

Bureau enquêtes accidents pour la sécurité de l'aéronautique d'État

Rapport d'enquête de sécurité



A-2018-10-I

Date de l'évènement	3 août 2018
Lieu	Base aérienne 116 de Luxeuil Saint-Sauveur (Haute-Saône)
Type d'appareil	Mirage 2000
Organisme	Armée de l'air

AVERTISSEMENT

UTILISATION DU RAPPORT

L'unique objectif de l'enquête de sécurité est la prévention des accidents et incidents sans détermination des fautes ou des responsabilités. L'établissement des causes n'implique pas la détermination d'une responsabilité administrative civile ou pénale. Dès lors toute utilisation totale ou partielle du présent rapport à d'autres fins que son but de sécurité est contraire à l'esprit des lois et des règlements et relève de la responsabilité de son utilisateur.

COMPOSITION DU RAPPORT

Les faits, utiles à la compréhension de l'évènement, sont exposés dans le premier chapitre du rapport. L'identification et l'analyse des causes de l'évènement font l'objet du deuxième chapitre. Le troisième chapitre tire les conclusions de cette analyse et présente les causes retenues.

Le BEA-É formule ses recommandations de sécurité dans le quatrième et dernier chapitre.

Sauf précision contraire, les heures figurant dans ce rapport sont exprimées en heure légale française.

CRÉDITS

		Page de garde
Figure 1	SIRPA AIR	
Figure 1	DIRCAM	11
Figure 2	Gendarmerie de l'air	12
Figures 3 et 4	Armée de l'air	12
Figures 5 à 7	Armée de l'air	13
Figures 8 et 9	Armée de l'air	16
Figure 10	Dassault Aviation	17
Figures 11 et 12	Armée de l'air	18
Figure 13	DMAé	19
Figures 14 à 16	RESEDA/BEA-É	22 à 26

TABLE DES MATIÈRES

AVERTISSEMENT	2
CRÉDITS	2
TABLE DES MATIÈRES	3
GLOSSAIRE	4
SYNOPSIS	5
1. Renseignements de base	7
1.1. Déroulement du vol	7
1.2. Dommages corporels	8
1.3. Dommages à l'aéronef	8
1.4. Autres dommages	8
1.5. Renseignements sur l'équipage	8
1.6. Renseignements sur l'aéronef	9
1.7. Conditions météorologiques	10
1.8. Aide à la navigation	10
1.9. Télécommunications	10
1.10. Renseignements sur l'aéroport	11
1.11. Enregistreurs de bord	12
1.12. Constatations sur la zone et sur l'aéronef	12
1.13. Renseignements médicaux	13
1.14. Incendie	14
1.15. Questions relatives à la survie des occupants	14
1.16. Essais et recherches	14
1.17. Renseignements sur les organismes	14
1.18. Renseignements supplémentaires	15
2. Analyse	21
2.1. Résultats des expertises	21
2.2. Recherche des causes de l'évènement	21
3. Conclusion	27
3.1. Éléments établis utiles à la compréhension de l'évènement	27
3.2. Causes de l'évènement	27
4. Recommandations de sécurité	29
4.1. Mesures de prévention ayant trait directement à l'évènement	29
4.2. Mesures n'ayant pas trait directement à l'évènement	30

GLOSSAIRE

BA	base aérienne
CAM	circulation aérienne militaire
CEMPN	centre d'expertise médicale du personnel navigant
CFA	commandement des forces aériennes
DGA	direction générale de l'armement
DIRAV	système permettant de diriger le train auxiliaire à l'aide des palonniers
DIRCAM	direction de la circulation aérienne militaire
DMAé	direction de la maintenance aéronautique (ex SIMMAD)
EAC	école de l'aviation de chasse
EC	escadron de chasse
ESTA	escadron de soutien technique aéronautique
FDR	<i>flight data recorder</i> - enregistreur de paramètres de vol
Jx	accélération longitudinale (suivant l'axe de roulis)
Jz	accélération verticale (suivant l'axe de lacet)
kt	<i>knot</i> - nœud
NOSA	navigateur officier systèmes d'armes
PAPI	<i>precision approach path indicator</i> - indicateur de pente d'approche
PDL-CTS	pod de désignation laser - caméra thermique synergie
SPAD	système perfectionné d'anti-dérapage
UCB	manuel d'utilisation
VSU	visite systématique à l'unité
VTH	visualisation tête haute

SYNOPSIS

Date et heure de l'évènement : 3 août 2018 à 00h15

Lieu de l'évènement : base aérienne (BA) 116 de Luxeuil Saint-Sauveur

Organisme : armée de l'air

Commandement organique : commandement des forces aériennes (CFA)

Unité : escadron de chasse (EC) 1/3 « Navarre »

Aéronef : Mirage 2000D

Nature du vol : vol d'entraînement

Nombre de personnes à bord : 2

Résumé de l'évènement selon les premiers éléments recueillis

Le 3 août 2018, après un vol d'entraînement de nuit, un Mirage 2000D effectue un atterrissage sur la piste 29 de la BA 116 de Luxeuil Saint-Sauveur. Après avoir touché la piste sur les atterrisseurs principaux, le pilote effectue un freinage aérodynamique puis pose l'atterrisseur auxiliaire. Il actionne les freins et ressent immédiatement des vibrations. Après plusieurs tentatives de freinage, le pilote passe sur « freins 2¹ » puis déploie le parachute de l'aéronef. Le phénomène de vibrations persistant, et jugeant le freinage insuffisant, le pilote demande à la tour le relevage de la barrière d'arrêt. L'aéronef engage celle-ci à une vitesse d'environ 45 kt et s'arrête 120 mètres après.

Les secours interviennent et sécurisent l'avion, ce qui permet à l'équipage d'évacuer.

Composition du groupe d'enquête de sécurité

- un directeur d'enquête de sécurité du bureau enquêtes accidents pour la sécurité de l'aéronautique d'État (BEA-É) ;
- un expert technique (BEA-É) ;
- un officier pilote ayant une expertise sur Mirage 2000D ;
- un officier mécanicien ayant une expertise sur Mirage 2000D ;
- un médecin breveté de médecine aéronautique.

Autres experts consultés

- direction générale de l'armement - Essais propulseurs (DGA EP)/restitution des enregistreurs de données d'accidents (RESEDA) ;
- direction générale de l'armement - Techniques aéronautiques (DGA TA) ;
- Dassault Aviation.

¹ Le frein 2 est le système de freinage de secours qui ne dispose pas de dispositif anti-patinage.

PAS DE TEXTE

1. RENSEIGNEMENTS DE BASE

1.1. Déroulement du vol

1.1.1. Mission

Type de vol : CAM² I et CAM T

Type de mission : vol d'entraînement

Dernier point de départ : BA 116 de Luxeuil Saint-Sauveur (LFSX)

Heure de départ : 22h35 le 2 août 2018

Point d'atterrissage prévu : BA 116 de Luxeuil Saint-Sauveur (LFSX)

1.1.2. Déroulement

1.1.2.1. Préparation du vol

Un vol d'entraînement à deux avions est programmé pour la nuit du 2 au 3 août 2018. Il s'agit dans un premier temps d'une mission d'appui au sol au profit d'une unité stationnée dans le secteur d'Orléans puis dans un deuxième temps d'un exercice de recueil³ au profit de l'équipier.

Les équipages préparent la mission à partir de 15h00. Le briefing de la mission se déroule à 20h45 et dure 30 minutes.

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

Après la mission d'appui au sol, l'exercice de recueil se déroule jusqu'à l'approche finale sur la piste de Luxeuil Saint-Sauveur. Considérant le carburant restant, le leader décide d'arrêter l'exercice et ordonne à son équipier de se poser en premier.

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

À 00h15, l'équipier se pose en piste 29 à 153 kt. Le toucher des atterrisseurs principaux s'effectue par le travers du PAPI, soit 256 mètres après l'entrée de bande. Il lui reste alors 2 207 mètres jusqu'à la barrière. Le pilote effectue un freinage aérodynamique en maintenant une assiette à cabrer. Neuf secondes plus tard, il pose l'atterrisseur auxiliaire. Le navigateur officier systèmes d'armes (NOSA) confirme une vitesse de 107 kt alors que l'avion passe le repère 1 200 mètres restants. Le pilote actionne les freins et ressent de fortes vibrations. Après plusieurs actions sur les freins, il sélectionne le système de « freins 2 », actionne le parachute et reprend le freinage. Le pilote ressent à nouveau des vibrations. Constatant une vitesse élevée et jugeant la distance restante insuffisante pour arrêter l'avion, il demande à la tour d'activer la barrière. Le pilote coupe le moteur et la batterie juste avant d'engager la barrière à une vitesse d'environ 45 kt. L'avion s'immobilise 120 mètres plus loin. L'équipage attend les secours en maintenant une veille radio. Les secours interviennent trois minutes plus tard. Compte tenu de l'engagement barrière, le leader se déroute sur la BA 113 de Saint-Dizier.

² CAM : circulation aérienne militaire.

CAM I : abréviation utilisée pour désigner les règles de vol CAM aux instruments.

CAM T : abréviation utilisée pour désigner les règles de vol CAM tactique.

³ Exercice de recueil : exercice qui consiste, pour un équipage, à prendre en compte un aéronef subissant une panne en effectuant un rassemblement et un déroutement sur un terrain.

1.1.3. Localisation

- Lieu :
 - pays : France
 - département : Haute-Saône
 - commune : Saint-Sauveur
 - coordonnées géographiques : N 47°47'17"/E 6°21'35"
 - hauteur du lieu de l'évènement : au sol
- Moment : nuit
- Aérodrome le plus proche au moment de l'évènement : BA 116 de Luxeuil Saint-Sauveur

1.2. Dommages corporels

L'équipage est indemne.

1.3. Dommages à l'aéronef

L'aéronef est endommagé.

1.4. Autres dommages

La barrière d'arrêt a été endommagée.

1.5. Renseignements sur l'équipage

1.5.1. Membres d'équipage de conduite

1.5.1.1. Commandant de bord : navigateur officier système d'armes en place arrière

- Âge : 34 ans
- Unité d'affectation : EC 1/3 « Navarre »
- Formation :
 - qualification : chef navigateur
 - école de spécialisation : école de l'aviation de chasse (EAC) de Tours
 - année de sortie d'école : 2007
- Heures de vol comme navigateur :

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	sur tout type	dont M2000D	sur tout type	dont M2000D	sur tout type	dont M2000D
Total (h)	1 868	1 162	126	126	12	12
Dont nuit	300	150	20	20	2	2

Date du dernier vol sur Mirage 2000D : 1^{er} août 2018 de jour et 24 juillet 2018 de nuit.

1.5.1.2. Pilote aux commandes

- Âge : 33 ans
- Unité d'affectation : EC 1/3 « Navarre »
- Formation :
 - qualification : pilote à l'instruction⁴
 - école de spécialisation : école de l'aviation de chasse (EAC) de Tours
 - année de sortie d'école : 2012
- Heures de vol comme pilote :

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	sur tout type	dont M2000D	sur tout type	dont M2000D	sur tout type	dont M2000D
Total (h)	1 700	160	68	68	8	8
Dont nuit	63	21	10	10	1	1

- Date du dernier vol sur Mirage 2000D : 31 juillet 2018 de jour et 12 juin 2018 de nuit.

1.6. Renseignements sur l'aéronef

- Organisme : armée de l'air
- Commandement d'appartenance : CFA
- Aérodrome de stationnement : BA 133 « Henri Jeandet » de Nancy-Ochey
- Unité d'affectation : escadron de soutien technique aéronautique (ESTA) 15.003 « Malzeville »
- Type d'aéronef : Mirage 2000D
 - configuration : Bravo (2 RPL⁵ de 2 000 litres sous voilure) + 1 PDL-CTS⁶ en point latéral avant droit
 - armement : 01 GBU-49⁷ d'entraînement
- Caractéristiques :

	Type-série	Numéro	Heures de vol totales	Heures de vol depuis	Heures de vol depuis
Cellule	Mirage 2000D	645	3 924 h	VO5 ⁸ : 676 h	VG ⁹ : 190 h
moteur	M53-P2	60 109	5 422 h	VN ¹⁰ : 80 h	

1.6.1. Maintenance

L'examen de la documentation technique témoigne d'un entretien conforme au programme de maintenance en vigueur dans l'armée de l'air.

⁴ Ce pilote a une expérience de moniteur à l'École de l'air pendant trois ans et demi. Il a ensuite reçu une formation sur Mirage 2000 à Orange pendant six mois avant d'être affecté à Nancy.

⁵ RPL : réservoir pendulaire largable.

⁶ PDL-CTS : pod de désignation laser - caméra thermique synergie.

⁷ GBU : *guided bomb unit* - système d'armement guidé.

⁸ VO5 : visite réalisée par l'atelier aéronautique de Clermont-Ferrand (AIA-CF).

⁹ VG : visite de graissage.

¹⁰ VN : visite normale.

1.6.2. Performances

Les distances de freinage calculées dans les conditions météorologiques et de masse avion le jour de l'évènement sont :

- 1 550 mètres pour une piste sèche sans utilisation du parachute frein ;
- 860 mètres pour une piste sèche avec utilisation du parachute frein dès le poser de la roulette de nez.

Ces performances sont calculées avec un freinage maximal (énergie normale) et avec application du manche à cabrer pour créer une hypo-sustentation.

1.6.3. Masse et centrage

Au moment de l'évènement, la masse avion est de 10 860 kilogrammes. Le centrage est dans les normes.

1.6.4. Carburant

- Type de carburant utilisé : F-34
- Quantité de carburant au moment de l'évènement : 1 tonne

1.6.5. Autres fluides

Le liquide hydraulique utilisé pour le freinage est le H-515.

1.7. Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques sur la plateforme au moment de l'évènement sont les suivantes : le vent est calme, le ciel est clair, la visibilité est supérieure à 10 kilomètres, la température est de 21,4 °C, le QNH¹¹ est de 1 020 hPa et le QFE¹² de 988 hPa. La piste est sèche.

1.8. Aide à la navigation

Sans objet.

1.9. Télécommunications

Au moment de l'atterrissage, l'équipage est en contact radio avec la tour de contrôle sur UHF¹³ et en écoute sur la fréquence VHF¹⁴ de la tour utilisée aussi par les pompiers.

¹¹ Le QNH est la pression atmosphérique ramenée au niveau de la mer.

¹² Le QFE est la pression atmosphérique au niveau du terrain.

¹³ *Ultra high frequency* - ultra haute fréquence.

¹⁴ *Very high frequency* - très haute fréquence.

1.10. Renseignements sur l'aéroport

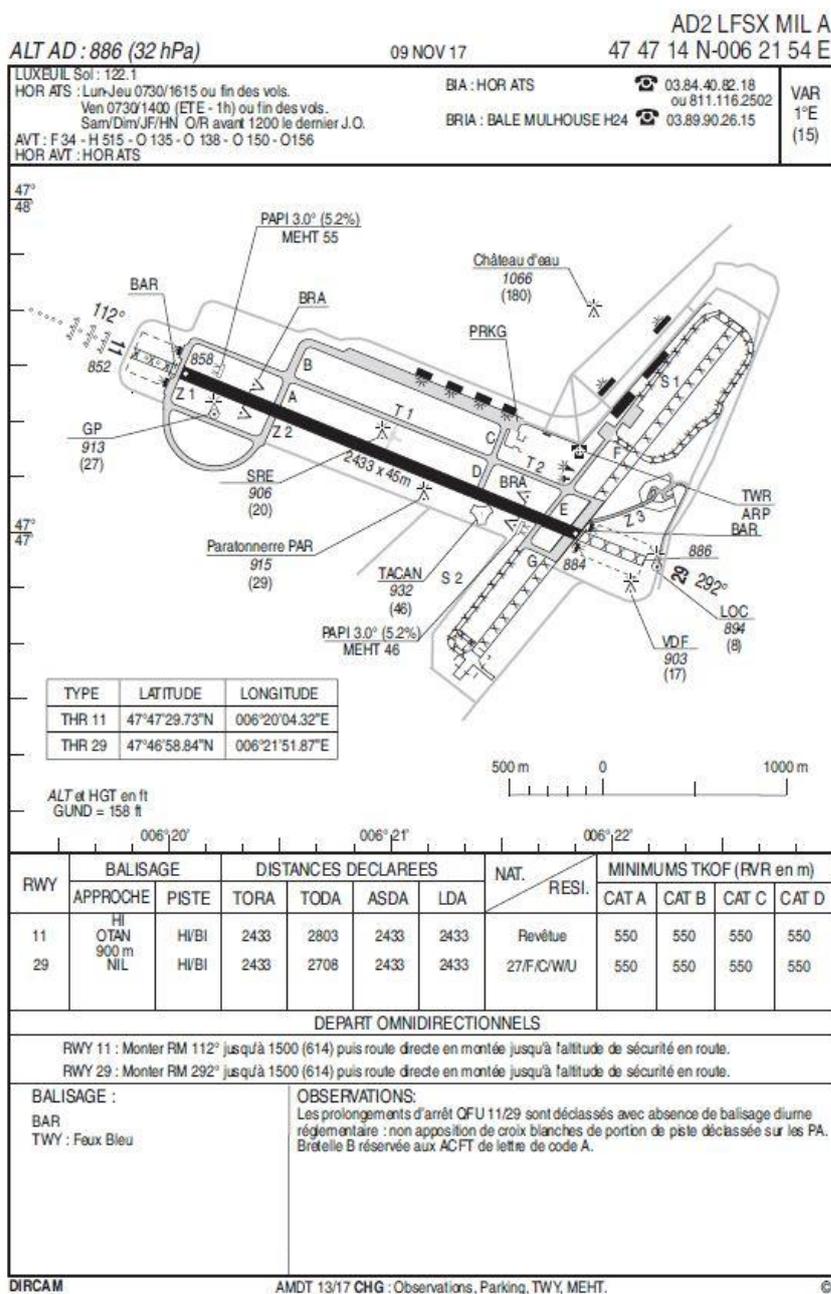


Figure 1 : carte d'aérodrome de Luxeuil Saint-Sauveur

La BA de Luxeuil Saint-Sauveur dispose d'une piste de 2 433 mètres pour l'atterrissage. La piste 29 dispose d'une barrière d'arrêt et, au-delà, d'un espace d'environ 275 mètres. La piste dispose des aides lumineuses nécessaires à la pratique du vol de nuit.

La piste a été inspectée le 13 juin 2018 par le service technique de l'aviation civile afin d'évaluer son adhérence. Les résultats obtenus montrent que les valeurs relevées sont au-dessus des niveaux minimaux de frottement réglementaires.

1.11. Enregistreurs de bord

Les données de l'ESPAR¹⁵ et de la VTH ont pu être exploitées.

1.12. Constatations sur la zone et sur l'aéronef

1.12.1. Examen de la zone

Le filet de la barrière d'arrêt a été endommagé par l'engagement de l'aéronef dans la barrière et par l'intervention des pompiers.



Figure 2 : barrière endommagée

1.12.2. Examen de l'aéronef

Les sondes d'incidence droite et gauche ainsi que la base de la perche de ravitaillement ont été arrachées. Les entrées d'air droite et gauche ont été déformées. Plusieurs éraflures sont présentes sur l'ensemble de l'aéronef, dont les plus importantes sont localisées sur les verrières. La buse du système de conditionnement du PDL-CTS a été en partie arrachée.



Figure 3 : entrée d'air gauche

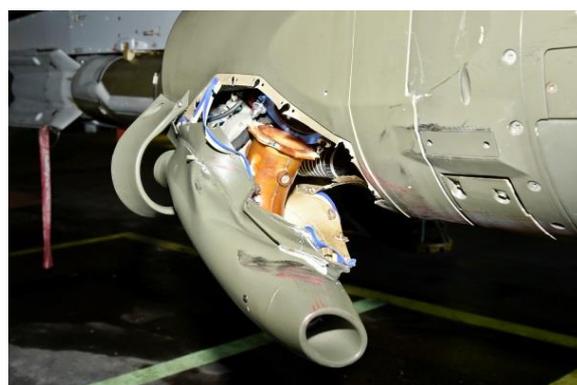


Figure 4 : système de conditionnement du PDL-CTS

¹⁵ ESPAR : système embarqué d'acquisition et d'enregistrement de données.



Figure 5 : verrière



Figure 6 : base de la perche de ravitaillement

L'examen des pneumatiques ne révèle aucun endommagement.



Figure 7 : pneumatiques du train principal non endommagés

1.13. Renseignements médicaux

1.13.1. Membres d'équipage de conduite

1.13.1.1. Commandant de bord : navigateur officier système d'armes en place arrière

- Dernier examen médical¹⁶ :
 - type : visite semestrielle à l'unité effectuée le 25 avril 2018 (référence CEMPN du 31 octobre 2017, apte 12 mois)
 - résultat : apte 6 mois
- Examens biologiques : non effectués
- Blessure : aucune

¹⁶ Selon l'instruction n° 4000/DEF/DRH-AA/SDEPRH-HP/BPECA du 20 avril 2017.

1.13.2. Pilote

- Dernier examen médical :
 - type : visite médicale révisonnaire en centre d'expertise effectuée le 12 avril 2018
 - résultat : apte 12 mois
- Examens biologiques : non effectués
- Blessure : aucune

1.14. Incendie

Néant.

1.15. Questions relatives à la survie des occupants

1.15.1. Engagement du système d'arrêt

Le contrôleur déclenche le relevage de la barrière à la demande du pilote. Les données du FDR et de la VTH permettent d'estimer la vitesse d'engagement de la barrière par l'aéronef à environ 45 kt dans l'axe. Une fois engagé dans la barrière, l'aéronef s'est ensuite légèrement décalé sur la gauche pour s'arrêter 120 mètres plus loin.

1.15.2. Organisation des secours

Après avoir mis en œuvre la barrière à la demande du pilote, le contrôleur aérien actionne le klaxon « crash ». Six pompiers interviennent à bord de trois véhicules. L'équipe arrive sur le lieu de l'intervention trois minutes après le début de l'alerte. Elle est en communication sur la fréquence « sol ». L'équipage de l'avion est en contact sur la fréquence « tour » et est également en écoute sur la fréquence sol mais ne capte aucune communication sur cette dernière. Le chef du dispositif dispose ses véhicules et procède, à défaut d'un contact radio, à un contact visuel avec l'équipage. L'arrivée d'un mécanicien de l'escadron sur place permet au chef du dispositif des secours de le laisser ouvrir les verrières et sécuriser les sièges. L'équipage évacue l'aéronef sans difficulté.

1.16. Essais et recherches

Le système de freinage a été testé localement par l'équipe technique de l'ESTA de Luxeuil Saint-Sauveur.

DGA TA a effectué les analyses techniques des blocs de frein et du commutateur 94G.

RESEDA a procédé à l'analyse des enregistreurs de paramètres.

1.17. Renseignements sur les organismes

L'EC 1/3 « Navarre » est une unité du CFA implantée sur la BA 133 de Nancy-Ochey. Il est placé sous l'autorité du commandant d'escadre de chasse qui est responsable de la programmation de l'activité nécessaire à sa préparation et à son engagement. Cet escadron est temporairement délocalisé à Luxeuil Saint-Sauveur en raison de travaux d'infrastructures à Nancy.

1.18. Renseignements supplémentaires

1.18.1. Le système de freinage

Les freins des Mirages 2000 peuvent être actionnés par deux circuits de freinage distincts commandés tous deux par l'enfoncement des pédales de frein sur le palonnier.

Le freinage normal (circuit hydraulique 1) fonctionne avec le système perfectionné anti-dérapant (SPAD) qui permet de contrôler le freinage de telle sorte que l'adhérence pneu-sol des roues freinées soit aussi près que possible de son maximum, sans blocage des roues.

Le rôle du SPAD est donc de piloter à chaque instant le glissement optimum en fonction de la vitesse de l'avion pour obtenir en permanence le coefficient d'adhérence maximum durant le freinage.

Le freinage secours « freins 2 » agit par l'intermédiaire du distributeur progressif secours sur un deuxième jeu de pistons des blocs frein (circuit hydraulique 2). Le passage sur frein secours peut s'effectuer automatiquement en cas de chute de pression dans le circuit hydraulique 1 ou manuellement par l'utilisation d'un inverseur freins qui permet d'imposer le circuit secours. Dans le cas d'un passage manuel, les freins doivent être relâchés pendant deux secondes afin d'éviter un blocage des roues. Une certaine progressivité d'enfoncement des pédales par le pilote est requise, en l'absence de protection anti-blocage.

1.18.2. La procédure de freinage

En utilisation courante, le pilote peut choisir d'utiliser plusieurs techniques de freinage : le freinage normal et le freinage maximal.

1.18.2.1. Le freinage normal

Lorsque la piste est suffisamment longue, avec une bonne adhérence et en l'absence de panne de freins, le pilote peut utiliser la technique de freinage normal, qui consiste à utiliser le freinage aérodynamique de l'avion, puis à freiner une fois que les trois atterrisseurs sont en contact avec la piste (la vitesse de début de freinage doit alors être atteinte). Le freinage normal ne permet pas d'obtenir la meilleure performance à l'atterrissage (longueur de roulement). Ce type de freinage permet de réduire l'usure normale des freins.

FREINAGE NORMAL

1. Manette des gaz sur ralenti.
2. Garder le nez haut pour assurer un freinage aérodynamique jusqu'à la vitesse de début de freinage.

ATTENTION

**NE PAS TENIR LE NEZ HAUT A $V_i < 100$ kt ;
AUTOCABRAGE RAPIDE A 90 kt PAR COUPURE
AUTOMATIQUE DU LIMITEUR D'INCIDENCE.**

3. Poser le train avant sans brutalité.
4. Enclencher la dirigibilité.
5. Freiner. On peut doser en s'aidant du réticule Jx à la VTH. Valeur moyenne - 0,2 à - 0,3 (sur piste sèche).

NOTA : Lorsque la vitesse de freinage est atteinte, l'utilisation des freins est plus efficace que le freinage aérodynamique (sur piste sèche). La mise en oeuvre de la technique d'hyposustentation apporte un gain supplémentaire en termes de performance de freinage.

Figure 8 : extrait de la procédure « freinage normal » de l'UCB

1.18.2.2. Le freinage maximal

Lorsque la meilleure performance de freinage est requise, le pilote peut utiliser la technique de freinage maximal. Elle consiste à poser la roulette de nez dès que possible et freiner au maximum en appliquant la technique d'hypo-sustentation (position du manche en arrière pour « plaquer » l'avion sur ses trains principaux et améliorer l'adhérence sur la piste).

FREINAGE MAXIMAL

Pour le calcul des éléments de freinage, se reporter au Manuel UCB110-02 - CONFIGURATIONS ET PERFORMANCES DE L'AVION. Les données de performance sont fournies pour une vitesse de début de freinage correspondant à l'énergie de freinage normale ou de détresse, avec ou sans parachute.

1. Manette des gaz sur ralenti.
2. Garder le nez haut pour assurer un freinage aérodynamique jusqu'à la vitesse de début de freinage.
3. Poser le train avant.
4. A $V_i \leq V_i$ de freinage : freiner à fond.
5. Lorsque la décélération est ressentie, mettre le manche plein arrière.
6. Maintenir le freinage jusqu'à l'arrêt complet. Utiliser la dirigibilité dès que nécessaire pour contrer les éventuelles dissymétries de freinage.

NOTA 1 : Sur FREINS 1, le système de freinage permet de maintenir les pédales enfoncées à fond jusqu'à l'immobilisation complète de l'avion (distance minimale de freinage).

NOTA 2 : L'échauffement des freins ne dépend que de la masse avion et de la V_s de début de freinage, et non pas de l'intensité du freinage.

Figure 9 : extrait de la procédure « freinage maximal » de l'UCB

1.18.3. Le broutement

Le broutement est un phénomène qui a été mis en évidence lors de la première décennie d'emploi du Mirage 2000 sur certains avions. Il peut apparaître de façon non systématique lors de l'utilisation du freinage normal uniquement (circuit hydraulique 1). Il se déclenche à l'enfoncement des pédales de frein par le pilote et cela se traduit par des vibrations très importantes.

Le « broutement », aussi appelé « broutage », est une vibration entretenue qui est liée à une instabilité de la boucle complète de l'avion :

- distributeurs hydrauliques ;
- circuits hydrauliques de freinage (10 mètres de tuyaux + servovalves) ;
- blocs frein - interfaces roue/pneu ;
- trains d'atterrissage ;
- structure avion et jambes du pilote ;
- pédaliers d'embellages.

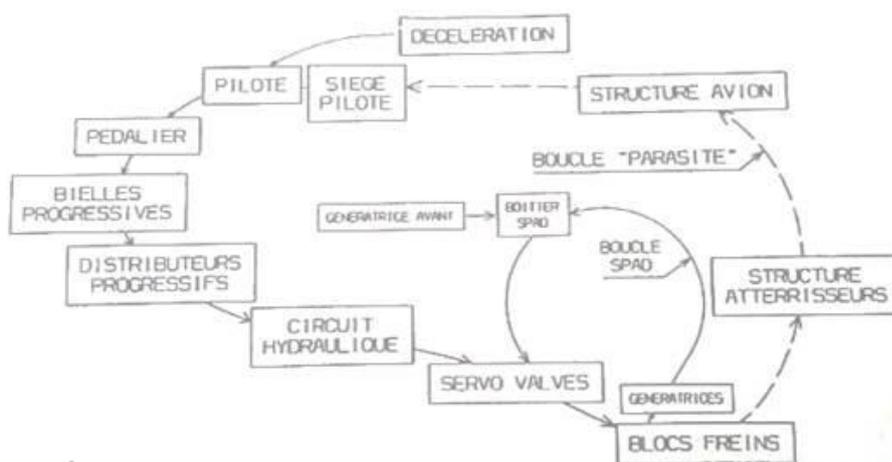


Figure 10 : boucle d'instabilité

La modification 1400 a été développée pour résoudre le problème du broutement : elle consiste à l'ajout d'un accumulateur sur chaque circuit hydraulique de freinage normal (à gauche et à droite), entre le distributeur progressif et les servo-valves; elle permet de dégager une marge de stabilité suffisante et ainsi d'éviter le phénomène.

Pour les avions qui ne disposent pas de cette modification, le phénomène de broutement peut être rencontré au freinage dès le roulage à faible vitesse (20 kt) mais également lors de la phase d'atterrissage. Il se déclenche à l'excitation des pédales de frein par le pilote. Cela se traduit par des vibrations très importantes qui se répercutent au niveau des pressions hydrauliques et ébranlent les trains, puis l'avion tout entier (jusqu'à parfois déclencher les détecteurs d'atterrissage dur).

Il n'existe pas de procédure réglementaire à appliquer lorsque ce phénomène apparaît. Le système de freinage reste opérant même en cas de broutement. Une procédure non publiée a été élaborée par l'armée de l'air française et est instruite aux pilotes. Elle consiste à :

- freiner avec les talons décollés du plancher avion ;
- si le broutement apparaît, relâcher totalement les freins puis les actionner à nouveau ;
- si le broutement persiste, appliquer la procédure « freinage insuffisant à l'atterrissage ».

1.18.4. Procédure de freinage insuffisant à l'atterrissage

La procédure de « freinage insuffisant à l'atterrissage » est une procédure qui a été élaborée par l'escadron de transformation sur Mirage 2000 d'Orange. Elle est utilisée par les pilotes lorsque le broutement persiste.

FREINAGE INSUFFISANT A L'ATTERRISSAGE

Jx compris entre 0 et -0,2 sur piste sèche

- Si longueur de piste suffisante (environ 90 kt/900 m restants en B) et en fonction des conditions (absence de barrière, panne, état de la piste, masse élevée, etc.) :

- 1 - Remettre les gaz
- 2 - SELECTEUR FREINS : 2
- 3 - Consommer le pétrole jusqu'aux minima carburant
- 4 - ATR avec parachute

- Sinon :

- 1 - Sortir le parachute (si installé)
- 2 - Manche AR
- 3 - SELECTEUR FREINS : 2
- 4 - Attendre 2 secondes
- 5 - Freiner modérément (SPAD inopérant)
- 6 - Contrôler le freinage à la VTH : Jx = - 0.2 à - 0.3
- 7 - Se préparer à engager la barrière

NOTA : Le passage de FREINS 1 à FREINS 2 doit être effectué pédales relâchées

Figure 11 : extrait de la procédure « freinage insuffisant à l'atterrissage » (check-list pilote)

Cette procédure diffère de la procédure « Freinage inefficace à l'atterrissage » du manuel de vol du Mirage 2000D (UCB110-01).

FREINAGE INEFFICACE A L'ATTERRISSAGE

NOTA : Si l'état de la piste est dégradé (mouillé, inondé, etc.), il est normal que la décélération soit plus faible qu'à l'accoutumée : dans ces conditions, une faible décélération n'est pas forcément le symptôme d'une panne du système de freinage. Voir PROCEDURES NORMALES - CONTROLE DU Jx LORS DU FREINAGE.

Cette procédure s'applique dans le cas où le freinage est inefficace à l'atterrissage en raison d'une panne du système de freinage de l'avion.

1. Sortir le parachute (si installé).
2. Appliquer la procédure *PASSAGE SUR FREINS : 2 AU SOL*.
3. Contrôler le freinage à la VTH : Jx = - 0,2 à - 0,3 (sur piste sèche).
4. Sortir la crosse (si installée) si nécessaire.

PASSAGE SUR FREINS : 2 AU SOL

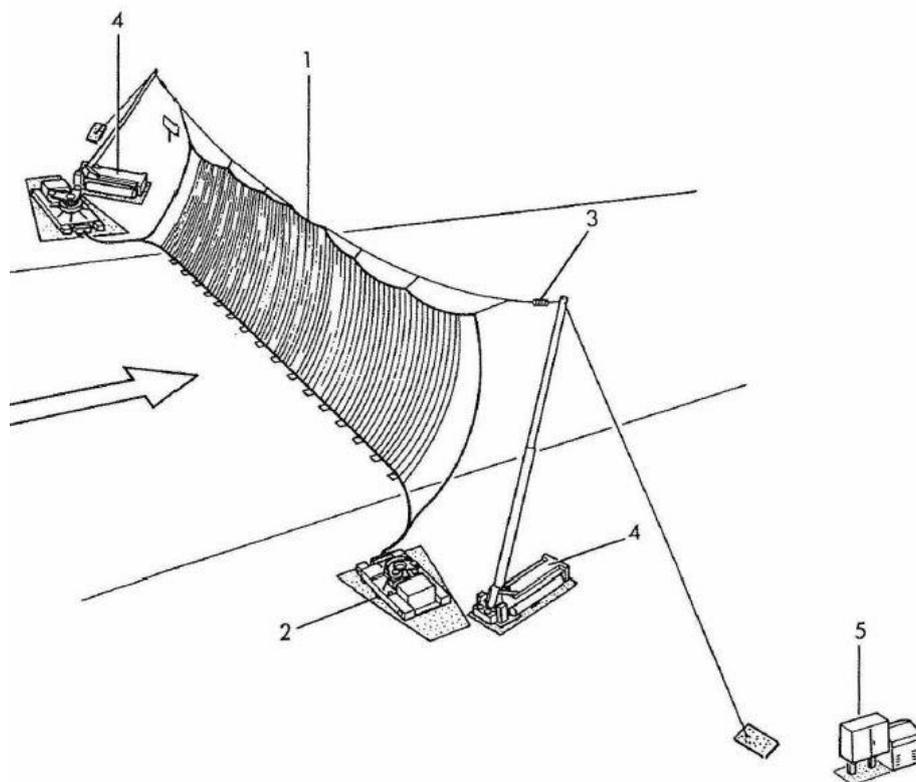
1. Relâcher les freins.
2. Sélectionner FREINS : 2.
3. Attendre 2 secondes.
4. Freiner modérément (SPAD inopérant).

NOTA : Le passage sur FREINS 2 doit être effectué pédales relâchées pour éviter un blocage de roues pouvant entraîner l'éclatement d'un pneumatique.

Figure 12 : procédure freinage inefficace à l'atterrissage

1.18.5. Le système d'arrêt

Le système d'arrêt est constitué d'un filet et d'un système de relevage. Ce dispositif est implanté aux extrémités de piste et permet d'arrêter un aéronef d'une masse maximale de 40 tonnes à une vitesse maximale d'engagement de 190 kt.



- 1- Filet à éléments multiples (F30 ou F40) ; Qté : 1
 - 2- Dispositif de freinage (voir nota) ; Qté : 2
 - 3- Libérateur textile ; Qté : 2
 - 4- Dispositif de relevage type 5 ; Qté : 2
 - 5- Télécommande ; Qté : 1
- } Système d'arrêt complet

Figure 13 : barrière d'arrêt

La barrière d'arrêt se relève si le contrôleur aérien agit sur une commande depuis la tour de contrôle ou si l'avion passe devant des cellules de détection placées en amont de la barrière à une vitesse supérieure à 30 kt.

PAS DE TEXTE

2. ANALYSE

L'analyse qui suit expose les résultats des expertises puis s'attache à identifier les causes de l'évènement.

2.1. Résultats des expertises

Les expertises menées par les services de maintenance de l'armée de l'air n'ont montré aucune défaillance du circuit de freinage (pressions des circuits, test des génératrices tachymétriques, état des bielles, niveau de graissage, jeux...).

Les expertises des blocs de frein et du commutateur 94G réalisées par DGA TA montrent que ces organes ne présentent pas d'anomalies et sont fonctionnels.

L'analyse des pneumatiques n'a montré aucune usure anormale.

Les organes du circuit de freinage, les pneumatiques, le commutateur 94G ne présentent pas d'anomalies et fonctionnent normalement.

2.2. Recherche des causes de l'évènement

2.2.1. Causes techniques

Les expertises n'ont pas détecté de défaillance technique mais un phénomène vibratoire est perçu par l'équipage et enregistré par le FDR.

Un phénomène vibratoire assimilable à un broutement est à l'origine de l'évènement.

2.2.2. Causes environnementales

Le vent était calme et la piste de Luxeuil Saint-Sauveur, au moment de l'évènement, était sèche.

Le service technique de l'aviation civile a effectué en juin 2018 des essais pour mesurer l'adhérence de la piste. Les valeurs relevées se situent au-dessus des niveaux minimaux de frottement réglementaires.

La piste de Luxeuil Saint-Sauveur présentait, au moment de l'évènement, des conditions d'adhérence optimales. Aucun facteur environnemental n'a contribué à l'évènement.

2.2.3. Causes relevant des facteurs organisationnels et humains

2.2.3.1. Technicité de l'atterrissage

Vitesse au poser

Pour se poser, l'équipage adopte une incidence de 14°. La vitesse varie en fonction de la masse de l'avion. À cette incidence, les calculs théoriques prenant en compte la masse de l'avion indiquent une vitesse de poser de l'avion à 148 kt.

L'avion s'est posé à une vitesse de 153 kt.

La vitesse légèrement élevée lors de l'atterrissage a rallongé la distance nécessaire pour arrêter l'avion et a contribué à l'évènement.

Longueur de piste

Au poser des roues, il reste 2 207 mètres de piste utilisable. Quand l'avion passe le repère « 1 200 mètres », la vitesse est de 107 kt, ce qui est dans les normes. Cette longueur est suffisante pour arrêter l'aéronef.

La distance restante à l'atterrissage est suffisante pour arrêter l'aéronef au regard de ses performances de freinage normal.

2.2.3.2. Action sur les freins

Après avoir touché la piste avec le train principal, le pilote, conformément à la procédure, commence par effectuer un freinage aérodynamique puis pose le train avant et enclenche la DIRAV. Le graphique ci-dessous détaille le Jx de l'appareil, c'est-à-dire les décélérations horizontales qu'a subi l'appareil alors qu'il roulait sur la piste. Considérant les investigations techniques effectuées, on peut considérer que les valeurs négatives du Jx correspondent aux actions de freinage du pilote.

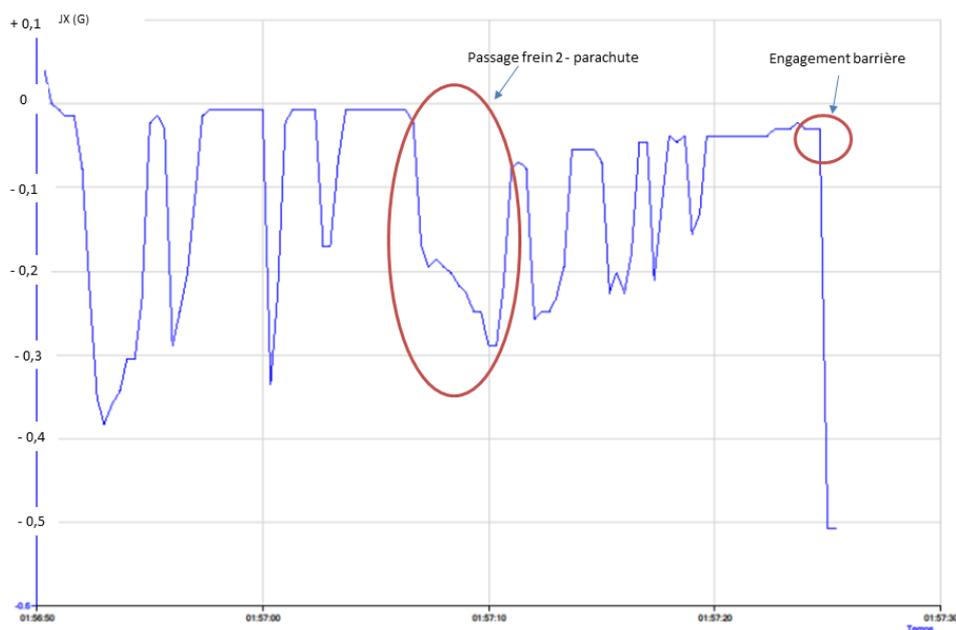


Figure 14 : freinage

La procédure enseignée stipule que le pilote doit contrôler le freinage à la VTH pour obtenir un Jx compris entre 0,2 et 0,3. Ces valeurs ont été obtenues lors des actions de freinage du pilote. Les investigations techniques ainsi que l'analyse du FDR montrent que le système de freinage fonctionnait. Le pilote atteint les valeurs de Jx recommandées lorsqu'il actionne les freins, même pendant le phénomène de broutement.

Les actions sur la commande de freinage permettent d'obtenir le niveau de Jx requis.

2.2.3.3. Broutement

Lorsqu'il a actionné les freins 1, le pilote a immédiatement ressenti de fortes vibrations qu'il a analysées comme étant un phénomène de broutement. Le pilote a alors appliqué la méthode apprise lors de sa transformation sur Mirage 2000 à Orange.

Cette méthode n'apparaît pas dans le manuel de vol. Le broutement n'est pas considéré comme une panne. L'escadron de transformation enseigne néanmoins à ses élèves qu'en cas de broutement, le pilote doit :

- appuyer sur les freins avec les talons décollés du plancher ;
- effectuer des tests de freinage jusqu'à - 0,3 de Jx puis réguler celui-ci entre - 0,2 et - 0,3 ;
- si le phénomène de broutement apparaît, relâcher totalement les freins puis les réactionner à nouveau ;
- si le phénomène persiste, appliquer la procédure « freinage insuffisant à l'atterrissage ».

Par ailleurs, les entraînements au simulateur n'assurent pas l'acquisition des compétences que cette méthode requiert.

La réaction face au broutement est enseignée par l'escadron de transformation d'Orange et s'appuie sur la check-list « freinage insuffisant à l'atterrissage ». La réaction face à ce phénomène ne fait pas l'objet d'un entraînement spécifique.

2.2.3.4. Remise des gaz

Lorsque l'équipage détecte que le freinage est insuffisant, le premier item de la procédure « freinage insuffisant à l'atterrissage » stipule, si les conditions le permettent, de remettre les gaz.

Cette décision n'a jamais été envisagée car le redécollage en cas de défaillance du freinage, et notamment lorsque l'avion utilise une piste équipée d'une barrière d'arrêt, n'est culturellement pas intégré par les équipages. Lorsque l'aéronef est en phase de décélération et que le freinage n'est pas correctement opérant, sachant qu'une barrière peut être utilisée, les pilotes appliquent la procédure consistant à déployer le parachute, à créer une hypo-sustentation et à utiliser le frein 2.

Les ressources cognitives de l'équipage étaient, à ce moment-là, pleinement focalisées sur le freinage.

La procédure de remise de gaz n'a pas été envisagée par l'équipage.

2.2.3.5. Déploiement du parachute

La procédure spécifie que, lorsque le pilote décide d'utiliser le frein secours, il déploie le parachute puis sélectionne « freins 2 ». Cela permet d'utiliser au plus tôt les qualités de freinage aérodynamique du parachute. En effectuant ces opérations dans l'ordre inverse, le pilote a retardé quelque peu le déploiement du parachute et donc l'action et l'efficacité du freinage du parachute.

Le déploiement du parachute après l'action du frein 2 a contribué à diminuer l'efficacité du freinage.

Par ailleurs, contrairement à une idée reçue encore communément partagée par les équipages, le parachute est efficace même à une vitesse inférieure à 100 kt.

2.2.3.6. Freinage avec hypo-sustentation

La procédure enseignée stipule que, en cas de freinage insuffisant, le pilote doit positionner le manche vers l'arrière de façon à créer une hypo-sustentation sur les trains principaux.

Le pilote a tardé à mettre le manche en arrière.

Des simulations ont été effectuées pour calculer la distance de freinage théorique avec et sans hypo-sustentation.

Les hypothèses retenues ont été les suivantes :

- Mirage 2000D estimé à 10,5 t avec :
 - 2 x 2 000 litres,
 - 1 x PDL CTS,
 - 1 x GBU-49 fictive (hypothèse 200 kilogrammes),
 - 1 tonne de carburant restant ;
- piste sèche ;
- pente de piste nulle ;
- sans vent ;
- sans parachute ;
- $T_s = 21,4 \text{ °C}$ / $P_s = 987 \text{ hPa}$;
- $V_{\text{impact}} = 159 \text{ kt}$ puis différé de freinage, avec freinage aérodynamique (incidence à $14,5^\circ$) ;
- $V_{\text{de début de freinage}} = 117 \text{ kt}$.

Les calculs montrent que le freinage avec hypo-sustentation permet d'arrêter l'avion sur 1 610 mètres, alors que sans hypo-sustentation, 1 655 mètres sont nécessaires.

Dans ce cas précis, la différence théorique entre un freinage avec et sans hypo-sustentation est donc de 45 mètres.

Le pilote a tardé à mettre en œuvre le freinage avec hypo-sustentation, ce qui a rallongé la distance d'arrêt de 45 mètres. Ce retard a contribué à l'évènement.

2.2.3.7. Inhibition du pilote au freinage

Le pilote est peu expérimenté sur Mirage 2000. Au cours de ses précédents vols, il a déjà connu des problèmes de broutement, ce qui lui a permis de reconnaître instantanément ce phénomène. Cependant, il n'en avait jamais connu de si intense. En procédant au freinage, des fortes vibrations apparaissent et s'atténuent dès qu'il relâche les freins. Ce phénomène a pu créer une inhibition à appuyer sur les freins suffisamment fréquemment.

La figure 15 représente le Jx du Mirage 2000D n° 645 impliqué, et donc les actions du pilote sur les commandes de frein lors de l'atterrissage. Dans les 34 secondes qui séparent le poser du train auxiliaire jusqu'à l'engagement barrière, le pilote a relâché la pédale de frein sur un temps cumulé de 16,4 s, soit environ la moitié du temps.

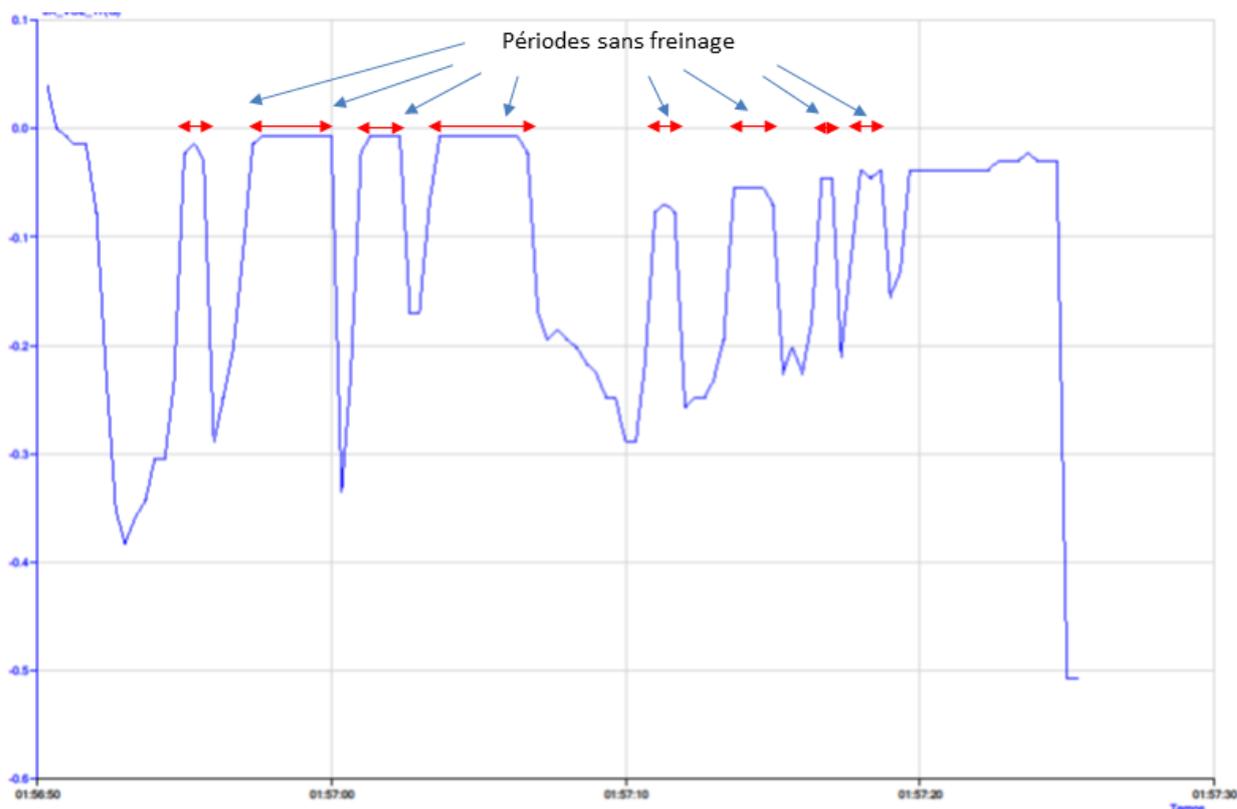


Figure 15 : Jx(g) du Mirage 2000D n° 645 pendant la décélération

Il est probable que le pilote, surpris et déconcerté par l'intensité du broutement ressenti, ait été en partie inhibé pour actionner les freins.

2.2.3.8. Analyse comparative d'actions de freinage en cas de broutement

La figure 16 présente une analyse comparative effectuée sur trois vols et trois équipages différents. À chaque fois, les équipages ont été confrontés à un broutement au cours de l'atterrissage :

- le Mirage 2000D n° 645 et l'équipage impliqué ;
- un Mirage 2000C (« avion témoin n° 1 ») ;
- le Mirage 2000D n° 645 avec un autre équipage (« avion témoin n° 2 »).

La vitesse des deux appareils témoins a pu être contrôlée avant la fin de la piste.

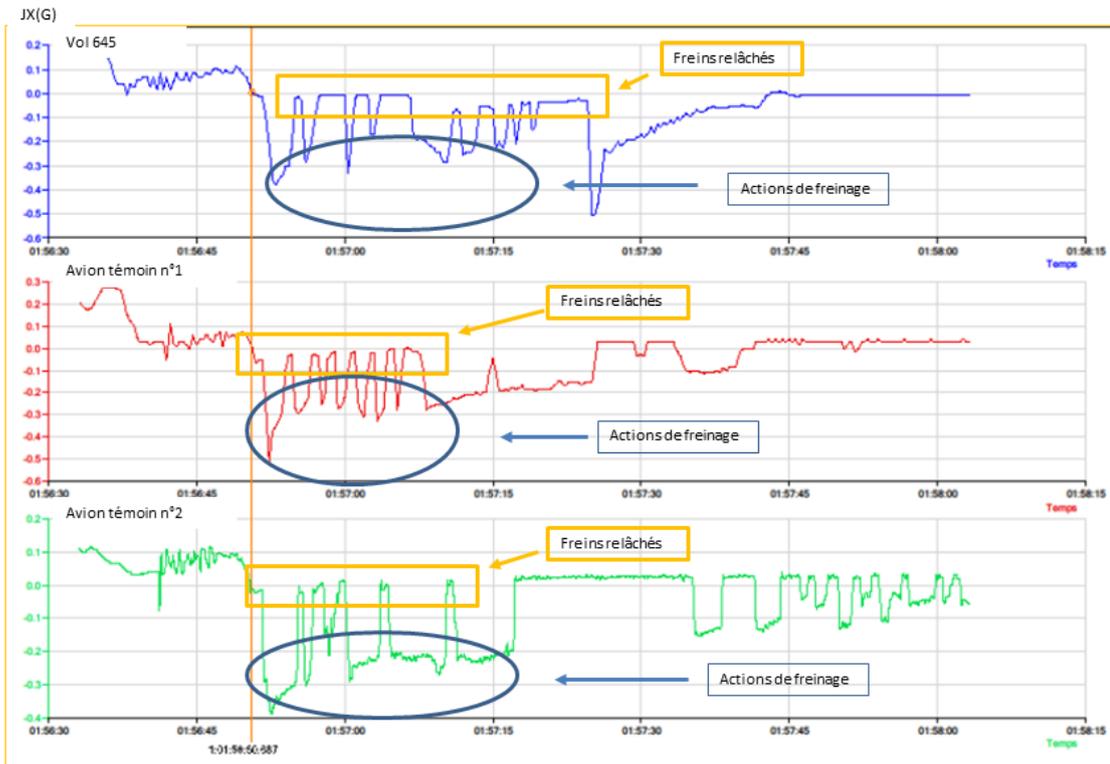


Figure 16 : comparaison d'actions de freinage

Le pilote de l'avion témoin n° 1 actionne souvent les freins et, lorsqu'il les relâche, n'attend pas pour les réactionner à nouveau.

Le pilote de l'avion n° 2 actionne les freins de façon prolongée et, lui non plus, lorsqu'il les relâche, n'attend pas pour le réactionner à nouveau.

Dans les deux cas, les pilotes appliquent la procédure et ne relâchent les freins que sur de très courts instants.

L'analyse des paramètres met en évidence un écart dans la technique mise en œuvre par le pilote de l'appareil objet de l'évènement concernant la fréquence d'action sur les palonniers. En effet, les pilotes qui n'ont pas engagé la barrière ont tenté de maximiser le temps de freinage, même si les techniques adoptées diffèrent.

L'analyse du FDR et la comparaison des méthodes de freinage entre les équipages montrent que le pilote, en réaction au broutement, n'a pas eu une action efficace sur les commandes de frein. Ce fait est déterminant dans le mécanisme de l'évènement.

3. CONCLUSION

L'évènement est une sortie de piste ayant conduit à l'engagement barrière d'un Mirage 2000D.

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

L'équipage est constitué d'un commandant de bord NOSA expérimenté en place arrière et d'un pilote à l'instruction ayant peu d'expérience sur ce type d'avion. L'équipage est de retour sur Luxeuil Saint-Sauveur après un vol de nuit réalisé en patrouille avec un leader. La dernière partie du vol consiste en un exercice de recueil du leader par son ailier. Arrivant en finale sur la base aérienne de Luxeuil Saint-Sauveur, le leader décide de l'arrêt de l'exercice et laisse son ailier se poser en premier. Le pilote pose les atterrisseurs principaux, puis l'atterrisseur auxiliaire après avoir effectué un freinage aérodynamique. Le pilote actionne ensuite les freins 1 mais ressent plusieurs fois de fortes vibrations qu'il interprète comme du broutement. Après plusieurs tentatives de freinage, il passe sur frein 2 et déploie son parachute. Réalisant que la décélération s'avère insuffisante, le pilote demande à la tour d'actionner la barrière d'arrêt. L'aéronef engage la barrière puis s'immobilise. Après intervention des pompiers de la base aérienne, l'équipage évacue l'aéronef.

3.2. Causes de l'évènement

Dès le début du freinage le pilote a été confronté à un phénomène vibratoire. Le pilote surpris du comportement de l'avion, a été contraint de relâcher les actions de freinage. Les actions successives sur les freins (normal et secours) n'ont pas permis d'arrêter l'avion avant la fin de la piste.

Tout au long de la décélération, en n'appuyant pas suffisamment longtemps sur les freins, le pilote empêche une décélération adéquate.

En outre, les causes suivantes ont contribué à l'évènement :

- la vitesse de l'avion au moment du toucher des roues est plus élevée que celle idéalement prescrite par la procédure, ce qui rallonge la longueur nécessaire pour arrêter l'avion ;
- le pilote, peu expérimenté sur ce type d'avion, est surpris par l'intensité du phénomène vibratoire ;
- le parachute est déployé après avoir actionné la commande du frein de secours, ce qui retarde son action de freinage aérodynamique ;
- le pilote tarde à mettre en œuvre le freinage avec hypo-sustentation, ce qui rallonge légèrement la distance de freinage ;
- il existe une procédure pour faire face au broutement, qui ne figure pas dans le manuel de vol et ne fait pas l'objet d'un entraînement au simulateur.

PAS DE TEXTE

4. RECOMMANDATIONS DE SÉCURITÉ

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

4.1.1. Installation d'un kit anti-broutement

Le phénomène de broutement peut être contré par l'installation du kit OLAER (modification 1400) qui permet d'amortir les pulsations hydrauliques.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'armée de l'air, d'installer le kit OLAER sur les Mirages 2000 qui n'en sont pas encore équipés, et en particulier sur les avions qui sont particulièrement sensibles au broutement comme le 645.

R1 – [A-2018-10-I]

4.1.2. Rappel sur l'efficacité du freinage

Le pilote a déjà expérimenté le phénomène de broutement mais il ne l'avait jamais senti avec une telle intensité, ce qui a pu l'inhiber pour actionner les freins. Or, comme le rappelle la procédure enseignée par l'escadron de transformation d'Orange, même en cas de broutement, l'action répétée sur les freins permet le freinage de l'avion.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'armée de l'air de rappeler à ses équipages de Mirage 2000 que, même en cas de broutement, des actions franches et répétées sur les commandes de frein permettent d'obtenir un freinage efficace.

R2 – [A-2018-10-I]

4.1.3. Formalisation d'une procédure relative au broutement

Le phénomène de broutement n'est pas considéré comme une panne. Il n'y a pas de procédure publiée ni d'entraînement spécifique à ce type d'évènement. L'escadron de transformation d'Orange a néanmoins élaboré un enseignement fournissant une méthode aux équipages pour réagir au phénomène de broutement. Cette méthode ne fait pas l'objet d'un entraînement spécifique qui permettrait aux pilotes de mécaniser leur action.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'armée de l'air, en liaison avec Dassault Aviation, d'étudier la pertinence de mettre en place une procédure relative au broutement.

R3 – [A-2018-10-I]

4.1.4. Remise de gaz.

La remise de gaz est une action prévue par la procédure et est susceptible d'être mise en œuvre par le pilote lors de la phase d'atterrissage.

Pour autant, lors de l'évènement, cette décision n'a jamais été envisagée car le redécollage en cas de défaillance du freinage, et notamment lorsque l'avion utilise une piste équipée d'une barrière d'arrêt, n'est culturellement pas intégré par les équipages.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'armée de l'air, d'étudier la possibilité, lors des séances au simulateur, de mettre en place un entraînement spécifique lié à la problématique de la remise des gaz.

R4 – [A-2018-10-I]

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

4.2.1. Contacts radios

Pendant les opérations de secours, l'équipage n'a pas pu rentrer en contact radio avec le chef du dispositif des secours et il n'a entendu aucune conversation entre les secours et le contrôle au sol.

Les investigations ont montré que la radio fonctionnait correctement.

L'absence de communication radio est due à la conjonction de plusieurs facteurs :

- la coupure batterie (prévue par la procédure) au cours de l'engagement barrière qui a stoppé momentanément la liaison de l'équipage avec la tour ;
- l'erreur d'affichage de la fréquence SOL par l'équipage.

À défaut de communication radio, seule une communication par geste a pu se faire entre les pompiers et l'équipage.

La procédure spécifie d'actionner le robinet coupe-feu et de couper la batterie après l'engagement barrière. La communication entre l'équipage et les équipes de secours ne peut se faire que par gestes.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'armée de l'air de rappeler aux équipages et aux équipes de secours qu'en cas d'engagement barrière, la radio n'est pas utilisable une fois la batterie coupée.

R5 – [A-2018-10-I]

4.2.2. Restitution de l'intervention des secours

L'utilisation d'un moyen d'enregistrement vidéo permettrait de restituer de manière précise l'intervention des moyens de secours et serait une source d'information particulièrement pertinente pour l'enquête de sécurité en plus d'être un outil très efficace au profit des pompiers lors des débriefings des opérations.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'armée de l'air d'étudier la mise en place d'enregistreurs vidéo, sur véhicules et/ou à proximité de la piste, afin de pouvoir restituer l'intervention des secours.

R6 – [A-2018-10-I]