attention du CEAA (Fiche d'évolution 312-034 BR EMBRAER 0243/GDE/02 du 14 avril 02) sur l'arrêt de fabrication de la balise de détresse de type DMELT8.1 et sur l'évolution des normes. En conséquence :

- la balise de détresse ne répond plus aux normes de résistance au crash,
- elle ne permet pas d'émettre sur la fréquence 406 MHZ.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense recommande :

qu'une étude soit réalisée pour changer le parc des balises de détresse afin de répondre aux normes ED – 62 de l'EUROCAE⁵³ (annexe 11, *Fonctionnement de la balise de détresse*, page 89).

⁵² Centre opérationnel départemental d'incendie et de secours.

⁵³ *European organisation for civil aviation equipment* (organisation européenne pour l'équipement de l'aviation civile).

Bureau enquêtes accidents défense

RAPPORT PUBLIC D'ENQUETE TECHNIQUE

BEAD-A-2003-021-A



ANNEXES

ANNEXES

1. Description des figures de voltige.....page 66
2. Restitution de la trajectoire de l'avion.....page 69
3. Analyse du programme réalisé en vol.....page 72
4. Comparaison des figures exécutées dans le plan vertical.....page 74
5. Effets du stress.....page 77
6. Manœuvre de « *G-warm up* ».....page 78
7. Instruction conduite dans les armées étrangères sur la tolérance au facteur de charge.....page 81
8. Rôle du « surveillant solo ».....page 82
9. Examen du siège éjectable.....page 83
10. Systèmes d'alarmes.....page 86
11. Fonctionnement de la balise de détresse.....page 88

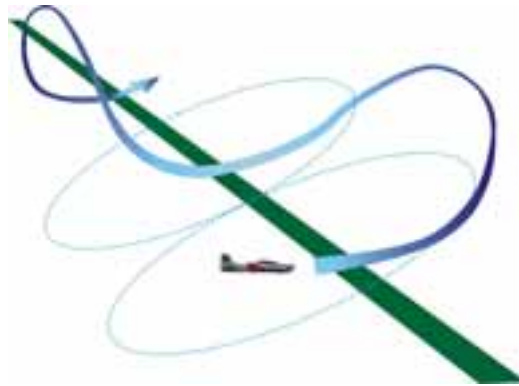
1. DESCRIPTION DES FIGURES DE VOLTIGE

- Virage serré max : virage à altitude constante et à puissance et facteur de charge maximaux. Sur TUCANO, les élèves pilotes effectuent ce virage en prenant un facteur de charge compris entre + 3,5 Gz et + 4 Gz,
- tonneau : rotation régulière de 360° autour de l'axe de roulis,
- baquet : rotation alternée autour de l'axe de roulis comportant une mise dos, une stabilisation sur le dos et un retour en vol ventre dans le sens de rotation inverse,
- tonneau barriqué : spirale sur un axe horizontal obtenu par une évolution en tangage couplée à une rotation en roulis de 360°,



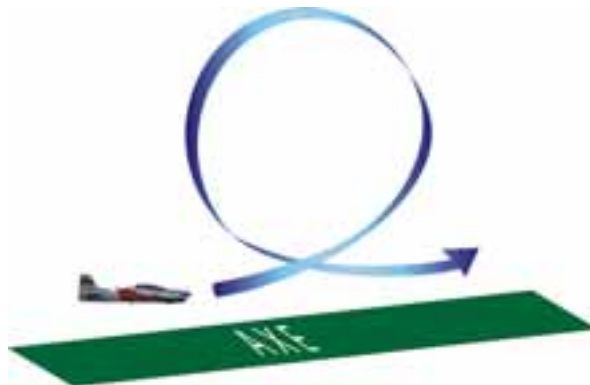
Tonneau barriqué

- huit paresseux : figure pendant laquelle l'avion décrit un huit au sol et dont le développement dans le plan oblique est caractérisé par une variation lente et simultanée de l'assiette, de l'inclinaison et de la vitesse,



Huit paresseux

- boucle : figure dans le plan vertical obtenue par une rotation en tangage de 360°,



Boucle

- retournement : changement de direction de 180° par enchaînement d'un demi tonneau sur une trajectoire ascendante suivi d'une demi boucle,



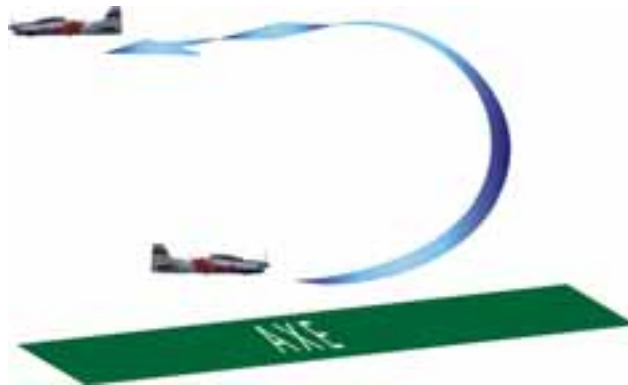
Retournement

- huit cubain : ensemble de deux figures symétriques, demi huit cubain, chacune composée d'une partie de boucle jusqu'à 45° de piqué dos suivie d'un demi tonneau sur une trajectoire à 45° ,



Huit cubain

- rétablissement : changement de direction de 180° avec prise d'altitude, en enchaînant une demie boucle et un demi tonneau,



Rétablissement

- trèfle : figure dans le plan vertical composée de quatre branches identiques. Chaque branche comporte une rotation en tangage de 360° accompagnée, à partir de 60° de cabré, d'une rotation en roulis de 90° ,
- « enchaînement » ou « série de voltige » : elle est réalisée par l'enchaînement :
 - ⇒ d'un retournement,
 - ⇒ d'une boucle,
 - ⇒ d'un huit cubain,
 - ⇒ d'un rétablissement.

2. RESTITUTION DE LA TRAJECTOIRE DE L'AVION

2.1. OPERATIONS REALISEES SUR LE DEPOUILLEMENT DU FDR

Le FDR a été dépouillé au centre RESEDA. Le fichier obtenu a ensuite été transféré vers l'EPNER, à Istres, pour analyse. Les opérations qui ont été réalisées et qui sont décrites ci-après, ont permis de produire, avec l'emploi du logiciel *Fourmi*, une visualisation analytique, une visualisation 3D et une visualisation synthétique du vol.

Plus spécifiquement, certains paramètres ont du être validés voire recalculés compte tenu de la technologie de l'horizon secours sur lequel sont prélevés les indications d'assiettes longitudinale et latérale. Des biais de mesure sont effectivement introduits en raison de la limitation mécanique en rotation du palier du gyroscope permettant d'indiquer l'assiette longitudinale.

- Conversion de l'enregistrement : l'enregistrement au format « Fichier SECU » provenant du dépouillement du FDR par RESEDA est transformé en « Fichier PCM »,
- changement de cadence : le fichier d'origine, cadencé à 1 tour/seconde, est converti à 32 tours/seconde.

Nota : sauf en ce qui concerne la base de temps, ces deux opérations ne modifient ni les fréquences d'échantillonnage, ni les valeurs des données de l'enregistrement initial.

- Correction des étalonnages :
 - ⇒ l'étalonnage initial de l'inclinaison latérale (*phi*) entre -170° et $+170^\circ$ est ramené entre -180° et $+180^\circ$,
 - ⇒ l'étalonnage initial de l'assiette longitudinale (*teta*) entre -71° et $+101^\circ$ est ramené entre -90° et $+90^\circ$,
- contrôle de la qualité des mesures : le contrôle des mesures est réalisé en vérifiant la bonne corrélation des différents paramètres entre eux durant les phases de vols caractéristiques (décollage, montées, descentes, virages, tonneaux, boucles ...).

⇒ Anémométrie :

- l'altitude, fournie par la sonde de pression statique (P_s – paramètre pse), est cohérente,
- la vitesse, fournie par la différence entre la pression dynamique et la pression statique (Δp – paramètre dpe), est cohérente jusqu'à 340 kt (limite de mesure du capteur),

ces deux paramètres sont utilisés sans correction.

⇒ Accélérométrie : l'accélération verticale (paramètre jz) est cohérente. Ce paramètre est utilisé sans correction.

⇒ Attitudes :

- les assiettes longitudinales (phi) et latérale ($teta$) sont cohérentes. Phi est utilisée sans correction tant que $teta$ reste dans sa plage de liberté. Il est calculé au-delà. $Teta$ est corrigé après identification des biais de mesure,
- le cap est erroné lorsque l'avion évolue à forte inclinaison latérale. Il n'est jamais utilisé et il est toujours recalculé.

⇒ Température : la température totale T_t (utilisée pour déterminer les vitesses air) a un retard prohibitif. La restitution du vol pendant la montée sur axe est mise à profit pour réaliser un sondage météo. Les valeurs de température ainsi définies sont utilisées par la suite pour la restitution du travail sur axe.

⇒ Moteur : les paramètres moteur sont cohérents et sont utilisés sans correction.

2.2. RESTITUTION DU VOL

La restitution du vol est réalisée sous forme d'affichages graphiques animés. Pour réaliser ces affichages et tenir compte de l'imperfection des mesures, il est nécessaire d'effectuer les traitements suivants :

- filtrage des données,
- correction et calcul, le cas échéant, des assiettes longitudinale et latérale,
- calcul de la température air,
- calcul de l'altitude, de la vitesse conventionnelle et de la vitesse air,
- calcul des vitesses de lacet et de tangage,
- calcul du cap,
- calcul de la vitesse verticale,
- calcul de l'incidence,
- calcul de la pente,
- déduction de la vitesse conventionnelle au-delà de 340 kt,
- déduction de la position de la profondeur,
- déduction des vitesses selon les trois axes X, Y et Z, dans le repère terrestre.

3. ANALYSE DU PROGRAMME REALISE EN VOL

3.1. PROGRAMME « VOLTIGE »

Le programme « voltige » comprend huit missions dont deux en solo (PV 3 et PV6).

La progression est sanctionnée par un test à la mission PV 8.

La mission PV 6 solo est définie de la sorte :

- décollage – prise d'axe,
- huit paresseux,
- tonneaux lents, baquets,
- tonneaux barriqués,
- enchaînements,
- trèfle,
- percée dirigée,
- intégration circuit à vue,
- atterrissage.

Pour l'ensemble des programmes, et plus spécifiquement pour la mission PV 6, il n'est pas précisé, si les exercices doivent être exécutés dans l'ordre chronologique tels qu'ils sont présentés dans le programme. Il en est de même pour le nombre de figures de chaque type devant être réalisées (plusieurs exercices sont au pluriel).

L'audition de plusieurs instructeurs et élèves pilotes montre que ce programme sert généralement de support sur les exercices qui devront être étudiés, l'organisation chronologique du vol étant à la charge de l'instructeur pour tenir compte de l'environnement (conditions météorologiques etc.) et également de la fatigue de l'élève pilote pendant le vol.

Plus spécifiquement, concernant les vols réalisés en solo, il semble qu'un certain nombre d'instructeurs invite les élèves pilotes à ajouter des exercices au programme afin de travailler leurs points faibles.

3.2. ANALYSE DU PROGRAMME REALISE EN VOL

Par rapport à la chronologie du programme de la mission PV 6, l'élève pilote n'avait pas encore réalisé le huit paresseux et il était en train d'accomplir un « enchaînement ».

Il avait effectué des figures qui n'étaient pas prévues au programme⁵⁴ : un virage serré max, un retournement et une boucle. Toutefois, ces exercices étaient connus de l'élève pilote et il les avait déjà réalisés en double commande lors de missions précédentes.

On peut noter que les figures rajoutées sont des figures avec facteur de charge, contrairement au huit paresseux. On relève également que toutes les figures ont été exécutées avec précision (tenue des paramètres), sans perte de temps entre chaque. Ces différents points soulignent la volonté de bien faire de l'élève pilote dans un souci de rentabiliser au maximum la mission.

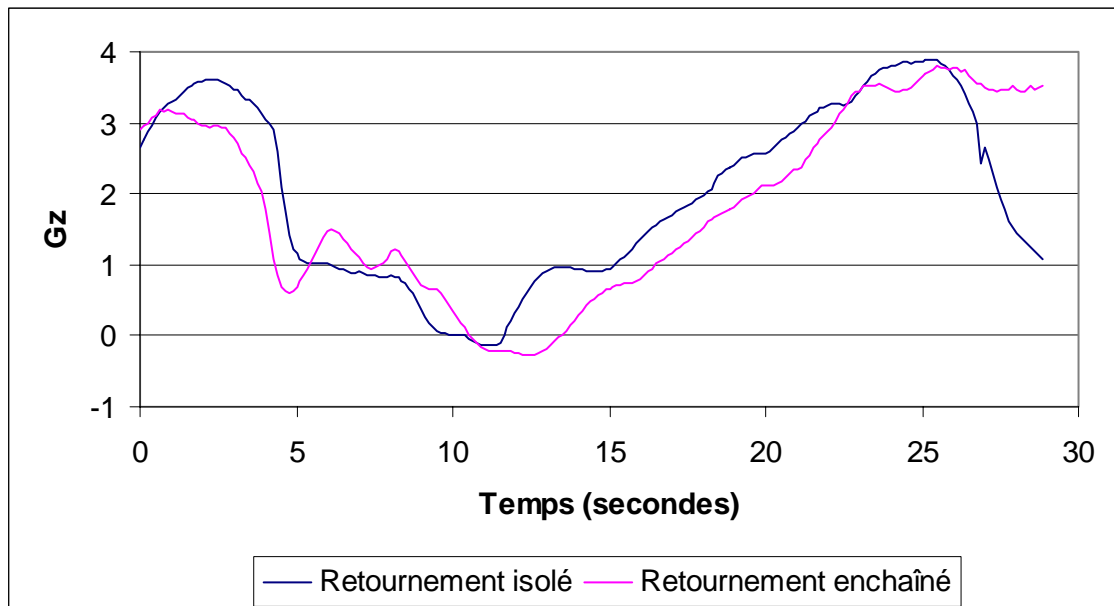
Enfin, on constate que l'élève pilote débute le travail sur l'axe de voltige par un virage serré max qui l'amène à dépasser + 4 Gz. Cette première figure, réalisée sans *échauffement*, ne permet pas à l'élève pilote d'évaluer sa condition du moment. Les témoignages recueillis montrent que l'exécution d'un *G-warm up* n'est pratiquée que par un nombre très restreint d'instructeurs et qu'il ne fait pas l'objet d'un enseignement spécifique.

⁵⁴ L'ajout de ces figures n'est pas considéré, par les instructeurs auditionnés, comme une désobéissance à une règle. En particulier, on peut admettre que l'élève pilote a choisi d'effectuer, de façon séparée, un retournement et une boucle avant de les réaliser dans « l'enchaînement ».

4. COMPARAISON DES FIGURES EXECUTEES DANS LE PLAN VERTICAL

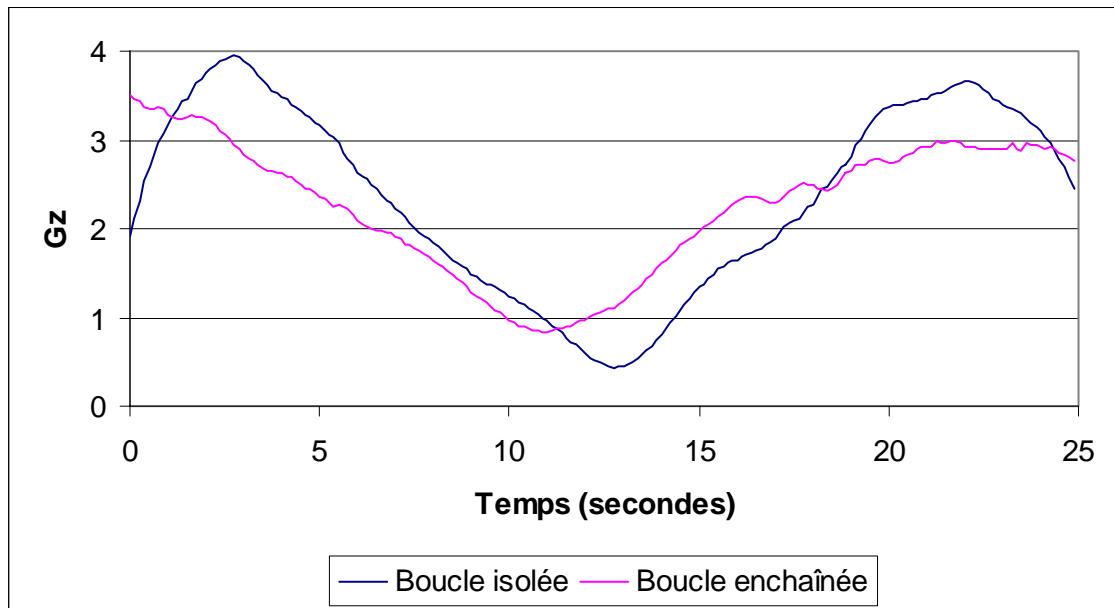
Dans les comparaisons présentées ci-après on appellera « retournement isolé » et « boucle isolée » ces deux figures lorsqu'elles sont réalisées par l'élève pilote en dehors de « l'enchaînement ». On les nommera « retournement enchaîné » et « boucle enchaînée » lorsqu'elles sont exécutées pendant la réalisation de « l'enchaînement ».

4.1. COMPARAISON DES DEUX RETOURNEMENTS EFFECTUES PENDANT LA MISSION



Cette représentation du facteur de charge en fonction du temps montre que, lors de l'enchaînement, la figure est réalisée de façon légèrement moins dynamique, et avec un facteur de charge initial moins élevé que lorsqu'elle a été effectuée de façon isolée.

4.2. COMPARAISON DES DEUX BOUCLES REALISEES PENDANT LA MISSION

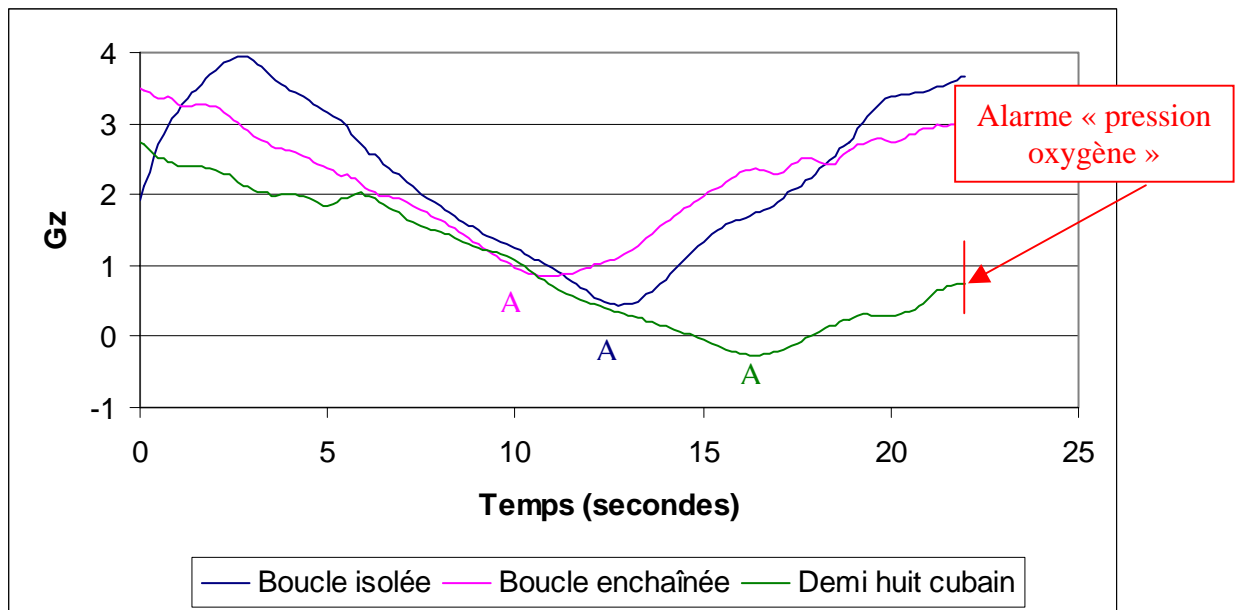


La représentation du facteur de charge en fonction du temps montre que, lors de l'enchaînement, la figure est réalisée de façon moins dynamique, et avec un facteur de charge moins élevé que lorsqu'elle a été effectuée de façon isolée.

4.3. COMPARAISON DES DEUX BOUCLES ET DU DEMI HUIT CUBAIN

Cette comparaison est possible, car la réalisation du demi huit cubain est semblable à celle d'une boucle jusqu'à 45° de piqué dos.

Cette comparaison est présentée jusqu'au déclenchement de l'alarme « pression oxygène », l'avion partant ensuite en piqué.



La représentation du facteur de charge en fonction du temps montre que, pendant la réalisation du demi huit cubain, le facteur de charge ne fait que diminuer jusqu'à l'apogée (A) de la figure. Le temps pour arriver à ce point est également plus conséquent que pendant l'exécution des boucles.

5. EFFETS DU STRESS

Le stress est la réaction naturelle d'un individu lorsqu'il est confronté à une situation ressentie comme dangereuse ou qu'il ne maîtrise pas parfaitement, car il ne dispose pas d'une réponse immédiatement disponible pour y faire face.

Le niveau de stress est proportionnel à l'écart entre la représentation de ce qu'il sait faire et la représentation de ce que la situation qu'il rencontre exige qu'il fasse.

Plus cet écart est important, plus le niveau de stress est élevé. L'individu doit construire une solution adaptée pour faire face à une situation inconnue et risquée à partir de ses connaissances propres.

Il existe des facteurs de stress professionnel et extra professionnel. Leurs effets se cumulent.

Pour qu'un individu soit performant, il doit être soumis à un niveau de stress minimum. En revanche, comme la gestion du stress consomme beaucoup de ressources, la performance se dégrade brutalement au-delà d'un certain seuil et conduit à :

- des « délestages » et des oublis inconscients de procédures mêmes bien automatisées,
- des arrêts de communication,
- des pertes des acquis récents encore mal assimilés,
- une focalisation sur un seul aspect de la situation.

6. MANŒUVRE DE « G-WARM UP »

6.1. OBJECTIFS DE LA MANŒUVRE DE G-WARM UP

La manœuvre de *G-warm up* a plusieurs objectifs :

- au plan physiologique, elle permet à chacun des membres de l'équipage :
 - ⇒ d'assurer un *échauffement* de son appareil circulatoire,
 - ⇒ d'évaluer sa tolérance au facteur de charge selon son état du moment, cette tolérance dépendant de variables physiologiques, psychologiques et physiques,
- au plan technique, elle permet à l'équipage de s'assurer du bon fonctionnement de ses équipements anti-G.

En France, cette manœuvre n'est jamais effectuée en école et sans systématisation dans les unités de combat. A contrario, dans différents pays étrangers (États-unis, Pays-Bas, Canada, etc.), cette manœuvre est systématiquement réalisée dès la formation en école.

6.2. REALISATION DE LA MANŒUVRE DE « G-WARM UP »

Cette manœuvre s'effectue en deux temps. Tout d'abord, le pilote réalise un virage sous faible facteur de charge afin de se « *chauffer* », de prendre conscience de la bonne exécution de ses manœuvres musculo-ventilatoires et de tester ses équipements anti-G. Puis, dans un deuxième temps, il réalise un virage sous fort facteur de charge afin d'évaluer sa performance du moment. Le pilote prend alors le temps de bien prendre conscience de cette performance et mentalement déclare sa tolérance à « X G ». Il sait alors que, pendant le vol, il devra être vigilant dès qu'il approchera de cette valeur « X ».

6.3. RETOUR D'EXPERIENCE

Bien qu'en France les pilotes doutent de l'efficacité du *G-warm up*, plusieurs témoignages montrent que des événements auraient pu être évités si cette manœuvre avait été réalisée. Plus spécifiquement on pourra citer deux retours d'expérience :

➤ NMR 2003 EXP 0046 :

« GVQ des réveils moins mouvementés. L'obscurité; le silence; une petite lumière au fond du couloir. La sensation d'être bien, de se réveiller doucement. Puis tout s'accélère, je ne suis pas dans mon lit mais dans un 2000. Vite... Lire les paramètres.

Le cerveau fonctionne plus vite que les capteurs, je repense à une conversation avec mon épouse sur le G-LOC : si tout va bien le PA est enclenché et je suis à 60° d'inclinaison mais avec quelle assiette ? Ou bien tout va mal et je suis à mach 1.5, 60° de piqué à 500 ft ? Le cerveau a compris que tout cela était joué et qu'il fallait attendre les données des capteurs.

Tout cela a duré moins de 2 secondes et je vois maintenant les paramètres en VTH : visu approche et vecteur vitesse sur l'horizon sans étoile, le PA ne pilote pas.

Je ne vois pas de piste à midi je décide de remettre les gaz et de traiter les patates avec une pente positive. Étrange, mes mains étaient en hauteur, je me jette sur les commandes.

C'est ta main que je sens la ? Tiens on parle dans mon casque et la situation devient un peu plus claire : je suis en place arrière ouf ! Nous sommes en dernier virage.

Voilà les choses telles qu'elles ont été ressenties et les premiers enseignements à chaud. Une première leçon sur le réveil en G-LOC, la désagréable sensation de savoir qu'on ne pilote pas l'avion et qu'on n'a pas encore les moyens de le piloter. Dommage de ne pas l'avoir vécu en centrifugeuse.

Ensuite avec un peu d'analyse le jour même quelque chose qui me chiffonne. Pourquoi un G-LOC à 7 G au break après plus de 1000 heures sur 2000 ? 5 vols en deux jours prévus, une fatigue due à de la fièvre depuis deux jours, le fait d'être en backseat et enfin un profil de mission pas très rusé : après 45 minutes de vol BA avec un max de 2 G, une arrivée au break à 450kt et la prise très rapide des 7 G pour s'en mettre plein la culotte ! Je me suis pourtant préparé à ce break; respiration bloquée et mains sur les poignées.

Et à 7 G les poumons se dégonflent et je sens que je pars, mais sans avoir les commandes la volonté de relâcher ne s'exprime pas. Les 7 G durent 10 secondes et la communication avec la place avant se fait 18 secondes après le départ au break. La perte de connaissance a probablement duré 2 à 3 secondes.

En fait la totalité de l'explication m'arrive deux jours plus tard car les raisons trouvées initialement ne me suffisent pas; j'ai déjà pris 9 G en place arrière sans broncher.

Ce vol était au décollage d'un terrain étranger, à 17 h 00, deux facteurs qui font qu'il apparaît possible que le pistard ne m'ait pas branché l'anti-G. Le pilote place avant me confirme qu'il a également faillit s'éteindre et qu'il a relâché dans le break et le pistard qui nous a débréler me conforte en disant que les interrupteurs anti-G étaient sur arrêt et qu'il pensait que nous les avions coupés après le vol...

Une leçon sur le réveil, une leçon sur le G-warm up et la leçon la plus simple : le respect des procédures, il suffisait de tester l'anti-G nous même avant le décollage, ce que nous avons négligé de faire malgré notre grande expérience sur 2000. »

➤ NMR 2002103003 :

« G-LOC (Loss Of Consciousness)

Lors d'une mission de combat, au FL 210, mach 0,99, le n...2 d'une PL exécute une manoeuvre à 8 G dans le plan vertical afin de se soustraire à un tir. Lors de cette manoeuvre le pilote perd connaissance. Dix secondes plus tard, reprenant connaissance, il effectue une sortie de piqué, stable au FL 140, il annonce "stop combat" à trois reprises. Il passe O2 sur 100% surpression. Les verifs cabine montrent un disfonctionnement du test anti-G. Le pilote n'est pas en condition physiologique d'assurer un atterrissage immédiat. Le retour est donc effectué avec atterrissage sur longue finale avec parachute. »

7. INSTRUCTION CONDUITE DANS LES ARMEES ETRANGERES SUR LA TOLERANCE AU FACTEUR DE CHARGE

Des pilotes étrangers (États-Unis, Pays-Bas et Canada), en échange dans des unités opérationnelles en France, ont fait part de leur expérience concernant leur formation en vue d'optimiser et d'évaluer leur tolérance au facteur de charge⁵⁵.

D'une façon générale, on note :

- qu'une formation spécifique à la « résistance au facteur de charge » est réalisée dès le début du cursus en école,
- que cette formation, qui allie théorique et pratique en centrifugeuse, est dispensée à plusieurs reprises pour chaque pilote de combat,
- qu'elle est qualifiante pour tout pilote de combat devant être affecté sur un avion catégorisé comme « avion à haut facteur de charge »,
- que la manœuvre de *G-warm up* est enseignée en école et est systématiquement pratiquée en vol⁵⁶. Pour chaque mission, cette manœuvre fait l'objet d'un point particulier au briefing,
- que le suivi et le contrôle de la bonne application des manœuvres musculo-ventilatoires sont assurés en école comme en unité. Plus spécifiquement, tant qu'un pilote n'a pas acquis une compétence suffisante, à chacun de ses vols sa cassette audio est débriefée, en particulier pendant la réalisation du *G-warm up*, afin de juger de la qualité des manœuvres ventilatoires,
- que pour tout pilote, qu'il soit affecté en unité ou qu'il soit abonné, un contrôle par l'écoute de la cassette audio pendant l'accomplissement du *G-warm up* est effectuée au moins une fois par an, en présence d'un médecin du personnel navigant et d'un pilote du niveau de commandant d'escadrille ou officier de sécurité des vols. Cette audition permet de s'assurer de la bonne application des manœuvres ventilatoires.

⁵⁵ La documentation qui a été transmise est sous la forme de trois fichiers au format *Adobe Reader* accompagnant le présent rapport.

⁵⁶ Excepté en vol de nuit et en conditions de vol sans visibilité.

8. ROLE DU « SURVEILLANT SOLO »

Le paragraphe 6.2 *Contrôle des vols solo* de l'ordre 3A des CPSV du CEAA précise le rôle de l'instructeur chargé de la surveillance d'un vol d'un élève solo. Cette disposition, commune aux écoles, permet de s'assurer de la présence en vol, d'un instructeur confirmé apte à assister voire à rassembler cet élève, le cas échéant.

A la Division des vols de Salon de Provence, ce pilote assure le briefing, avant le vol, avec les élèves pilotes dont il aura la charge.

9. EXAMEN DU SIEGE EJECTABLE

9.1. TENTATIVE D'EJECTION

Cette annexe permet d'évaluer, au vu du siège éjectable, s'il y a eu une tentative d'éjection de la part de l'élève pilote.

9.1.1. Examen technique

Après avoir répertorié tous les éléments des sièges en état d'être analysés (poignée d'éjection, cartouches siège) et dissocier les éléments des sièges avant et arrière, les résultats de l'investigation sur les lieux de l'accident (planche 1) ont montré que :

- sur le siège éjectable MK8 avant (siège de l'élève pilote) :
 - ⇒ la goupille de sécurité n'est pas positionnée sur le bloc de commande,
 - ⇒ la commande d'éjection est abîmée mais en place dans son logement,
 - ⇒ la cartouche de mise à feu de la poignée basse est percutée,
 - ⇒ toutes les autres cartouches et notamment celles du canon d'éjection n'ont pas été percutées.
- sur le siège éjectable MK8 arrière :
 - ⇒ la goupille de sécurité est présente dans le bloc de commande,
 - ⇒ la cartouche de mise à feu de la poignée basse n'est pas percutée,
 - ⇒ la cartouche principale du canon d'éjection n'a pas été percutée.

9.1.2. Analyse des hypothèses techniques

- 1^{ère} hypothèse : blocage de la commande d'éjection par la goupille de sécurité.

L'analyse du système de verrouillage de la commande d'éjection n'a montré aucune présence de la goupille de sécurité ni de morceau de métal de cette goupille dans son emplacement.

L'hypothèse d'un blocage de la commande d'éjection par la goupille de sécurité est donc rejetée.

- 2^{ème} hypothèse : difficulté de retrait de la commande d'éjection.

Un essai a été effectué en atelier afin de mesurer l'effort nécessaire au retrait de la commande de son logement. L'effort mesuré a été de 13 daN. Selon la documentation en vigueur (MB 370-F, 2B15, chapitre 11.2), l'effort doit être compris entre 6,7 et 20 daN.

Ce résultat montre que la force d'extraction de la commande est normale et que l'élève pilote n'aurait pas eu de difficulté particulière à extraire la commande.

L'hypothèse d'une difficulté de retrait de la commande d'éjection est donc rejetée.

- 3^{ème} hypothèse : interruption de la séquence d'éjection.

L'analyse des différents éléments retrouvés sur place prouve qu'il n'y a pas eu d'initialisation de la séquence d'éjection :

⇒ la commande d'éjection est en place,

⇒ le percuteur pyrotechnique de mise à feu de la cartouche principale n'a pas été sollicité par les gaz produits par la cartouche d'initiation du mécanisme de mise à feu de la poignée d'éjection,

⇒ la totalité des cartouches du canon d'éjection ne sont pas percutées ainsi que celles des mécanismes de rappel de harnais, de mise en œuvre du parachute-stabilisateur-extracteur (PE), de séparation siège pilote (MDR) et de séparation manuelle,

⇒ les tubes interne et intermédiaire sont dans le tube externe,

⇒ au regard de ces éléments énoncés supra, la percussion de cartouche d'initiation a été réalisée lors de la dislocation de siège à l'impact et non sur une action du pilote.

L'hypothèse d'une interruption de la séquence d'éjection est donc rejetée.

9.2. CONCLUSION SUR UNE EVENTUELLE TENTATIVE D'EJECTION

L'analyse des différents éléments du siège éjectable montre que, si la séquence d'éjection avait été initialisée par le pilote avant l'impact, le siège aurait fonctionné de façon nominale.

10. SYSTEMES D'ALARMES

L'avion est équipé d'un système :

- de voyants d'alarme,
- d'avertisseurs sonores,
- d'annonce.

10.1. SYSTEME DE VOYANTS D'ALARME

Ce système est constitué :

- d'un tableau d'alarmes multiples constitué de voyants rouges et ambres selon la gravité de la panne détectée,
- de deux voyants d'alarme générale :
 - ⇒ rouge portant l'inscription « WARNING »,
 - ⇒ ambre avec l'inscription « CAUTION ».

La détection d'une panne provoque l'allumage du voyant associé, rouge ou ambre, sur le tableau d'alarmes multiples. Il reste allumé tant que la panne n'est pas résorbée. Simultanément, l'allumage de ce voyant génère l'allumage du voyant d'alarme générale correspondant « WARNING » ou « CAUTION ». Ce voyant peut être réarmé en appuyant dessus, permettant sa réactivation pour une nouvelle panne éventuelle. L'arrêt de ce voyant n'affecte pas le tableau d'alarmes multiples.

10.2. SYSTEME AVERTISSEUR SONORE

Ce système permet d'envoyer aux équipements de tête du pilote des signaux auditifs caractéristiques de situations particulières :

- facteur de charge excessif,
- incidence excessive,
- vitesse excessive,
- allumage du voyant « WARNING ».

Ainsi, le signal sonore émis lors de l'allumage de l'alarme générale « WARNING », cesse dès que cette alarme est réarmée.

10.3. SYSTEME D'ANNONCE

Un panneau d'annonces, composé de voyants verts, est destiné à signaler le fonctionnement de certains systèmes (dégivrage etc.).

11. FONCTIONNEMENT DE LA BALISE DE DETRESSE

La balise de détresse est armée en permanence. Elle fonctionne avec des piles alcalines et se déclenche suite à un choc frontal supérieur à 5 G (système de masselottes). L'autonomie de fonctionnement après impact est de 48 heures.

Selon la société EMBRAER, cette balise doit résister à un impact de 50 G sans précision de résistance à la pression.

Or, les normes des balises de détresse ont évoluées et sont fixées par l'ED-62 de l'EUROCAE. Elles précisent que les nouvelles balises doivent supporter 500 G et résister à l'écrasement sous des pressions de 690 kPa pendant plus de 5 minutes.