



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE LA DÉFENSE
ET DES ANCIENS COMBATTANTS

BEAD-air

Bureau enquêtes accidents défense air

RAPPORT D'ENQUÊTE TECHNIQUE



BEAD-air-A-2011-004-I

Date de l'événement	06 février 2011
Lieu	Base aérienne de Solenzara
Type d'appareil	Mirage 2000 C
Immatriculation	n° 89 – F-UHKA
Organisme	Armée de l'air
Unité	Escadron de chasse 02.005

AVERTISSEMENT

COMPOSITION DU RAPPORT

Les faits, utiles à la compréhension de l'événement, sont exposés dans le premier chapitre du rapport. L'analyse des causes possibles de l'événement fait l'objet du deuxième chapitre. Le troisième chapitre tire les conclusions de cette analyse et présente les causes certaines ou possibles. Enfin, dans le dernier chapitre, des propositions en matière de prévention sont présentées.

Sauf précision contraire, les heures figurant dans ce rapport sont exprimées en heures locales.

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 de la deuxième partie de ce rapport et des suivantes à d'autres fins que celle de la prévention pourrait conduire à des interprétations erronées.

CREDIT PHOTOS ET ILLUSTRATIONS

Page de garde : Sirpa Air

Photos :

Pages 11, 12, 13 et 20 : BEAD-air.

Page 23 : DGA EP.

Schémas :

Pages 16, 43, 45 et 50 : BEAD-air.

Illustrations :

Pages 24, 26, 27, 28 30 et 52 : BEAD-air.

TABLE DES MATIERES

AVERTISSEMENT	2
CREDIT PHOTOS ET ILLUSTRATIONS	2
TABLE DES MATIERES	3
GLOSSAIRE	4
SYNOPSIS	5
1. Renseignements de base	6
1.1. Déroulement du vol	6
1.2. Tués et blessés	7
1.3. Dommages à l'aéronef	7
1.4. Autres dommages	7
1.5. Renseignements sur le pilote	8
1.6. Renseignements sur l'aéronef	9
1.7. Conditions météorologiques	10
1.8. Aides à la navigation	11
1.9. Télécommunications	11
1.10. Renseignements sur l'aérodrome	11
1.11. Enregistreurs de bord	11
1.12. Renseignements sur l'aéronef et sur l'impact	11
1.13. Renseignements médicaux et pathologiques	13
1.14. Incendie	13
1.15. Questions relatives à la survie des occupants	14
1.16. Essais et recherches	14
1.17. Renseignements sur les organismes	15
1.18. Renseignements supplémentaires	15
1.19. Techniques spécifiques d'enquête	15
2. Analyse	16
2.1. Causes de l'absence totale de freinage au toucher des roues	16
2.2. Causes de l'engagement de la barrière d'arrêt	29
2.3. Gestion de l'engagement barrière	37
3. Conclusion	38
3.1. Éléments établis utiles à la compréhension de l'événement	38
3.2. Causes de l'événement	38
4. Recommandations de sécurité	40
4.1. Mesures de prévention ayant trait directement à l'événement	40
4.2. Mesures de prévention n'ayant pas trait directement à l'événement	41
ANNEXES	42
ANNEXE 1 PRESENTATION DU CIRCUIT DE FREINAGE DU MIRAGE 2000 C	43
ANNEXE 2 SCHEMA DE COMPOSITION ILLUSTREE D'UNE GENERATRICE TACHYMETRIQUE	50
ANNEXE 3 HISTORIQUE DE LA GENERATRICE TACHYMETRIQUE GAUCHE N° 04825 DU MIRAGE 2000 C N° 89	51
ANNEXE 4 EXTRAIT DU MEMENTO PILOTE	52

GLOSSAIRE

BA	base aérienne
CAPs	<i>Critical action procedures</i>
CLM	commission locale de modifications
CTP	commission technique paritaire
EC	escadron de chasse
FIT	fiche d'intervention technique
NTI2	niveau technique d'intervention de 2 ^{ème} niveau
SPAD	système perfectionné anti-dérapant
TA	train auxiliaire
TP	train principal
VFR	<i>Visual flight rules</i>
VTH	vision tête haute

SYNOPSIS

Date de l'événement : dimanche 6 février 2011 à 11 h 57
Lieu de l'événement : base aérienne (BA) 126 de Solenzara
Organisme : armée de l'air
Commandement organique : commandement des forces aériennes (CFA)
Unité : escadron de chasse (EC) 02.005
Aéronef : Mirage 2000 C
Nature du vol : vol de liaison pour mise en place avant campagne de tir
Nombre de personnes à bord : 01

Résumé de l'événement selon les premiers éléments recueillis

Lors de l'atterrissage, après le toucher des roues du train auxiliaire, le pilote du Mirage 2000 C n° 89 est confronté à une absence totale de freinage. Il engage la barrière d'arrêt en extrémité de piste, à faible vitesse. Le pilote est indemne. L'appareil est endommagé.

Composition du groupe d'enquête technique

- Un directeur d'enquête technique du bureau enquêtes accidents défense air (BEAD-air)
- Un enquêteur adjoint du BEAD-air
- Un officier pilote ayant une expertise sur M2000
- Un officier mécanicien ayant une expertise sur M2000
- Un médecin du personnel navigant

Autres experts consultés

- DGA Essais Propulseurs
- L'industriel Dassault Aviation
- L'industriel Messier Bugatti
- L'industriel Bodet Aéro

Déclenchement de l'enquête technique

Le BEAD-air a été prévenu de l'événement le dimanche 6 février 2011 après-midi. Le directeur d'enquête technique et son adjoint se sont rendus sur la base aérienne 126 de Solenzara le lundi 7 février 2011. Ils ont été rejoints par les experts du groupe d'enquête technique le mercredi 9 février 2011.

Enquête judiciaire

Cet événement n'a fait l'objet d'aucune procédure judiciaire.

1. RENSEIGNEMENTS DE BASE

1.1. Déroulement du vol

1.1.1. Mission

Indicatif mission : COTON LIMA 3

Type de vol : CAM I

Type de mission : vol de liaison

Dernier point de départ : BA 115 d'Orange

Heure de départ : 10 h 45

Point d'atterrissage prévu : BA 126 de Solenzara

1.1.2. Déroulement

Ce vol s'inscrit dans le cadre de la mise en place des appareils sur la base aérienne de Solenzara pour la campagne de tir prévue du 7 février au 21 février 2011.

Coton Lima 3 rallie la base aérienne 126 de Solenzara en avion isolé vers 11 h 50. La piste est sèche, le vent est du 090° pour 8 kt. Suite au break, en vue d'un atterrissage en piste 18, le pilote sort le train puis effectue le test du système perfectionné anti-dérapant (SPAD) : aucune anomalie n'est détectée.

Il effectue son dernier virage, se pose à une vitesse estimée de 145 kt puis effectue un freinage aérodynamique. Il pose la roulette de nez à environ 120 kt puis actionne les freins : il ne ressent aucune efficacité. Il tente d'actionner le sélecteur FREINS 2 mais ne le trouve pas. Il demande alors la barrière d'arrêt au contrôleur vigie. Etant en train de dialoguer avec un autre trafic VFR sur une autre fréquence radio, le contrôleur n'entend pas la demande de Coton Lima 3. Le pilote du Mirage 2000 tire le parachute frein. Constatant l'ouverture du parachute frein, le contrôleur l'annonce au pilote, celui-ci demande une seconde fois le relevage de la barrière d'arrêt qui est alors actionné par le contrôleur.

L'appareil continue sa course et le pilote actionne la commande GAIN au lieu du sélecteur FREINS 2. Il actionne ensuite le sélecteur FREINS 2 environ 40 mètres avant la fin de bande. Se rapprochant de la barrière, le pilote actionne le frein de parking 35 mètres avant la barrière, à une vitesse de 52 kt.

Le Mirage 2000 engage la barrière à une vitesse de 43 kt et s'immobilise 4 mètres après. La séquence d'arrêt moteur est effectuée une fois l'appareil immobilisé dans le filet de la barrière.

Après l'intervention des secours, le siège est sécurisé et le pilote indemne évacue l'avion.

1.1.3. Localisation

- Lieu :
 - pays : France
 - département : Corse
 - commune : Solenzara
 - coordonnées géographiques:
 - N 41°55'34.64''
 - E 009°24'19.09''
 - altitude du lieu de l'événement : 28 ft
- Moment : jour

1.2. Tués et blessés

Blessures	Membres d'équipage	Passagers	Autres personnes
Mortelles			
Graves			
Légères			
Aucune	01		

1.3. Dommages à l'aéronef

Aéronef	Disparu	Détruit	Endommagé	Intègre
Mirage 2000 C n° 89			X	

1.4. Autres dommages

Le filet de la barrière d'arrêt a été endommagé.

1.5. Renseignements sur le pilote

- Sexe : masculin
- Age : 32 ans
- Unité d'affectation : EC 02.005
 - fonction dans l'unité : commandant d'escadrille depuis février 2010
- Formation :
 - qualification : chef de patrouille en 2009
 - école de spécialisation : école de l'aviation de chasse (EAC) 00.314 Tours
 - année de sortie d'école : 2005
- Heures de vol comme pilote :

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	sur tous types	dont sur M 2000	sur tous types	dont sur M 2000	sur tous types	dont sur M 2000
Total (h)	1100	700	60	60	11	11

Le pilote a effectué 31 h 47 en place avant et 28 h 10 en place arrière au cours des 6 derniers mois. Il a effectué 4 h 26 en place avant et 6 h 40 en place arrière dans les 30 derniers jours.

- Date du dernier vol comme pilote sur l'aéronef :
 - de jour : 4 février 2011
 - de nuit : 1^{er} février 2011
- Carte de circulation aérienne :
 - type : carte verte
 - date d'expiration : 6 mars 2011
- Dernier entraînement au simulateur dans le cadre des tests CAPs (*critical action procedures*) : 15 décembre 2010.

1.6. Renseignements sur l'aéronef

- Organisme : armée de l'air
- Commandement organique d'appartenance : commandement du soutien des forces aériennes (CSFA)
- Base aérienne de stationnement : BA 115 – Orange
- Unité d'affectation : Escadron de soutien technique aéronautique (ESTA) 02.005
- Type d'aéronef : Mirage 2000 C
 - configuration : réservoir pendulaire largable (RPL) de 2 000 litres
 - armement : sans
- Caractéristiques :

	Type - série	Numéro	Heures de vol totales	Heures de vol depuis	Heures de vol depuis
Cellule	M 2000 C	89KA	4084 h 35 (3451 atterrissages)	GV : 1652 h 20 ¹	VI : 68 h 24 ² (58 atterrissages)
Moteur	SNECMA M53-P2	60540	2387 h 58	Sans objet ³	Sans objet

1.6.1. Maintenance

L'examen de la documentation technique témoigne d'un entretien conforme aux programmes de maintenance en vigueur.

Les roues des trains principaux ont été changées pour la campagne de tir afin de réduire les échanges sur place.

La dernière VI a été effectuée le 28 juin 2010 à 4 016 h 59 (3393 atterrissages).

Le dernier entretien programmé, de type recul des voilures, a été effectué du 17 janvier au 4 février 2011 à 4 083 h 25. Ce chantier impose notamment une dépose/pose des blocs de freins et des atterrisseurs principaux et nécessite entre autres :

- une purge des circuits hydrauliques ;
- un contrôle du SPAD ;
- un remplissage des réservoirs hydrauliques 1 et 2.

¹ GV = grande visite

² VI = visite intermédiaire

³ Le M53-P2 est un moteur modulaire. Les révisions sont effectuées par modules et par pièces de manières différenciées.

De même au cours de ce chantier, l'accumulateur parking a été changé, le circuit de freinage a été testé. Par conséquent, une partie du système de freinage a été déposée et reposée au cours de ce chantier.

La dernière vérification du test SPAD a lieu le 4 février 2011.

Enfin, l'exploitation de la documentation révèle que :

- le puits de chaleur droit a été échangé le 29 juin 2010 (100 atterrissages depuis) ;
- le puits de chaleur gauche a été échangé le 22 mai 2008 (322 atterrissages depuis).

1.6.2. Performances

L'appareil ne fait l'objet d'aucune restriction d'emploi et les performances sont dans les normes.

1.6.3. Masse et centrage

Masse de l'appareil estimée à l'atterrissage : 8,8 t.

1.6.4. Carburant

- Type de carburant utilisé : F34
- Quantité de carburant au décollage : 4,1 t
- Quantité de carburant restant au moment de l'événement : 0,8 t

1.6.5. Autres fluides

Néant.

1.7. Conditions météorologiques

Les relevés de la station météorologique de la base aérienne font état des conditions suivantes au moment de l'événement :

- vent de direction moyenne 120°, variable entre 90° et 150°, force 4 kt ;
- visibilité supérieure à 10 km ;
- 5 à 7 huitièmes de nuages à 2 000 ft ;
- Température 14 °C.

Les informations météorologiques transmises par le contrôleur sur la fréquence de la tour de contrôle de la BA 126 donnent au moment de l'événement, un vent du secteur 090° pour 6 kt. A 12 h 00 locale, le soleil est de face lorsque le pilote se présente à l'atterrissage en piste 18. La gêne occasionnée par le contraste de luminosité entre l'intérieur de la cabine et l'extérieur a été mentionnée par le pilote.

1.8. Aides à la navigation

Sans objet.

1.9. Télécommunications

Au moment de l'événement, le pilote est en contact radio avec la tour de contrôle de la base aérienne 126 de Solenzara.

Une copie audio et écrite des communications entre la tour de contrôle et les aéronefs dans la zone de Solenzara a été transmise au BEAD-air.

1.10. Renseignements sur l'aérodrome

Au moment de l'événement la piste 18 est en service.

1.11. Enregistreurs de bord

L'appareil est équipé d'un enregistreur d'accident à mémoires statiques de type « ESPAR ». La visualisation tête haute (VTH) ainsi que les conversations et signaux sonores sont enregistrés sur bande magnétique au format Hi-8. L'enregistrement vidéo n'était pas en fonctionnement au cours du vol.

1.12. Renseignements sur l'aéronef et sur l'impact



Vue de l'appareil immobilisé dans la barrière d'arrêt

1.12.1. Examen de la zone

L'appareil s'est immobilisé 4 mètres après avoir engagé la barrière. Une trace de pneumatique (trace noire continue) a été laissée sur la piste par la roue du train principal droit de l'appareil sur une distance de 25 mètres avant la barrière d'arrêt.



Détail de la trace laissée par le pneumatique de la roue du train principal droit

1.12.2. Examen de l'aéronef

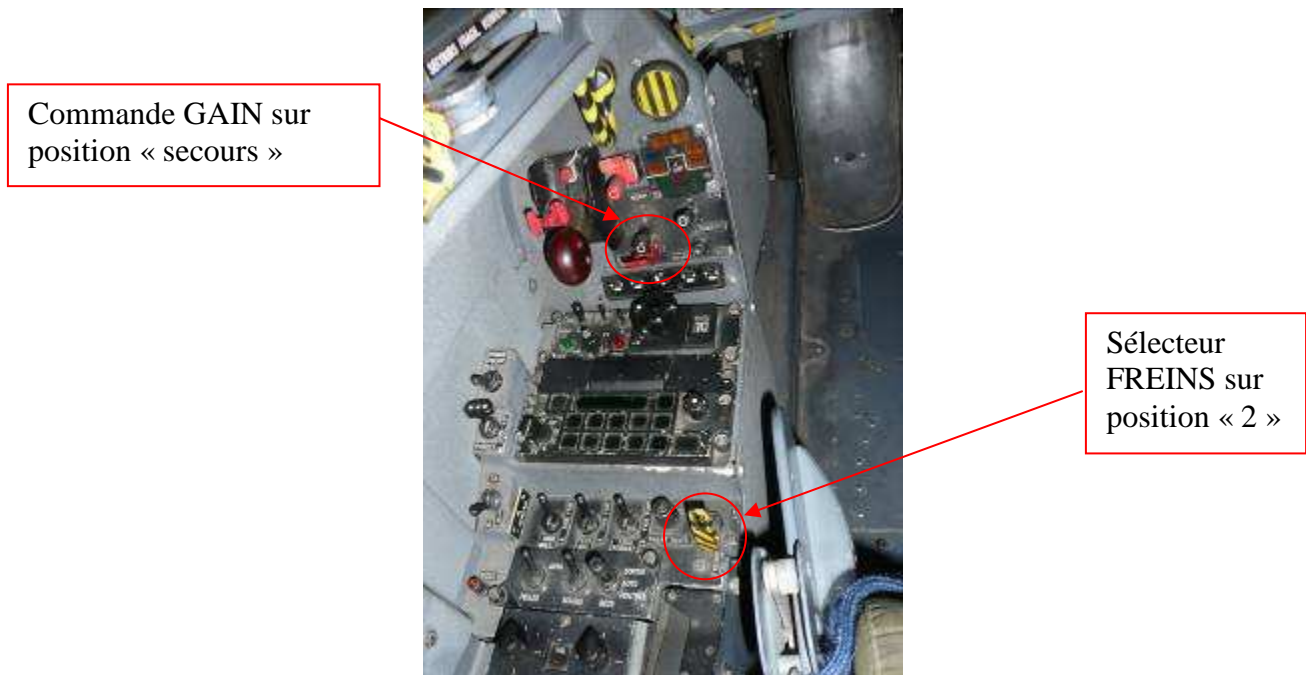
Les dommages subis par l'appareil sont consécutifs à l'engagement de la barrière. Les sondes de pression totale, de température d'impact et incidence, la perchette anémométrique, et l'embase de la perche de ravitaillement sont endommagées.

L'entrée d'air droite est déformée. Des traces de frottement des brins d'arrêt sont également constatées sur chaque demi-voilure, ces traces s'étalant de l'emplanture de l'aile jusqu'à la mi-longueur du bec de bord d'attaque. La verrière et le radôme présentent des rayures.

Le contrôle endoscopique du moteur réalisé sur le site de l'incident n'a mis en évidence aucune détérioration ni trace d'impact sur les aubes des compresseurs.

1.12.3. Examen de la cabine

- La commande du frein de parc est en position haute.
- La batterie est sur marche.
- La manette des gaz est sur stop, le coupe-feu fermé.
- Le sélecteur FREINS est positionné sur FREINS 2, cache relevé.
- La commande GAIN est sur la position « secours », cache relevé.



Vue de l'intérieur de la cabine (partie supérieure de la banquette latérale gauche)

1.12.4. Constatations visuelles sur les organes de freins

- Les roues sont libres en mouvement lorsque la pression du frein de parking est relâchée.
- Les pneumatiques ne présentent aucun endommagement significatif.
- Les pistons des blocs de frein et les puits de chaleur sont intègres.

1.13. Renseignements médicaux et pathologiques

- Dernier examen médical :
 - type : CEMPN
 - date : 3 novembre 2010
 - résultat : apte sans restriction
 - validité : 12 mois
- Examens biologiques : aucun
- Blessures : aucune

1.14. Incendie

Néant.

1.15. Questions relatives à la survie des occupants

1.15.1. Abandon de bord

Le pilote a évacué l'appareil dès que les pompiers ont ouvert la verrière, à l'issue de la sécurisation du siège éjectable par les équipes de sécurité.

1.15.2. Engagement du système d'arrêt

- Type de système d'arrêt : barrière d'arrêt filet
- Engagement de la barrière en bout de piste (au seuil de piste 36)
- Fonctionnement de la barrière d'arrêt en manuel, sur demande du pilote
- Éléments lors de l'engagement du système d'arrêt :
 - vitesse : 51 kt au passage des cellules photoélectriques
 - vitesse à l'engagement : 43 kt
 - axe d'engagement : dans l'axe de la piste
 - configuration avion : parachute frein sorti, aérofreins sortis

1.15.3. Organisation des secours

Le contrôleur donne l'alerte immédiatement en actionnant le klaxon de crash.

Les premiers éléments de l'escadron sécurité incendie sauvetage (ESIS) interviennent sur les lieux deux minutes environ après l'alerte et sécurisent l'aéronef.

Après avoir évacué l'appareil, le pilote a été pris en charge par le médecin du service médical de la BA 126.

L'intervention de l'ESIS s'achève à 12 h 45 et la piste est ré-ouverte vers 18 h après réparation de la barrière d'arrêt.

1.16. Essais et recherches

L'extraction et l'exploitation des données de l'enregistreur d'accident ont été effectuées dans les locaux de DGA Essais Propulseurs (département RESEDA).

A l'issue des investigations sur site, le boîtier de régulation SPAD ainsi que les trois génératrices tachymétriques des trains principaux et du train auxiliaire ont été expertisées par l'UGMN M 2000 de la BA 133 de Nancy Ochey (investigations niveau technique d'intervention de niveau 2 -NTI2).

Les trois génératrices tachymétriques ont ensuite été expertisées chez l'Industriel BODET AERO (sous-traitant de Messier Bugatti) le 28 avril 2011. Le compte-rendu d'examen technique a été envoyé au BEAD-air le 9 juin 2011.

Les génératrices des trains principaux ont ensuite été transmises le 10 mai 2011 à DGA EP pour des analyses complémentaires. Un complément d'examen a été demandé le 7 septembre 2011 à l'issue d'une réunion avec l'industriel Dassault.

1.17. Renseignements sur les organismes

Sans objet.

1.18. Renseignements supplémentaires

Sans objet.

1.19. Techniques spécifiques d'enquête

Sans objet.

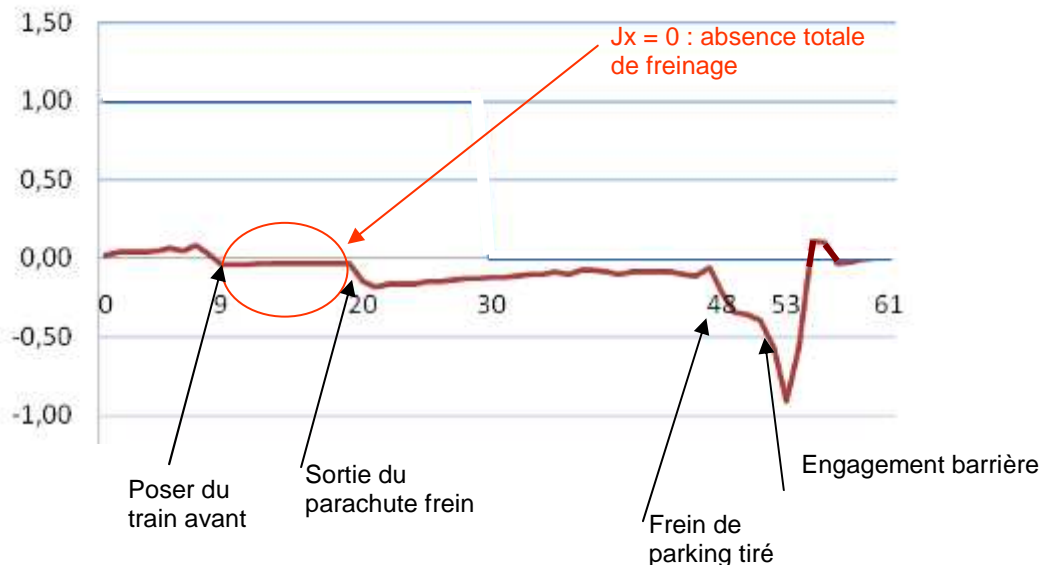
2. ANALYSE

Lors de l'atterrissage, immédiatement après le toucher des roues du train auxiliaire, le pilote du Mirage 2000 C est confronté à une absence totale de freinage. Il ne parvient pas à ralentir l'appareil lors de la phase de décélération et engage la barrière d'arrêt en bout de piste.

La première partie de l'analyse recherche les causes de l'absence totale de freinage à l'atterrissage. La seconde partie est consacrée aux causes de l'engagement de la barrière d'arrêt. Une dernière partie est consacrée à la gestion de l'engagement de la barrière.

2.1. Causes de l'absence totale de freinage au toucher des roues

Le graphique présenté ci-dessous représente la valeur de l'accélération longitudinale (J_x) en fonction du temps, à partir du toucher des roues du train principal. Il illustre ainsi l'absence de freinage rapporté par le pilote. A l'issue du freinage aérodynamique, à 117 kt, le pilote pose la roulette de nez puis actionne les pédales de frein. Aucun freinage n'est ressenti, la valeur du J_x indiqué en VTH est nulle.



J_x (G) en fonction du temps (s) à partir du toucher du train principal

Neuf secondes après le toucher du train principal, le pilote pose la roulette de nez. Pendant 11 secondes (entre $t = 9$ s et $t = 20$ s), la valeur du J_x reste nulle puis passe à $-0,15$ lorsque le parachute est tiré.

Les valeurs de cap (non représentées sur la figure) restent constantes, témoignant ainsi de l'absence de dissymétrie de l'avion.

Aucun allumage du répéteur de pannes ambre ou rouge ne se produit au moment où le pilote actionne les freins, juste après le toucher de la roulette de nez.

Les pneumatiques ne présentent aucun endommagement représentatif d'un blocage de roue.

2.1.1. Résultats des expertises techniques

Le circuit de freinage du Mirage 2000 C est détaillé en annexe 1.

2.1.1.1. Vérification des organes de frein et de la partie hydraulique du système de freinage

Aucun défaut n'a été constaté sur les puits de chaleur. Ils ne présentent aucun marquage pouvant témoigner d'un dysfonctionnement au niveau des blocs de freins et l'épaisseur des rotors et des stators est dans les normes.

Les valeurs mesurées des pressions de freinage normal, point fixe, secours et frein de parking sont conformes à la documentation de travail en vigueur. La circulation du liquide hydraulique n'est pas perturbée par la présence d'air ou de gaz. Enfin, aucun affichage de panne lors du poser ni de signal de perte de pression au niveau des freins n'a été rapporté par le pilote.

Environ 25 mètres avant la barrière, le pilote a tiré le frein de parking. La trace laissée par le pneumatique droit sur la piste, ainsi que l'augmentation brutale du paramètre Jx attestent le bon fonctionnement du circuit 2 « secours ».

Les différents examens effectués sur les organes constituant les systèmes de freins n'ont mis en évidence aucune anomalie. La signalisation en cabine a été vérifiée. Le liquide hydraulique est conforme à la norme en vigueur.

Les examens effectués n'ont pas mis en évidence d'anomalie dans la partie hydraulique du système de freinage susceptible d'être à l'origine d'une absence totale de freinage à l'atterrissage.

2.1.1.2. Vérification de la partie électrique du système de freinage

Après le passage en configuration train bas par le pilote, un auto-test SPAD est effectué par celui-ci : le voyant SPAD s'éteint au tableau de configuration train, indiquant ainsi au pilote qu'aucune panne du système de régulation SPAD n'est présente et qu'il peut utiliser le freinage en FREINS 1 (ce test en vol permet entre autre de vérifier l'isolement et la continuité des lignes des 3 génératrices tachymétriques).

Les premiers examens ont tout d'abord vérifié la continuité et l'isolement des lignes électriques du SPAD : aucun défaut électrique n'est constaté. Un défaut de continuité ou isolement aurait été sanctionné par l'allumage du voyant SPAD fixe lors du test SPAD après la sortie des trains.

Les vérifications et les tests du boîtier de régulation SPAD attestent d'un bon fonctionnement de cet équipement.

Les 3 génératrices tachymétriques des trains auxiliaire et principal ont été examinées.

- Génératrice tachymétrique du train auxiliaire (TA) : les différentes mesures de résistance et de tension montrent que la génératrice tachymétrique fonctionne de manière nominale (toutes les valeurs mesurées sont dans les normes du constructeur).
- Génératrice tachymétrique du train principal (TP) gauche : les mesures de résistance et de tension indiquent des valeurs hors tolérances. Ces valeurs révèlent une anomalie de fonctionnement de la génératrice.
- Génératrice tachymétrique du train principal (TP) droit : les mesures de résistance et de tension réalisées sur site indiquent des valeurs dans les normes. En revanche, les valeurs mesurées lors des tests NTI2 sont hors tolérances.

Enfin, les manchons d'entraînement des génératrices ont été constatés intègres.

Les génératrices tachymétriques ont été examinées par l'industriel (fabricant) afin de diagnostiquer leur état de fonctionnement au moment de l'événement. Les résultats des tests électriques effectués par ce dernier indiquent que :

- la génératrice du TA fonctionne correctement ;
- la génératrice du TP gauche est défectueuse ;
- la génératrice du TP droit fonctionne correctement.

La comparaison des mesures effectuées au NTI2 avec celles effectuées chez l'industriel fait apparaître de nombreuses différences, tant dans les résultats bruts des tests électriques que dans l'interprétation des résultats :

- les valeurs théoriques à respecter (pour les tensions à vide et en charge) sont différentes entre l'industriel et l'utilisateur ;
- les valeurs des mesures d'isolement et de résistance de l'induit sont différentes pour les 3 génératrices testées ;
- les mesures de tension donnent :
 - des résultats quasi identiques pour la génératrice du TA ;
 - des différences pour la génératrice du TP gauche (mais toutes les valeurs sont hors tolérances, ce qui ne pose pas de problème de diagnostic) ;
 - des différences pour la génératrice du TP droit. Toutes les tensions sont plus élevées lors des mesures effectuées chez l'industriel (en moyenne + 0,2 V lors de l'entraînement de la génératrice à 1 800 tr/mn et en moyenne + 0,4 à 0,6 V lors de l'entraînement à 3 600 tr/mn). Plusieurs tests identiques effectués successivement au NTI2 avaient montré un comportement erratique de la génératrice. Des bruits de frottement avaient été perçus lors de l'entraînement à 3 600 tr/mn. L'ensemble de ces phénomènes n'a pu être reproduit chez l'industriel.

Enfin, l'analyse et les mesures effectuées à partir des signaux visualisés à l'oscilloscope étaient différentes. Ces écarts ont pu être expliqués par des imprécisions de la documentation technique qui ont depuis été corrigées.

Les examens effectués sur la partie électrique du système de freinage ont mis en évidence un dysfonctionnement de la génératrice du train principal gauche. Les résultats obtenus n'ont pas permis de valider un diagnostic de bon fonctionnement de la génératrice du train principal droit au moment de l'événement.

Lorsque les deux génératrices du train principal sont simultanément défectueuses, l'absence totale de freinage apparaît évidente.

En effet, les tensions délivrées et envoyées au boîtier de régulation SPAD sont proportionnelles à la vitesse des roues. La vitesse de référence sol VA est fournie par la génératrice tachymétrique du TA. Les vitesses des roues freinées VR sont mesurées par les génératrices tachymétriques du TP.

Dès le poser du TA, le boîtier de régulation SPAD qui reçoit les informations de vitesse (VA et VR), gère la valeur $\Delta V = VA - VR$. L'ordre de défreinage généré par le SPAD dépend de la valeur ΔV .

D'après les valeurs des tests d'isolement, la valeur VR de chaque roue devait être équivalente à « roue bloquée ». La valeur ΔV est supérieure à 11 %. Avec une telle valeur, le boîtier régulation SPAD n'autorise pas le freinage car pour lui, le glissement des roues principales est trop important. Le SPAD envoie alors un ordre de défreinage de 100 % : les roues sont libres. Ce type de défaillance entraîne par conséquent une absence totale de freinage sur le circuit 1.

Différentes hypothèses ont été envisagées afin d'étudier si l'absence totale de freinage à l'atterrissage aurait pu se produire en considérant que seule la génératrice tachymétrique du TP gauche était défectueuse. Ces hypothèses ont été écartées au cours de l'enquête.

Bien que les résultats des investigations techniques sur la génératrice tachymétrique du TP droit présentent des incohérences, l'hypothèse d'un dysfonctionnement au moment de l'événement est retenue. Le scénario le plus probable est la défaillance des deux génératrices tachymétriques du train principal conduisant à l'absence totale de freinage sur le circuit 1.

2.1.2. Recherche de l'origine du dysfonctionnement des génératrices tachymétriques

Deux types de génératrices tachymétriques équipent actuellement l'ensemble des Mirage 2000 :

- une génératrice référencée C20260000 en service depuis 1989 ;
- une génératrice référencée C20260000-1 en service depuis 2002. Cette version, bien que plus récente, n'est pas installée sur les trains auxiliaires.

Sur les trains principaux, le panachage des deux versions est autorisé.

Un schéma de composition illustré d'une génératrice tachymétrique est fourni en annexe 2.

2.1.2.1. Résultats des expertises réalisées sur la génératrice du TP gauche

La génératrice du TP Gauche est une génératrice de type C20260000.

Toutes les mesures électriques effectuées sur cette génératrice sont hors tolérances. Selon l'industriel, dans cette configuration, lors du test SPAD en vol, une anomalie aurait due être détectée. Or, ce ne fut pas le cas.

Afin de déterminer l'origine de la défaillance, il a été procédé à un premier démontage chez l'industriel. Des examens complémentaires ont été poursuivis à DGA Essais Propulseurs.

En désaccouplant le rotor et le stator, des traces d'échauffement important sont observées sur l'axe et le bobinage du rotor (cf photo ci-dessous).

La peinture de la carcasse (côté arbre) de la génératrice présente un aspect boursoufflé témoignant d'un échauffement excessif du matériel.



Etat d'endommagement du rotor (à gauche) et de la carcasse (à droite)

L'examen du bobinage montre une rupture de ce dernier sur 3 des 7 secteurs. Les 3 secteurs où le bobinage est rompu sont co-localisés.

En étudiant l'historique de fonctionnement de cette génératrice tachymétrique (voir annexe 3), il apparaît qu'elle avait été avionnée sur un Mirage 2000 D qui avait subi une interruption de décollage en juillet 2006 au cours duquel les pneumatiques avaient éclaté et les fusibles de roues avaient fondu. Le cloquage de la peinture avait été observé suite à cet incident sur le boîtier de l'équipement. Il est probable que les dommages observés, témoignant d'une augmentation excessive de température, ont été initiés suite à cette surchauffe de l'ensemble roue/frein lors de l'interruption de décollage. A l'issue de cet incident, le matériel avait été vérifié électriquement au NTI2 puis remis en ligne de vol et avionné sur le Mirage 2000 C n° 89.

Il est possible que cette interruption de décollage ait occasionné une surchauffe importante au niveau de la génératrice, causant des dommages internes à la génératrice.

Cette surchauffe aurait ainsi dégradé prématurément la génératrice et conduit à la rupture de son bobinage 723 heures de vol après. La rupture des bobinages, sur 3 secteurs co-localisés, est cohérente avec un effet cheminée. Cette surchauffe de l'ensemble roue/frein a entraîné une élévation de température importante, ce qui a pu endommager et accélérer le vieillissement des composants internes de la génératrice (bobinage, vernis, etc....) jusqu'à la rupture du bobinage.

Des essais en laboratoire ont permis de mettre en évidence que le cloquage de la peinture ne pouvait se produire en-dessous de 300 °C. Or, les essais en température ayant servi à la qualification de ce type de matériel ne dépassent pas 200 °C, température de tarage du fusible. A cette température de fusible, il a été établi que la fusée avait une température inférieure à 160 °C.

Le dysfonctionnement de la génératrice du TP gauche résulte de la rupture de son bobinage.

L'hypothèse selon laquelle la rupture du bobinage a pu résulter de dégradations internes subies lors d'une surchauffe antérieure est probable.

A ce stade de l'enquête, cette hypothèse ne peut être confirmée sans une étude approfondie des conséquences en termes de comportement et de durée de vie de la génératrice tachymétrique suite à une surchauffe de l'ensemble roue/frein. Il est en effet possible que la durée de vie de la génératrice tachymétrique soit affectée par une élévation de température excessive (par exemple, lors d'un éclatement de pneumatique suite à fonte du fusible de roues). Les dommages ainsi occasionnés ne sont pas aisément détectables et il est difficile de déterminer la température réellement subie par la génératrice.

2.1.2.2. Résultats des expertises réalisées sur la génératrice du TP droit

La génératrice du TP droit est une génératrice de type C20260000-1.

Elle a été posée neuve sur le Mirage 2000 C n° 89 et a 46 h 45 de vol au moment de l'événement.

Les valeurs électriques (isolement, résistance de l'induit, tensions) obtenues lors de l'examen technique chez l'industriel sont conformes à la documentation technique en vigueur. Or, les mesures effectuées au NTI2 ont révélé des valeurs hors tolérances et un comportement erratique de la génératrice (2 tests électriques successifs ne donnaient pas les mêmes résultats).

Le démontage de cette génératrice a montré :

- un aspect visuel intègre du connecteur, de la carcasse et du capot ;
- sur le stator, des traces certainement dues à un léger échauffement.

Enfin, une pollution a été observée dans le logement du stator. Le carter renferme de nombreux dépôts autres que ceux normaux dus aux charbons. L'ensemble de ces dépôts a été comparé aux produits présents à l'intérieur de la génératrice. Aucune correspondance n'a été retrouvée. Par conséquent, cette pollution ne peut provenir que de l'extérieur.

Aucune trace de corrosion n'a été mise en évidence.

La présence de dépôts à l'intérieur de la génératrice tachymétrique peut expliquer le comportement erratique de la génératrice tachymétrique observé lors des différents examens techniques. L'hypothèse de son dysfonctionnement au moment de l'événement est retenue.

2.1.2.3. Expertise technique réalisée sur une autre génératrice tachymétrique

Le 28 juin 2011, un mirage 2000 D effectue une interruption de décollage au cours de laquelle la fonte des fusibles de roue a entraîné le dégonflement du pneumatique droit du train principal. Lors des vérifications effectuées suite à l'échauffement de l'ensemble roue/frein, la génératrice tachymétrique du train principal droit a été retrouvée défectueuse (valeurs des résistances et tensions hors tolérances lors du test SPAD à la mallette).

Dans le cadre de l'enquête technique, des investigations complémentaires ont été menées.

Cette génératrice tachymétrique est une génératrice de type C20260000-1 et a 1 379 heures de fonctionnement, sans historique de pannes ou d'événements significatifs antérieurs.

La résistance relevée à ses bornes est de 1 750 Ω (valeur attendue entre 550 et 950 Ω). Les premières constatations de l'expertise montrent que son rotor est bloqué en rotation en raison de la présence de corrosion (voir photos ci-dessous).



Etat d'endommagement de la génératrice tachymétrique n°1641

L'ensemble des examens effectués montre la présence d'oxyde d'aluminium (dépôt blanchâtre) et d'oxyde de fer (dépôt de couleur rouille).

L'analyse de ces dépôts confirme que :

- la pollution provient de l'extérieur et est entrée par l'axe de la génératrice ;
- le produit (eau ou air humide) favorisant la corrosion a migré autour de l'axe d'entraînement de la génératrice tachymétrique.

Ces travaux complémentaires ont également montré que l'oxydation à l'intérieur de la génératrice a eu pour conséquence une augmentation de la résistance de l'induit, et donc une tension mesurée plus faible.

Les génératrices tachymétriques de type C20260000-1 présentent des modifications dans le système d'étanchéité et dans la longueur d'implantation du noyau magnétique. Il existe une différence notable entre les deux versions sur la profondeur/hauteur à laquelle le noyau aimanté en fer doux (très sensible à la corrosion) est implanté.

En conséquence une pollution accidentelle peut modifier la génération électrique.

Les génératrices tachymétriques de type C20260000-1 présentent des modifications dans le système d'étanchéité et la longueur d'implantation du noyau magnétique par rapport aux génératrices de type C20260000. Elles sont ainsi plus sensibles aux pollutions accidentelles qui peuvent conduire à des dysfonctionnements électriques, parfois difficilement détectables.

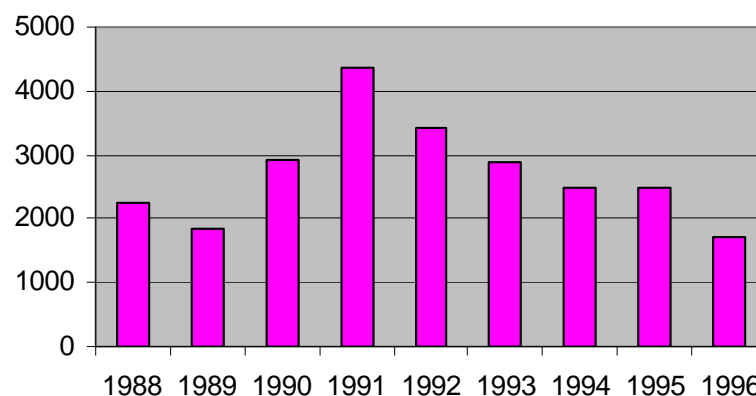
2.1.3. Etude relative aux dysfonctionnements récurrents des génératrices tachymétriques sur Mirage 2000 au sein de l'armée de l'air

2.1.3.1. Historique de conception et de qualification des équipements

La génératrice tachymétrique de type C20260000 a été approuvée en commission locale de modifications (CLM) n° 19 du 19 janvier 1989.

En 1995, l'armée de l'air informe la DGA d'un accroissement important de pannes constatées, en particulier entre 1993 et 1994. En 1993 : sur 25 génératrices tachymétriques constatées défectueuses en unité, 2 avaient 0 heure de fonctionnement et 5 comptaient moins de 60 heures. En 1994, sur 50 génératrices défectueuses, 11 avaient 0 heure de fonctionnement et 10 moins de 60 heures.

En 1997, lors de la commission technique paritaire (CTP) Mirage 2000, l'industriel Dassault présente un bilan relatif aux problèmes rencontrés sur les génératrices tachymétriques sur une période de 8 ans (de 1988 à 1996). Le bilan, présenté sur la figure ci-dessous, montre les variations du temps moyen entre deux pannes (*Mean time between failure* -MTBF) des équipements en fonction des années.



MTBF (heures) en fonction des années présenté par l'industriel lors de la CTP Mirage 2000 de 1997

L'armée de l'air a par ailleurs rencontré des ruptures de fils sur des équipements neufs ainsi que des résistances hors tolérances. Le même constat est effectué sur F16 et Falcon 900.

Depuis 1995, le principal problème rencontré sur les génératrices tachymétriques C20260000 concerne une résistance trop élevée du rotor due à la coupure d'un de ses bobinages.

En 1998, une modification de conception est proposée lors de la CTP M 2000. Le but de cette modification intitulée « B.121 - Générateurs tachymétriques - Améliorations de fiabilité » est d'améliorer la tenue du fil de bobinage dans la génératrice tachymétrique.

Afin de valider la proposition de l'industriel, la DGA a demandé des essais de qualification de cette nouvelle version auprès du centre d'essais aéronautiques de Toulouse (CEAT) en comparant les performances des génératrices C20260000 et C20260000-1. En 2001, les conclusions du rapport d'essai mentionnent :

« D'après les résultats obtenus, il apparaît que les 2 génératrices tachymétriques en essais au CEAT ont des caractéristiques relativement identiques. Bien que les valeurs de tension soient hors tolérances à basse vitesse, leur comportement reste homogène durant toute la durée des essais. Le programme d'essai réalisé ne permet pas de statuer valablement sur l'amélioration apportée, le défaut rencontré en exploitation n'ayant pu être reproduit en essais sur la génératrice d'origine. Un programme plus spécifique et sévéré serait à envisager ».

Ces essais de qualification ont bien permis de démontrer la conformité des génératrices C20260000-1 aux spécifications et la stricte interchangeabilité des génératrices C20260000 et C20260000-1. Cependant, aucune amélioration n'a été prouvée.

La génératrice tachymétrique de type C20260000-1 est alors approuvée en CLM n° 1413 du 11 juillet 2002. Les principales modifications sont :

- l'augmentation du diamètre du fil de bobinage ;
- l'augmentation de la longueur du rotor ;
- l'augmentation de la longueur de l'aimant.

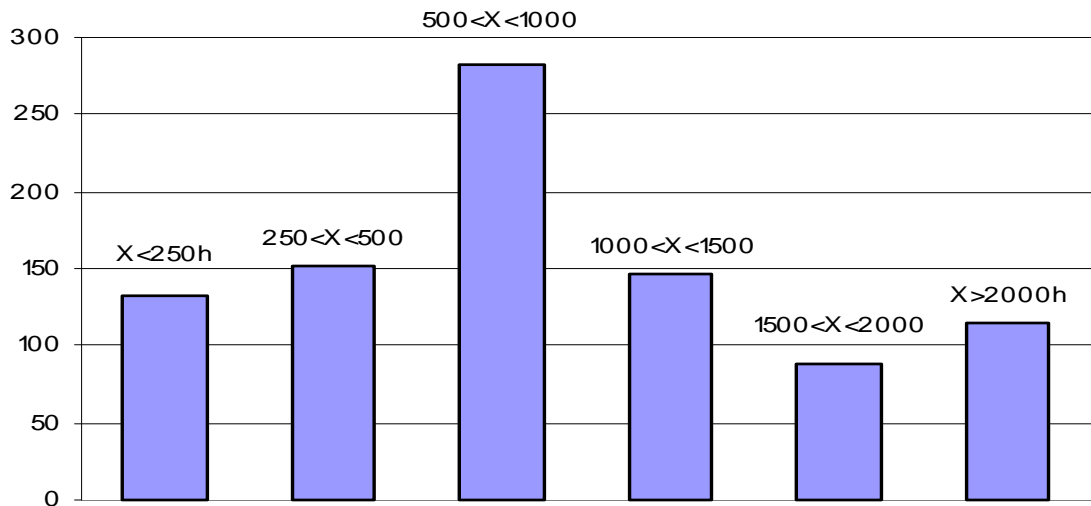
Très rapidement l'installation des génératrices tachymétriques C20260000-1 sur le train auxiliaire pose un problème. La tension délivrée est inférieure de 5 % à la normale. Il est ainsi décidé de ne pas monter ces génératrices sur les trains auxiliaires.

2.1.3.2. Pannes récurrentes rencontrées au sein de l'Armée de l'Air

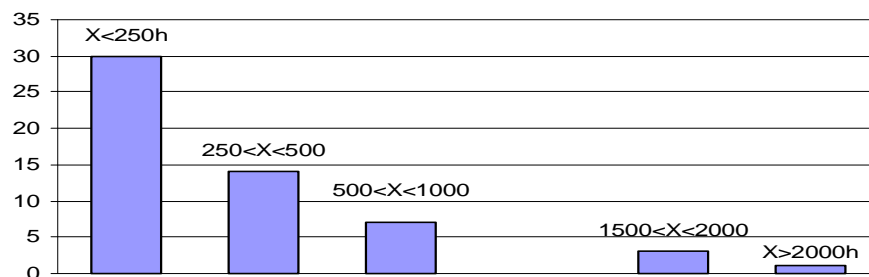
Une étude a été réalisée dans le cadre de l'enquête sur la récurrence des pannes constatées sur les génératrices tachymétriques équipant les Mirage 2000. Cette étude repose sur les dépannages qui ont imposé la dépose d'une ou plusieurs génératrices. Elle a été réalisée en croisant les informations données par la partie sécurité des vols (remontée des informations par les équipages en vol) et par la partie technique (extraction des données des fiches d'interventions techniques (FIT)).

Ainsi, sur une période de 8 ans, environ 390 cas de pannes survenues en vol ont nécessité l'échange d'une ou plusieurs génératrices : **en moyenne, une panne de freinage par semaine entraîne la dépose d'une ou plusieurs génératrices.**

En étudiant le nombre de génératrices déposées au NTI2 suite à un dysfonctionnement constaté en unité, il ressort qu'entre 2000 et 2009 : 1 424 génératrices ont été déposées (1360 pour les C20260000 et 64 pour les C20260000-1⁴). Les graphiques ci-dessous présentent pour chacune des versions la répartition en nombre d'heures de vol à partir de laquelle le dysfonctionnement a été observé.



Nombre de génératrices tachymétriques C20260000 déposées au NTI2 et réparties en heures de vol – période de 2000 à 2009



Nombre de génératrices tachymétriques C20260000-1 déposées au NTI2 et réparties en heures de vol – période de 2005 à 2009

⁴ Sur la période de 2005 à 2009 uniquement.

Enfin, un MTBF approché a été calculé à partir du nombre de génératrices consommées annuellement et du nombre d'heures de vol effectuées. Les résultats sont présentés sur le tableau ci-dessous :

année	2006	2007	2008	2009	2010
activité (HdV)	58319	53977	49740	48758	41955
génératrices consommées	100	64	79	55	54
MTBF (3 génératrices/avion)	1750	2530	1889	2660	2331

Calcul d'un MTBF à partir du nombre de génératrices consommées annuellement

L'ensemble des résultats de cette étude démontre le caractère récurrent des dysfonctionnements des génératrices tachymétriques équipant les Mirage 2000. Les problèmes soulevés à partir de 1998 par l'utilisateur ont perduré. La mise en place d'une nouvelle version de génératrice tachymétrique n'a pas permis de diminuer le nombre de pannes.

2.1.3.3. Analyse du suivi en utilisation des génératrices tachymétriques

En raison de leur coût de réparation élevé, les génératrices tachymétriques sont classées comme « consommables » depuis 1990. Par conséquent, il n'existe aucun suivi en utilisation ou en vieillissement de cet équipement.

- Aucun plan de maintenance, d'entretien ou de contrôles périodiques n'est prévu.
- Les génératrices tachymétriques sont déposées selon état : leur contrôle de fonctionnement est effectué uniquement suite à une panne ou un endommagement constaté en unité. Elles sont alors transmises au NTI2 pour des tests de fonctionnement complémentaires.
- En cas de défaillance avérée de l'équipement, aucune recherche de cause de dysfonctionnement n'est effectuée et le matériel est rebuté hormis pour les génératrices tachymétriques toujours sous garantie constructeur. Dans ce cas, elles sont envoyées chez l'industriel qui vérifie la non-conformité de l'équipement.
- Les motifs de dépose ne sont pas toujours renseignés, (en particulier lors des visites d'entretien). Le tableau ci-après illustre ce manque de traçabilité.

Date	HdV (cellule)	Dépose/pose	Motif
30/08/2006	3360	pose nouvelle génératrice TPG n°4825	
08/03/2007	3477	pose nouvelle génératrice TA n°1336	SP AD en finale et freinage faible
21/05/2007	3550	Dépose Bon état génératrice TA n°1336	
		Dépose Bon état génératrice TPG n°4825	
29/05/2007		Pose génératrice TA n°1336	
		Pose génératrice TPG n°4825	
26/10/2010	4037	Pose nouvelle génératrice TPD n°2443	au cours de la VI
04/02/2011	4083	Dépose puis pose des génératrices TPG, TPD et TA à l'identique	chantier recul voilure qui nécessite la dépose d'une partie du système de freinage

Historique des poses et déposes des génératrices tachymétriques sur le Mirage 2000 C n° 89

De nombreuses pannes de freinage survenues en vol ne sont pas toujours reproduites au sol. Parfois, l'appareil est remis en vol et la même panne survient au vol suivant. A titre d'exemple, le 7 mars 2011, l'équipage du mirage 2000 D n° 667 constate un freinage faible à l'atterrissage. A l'issue du vol, un contrôle du système de freinage est effectué. Aucune anomalie n'est détectée et l'avion est remis en ligne de vol le soir même. Lors de ce vol, l'équipage constate de nouveau un freinage faible à l'atterrissage. Cette fois-ci, l'origine de la panne est identifiée : la génératrice tachymétrique du train principal gauche ainsi que le faisceau de train supérieur sont défectueux. Les deux équipements ont été changés.

Le diagnostic de fonctionnement de la génératrice tachymétrique s'avère parfois délicat, comme dans le cas de l'événement. La valise « test SPAD » utilisée en unité teste les génératrices à une vitesse d'entraînement de 500 tr/min (ce test est identique à celui pratiqué en vol par le pilote avant l'atterrissage). Cette vitesse d'entraînement correspond à une vitesse sol des roues de l'ordre de 30 km/h (soit 16 kt environ). Au NTI2, les génératrices tachymétriques sont entraînées à 1 800 tr/min et 3 600 tr/min.

Enfin, les valises test SPAD ne sont pas étalonnées périodiquement. Elles sont dépannées selon état. Sur l'ensemble des valises en dotation dans les unités, 50 % d'entre elles sont en réparation.

Les génératrices tachymétriques étant classées « matériels consommables », aucun retour d'expérience sur leur vieillissement ou sur leurs dysfonctionnements n'est réellement tracé au-delà de la durée contractuelle de garantie du constructeur (1 an de fonctionnement). De même, lorsqu'elles sont rebutées, aucun examen n'est réalisé afin de comprendre l'origine de la défaillance.

2.2. Causes de l'engagement de la barrière d'arrêt

Confronté à une absence totale de freinage sur le circuit normal, le pilote ne parvient pas à immobiliser son appareil et engage la barrière d'arrêt en bout de piste.

Les investigations ont montré que le circuit de freinage secours et le sélecteur freins 2⁵ fonctionnaient nominalement au moment de l'événement : **toute cause technique à l'origine de l'engagement de la barrière d'arrêt est écartée.**

L'analyse qui suit s'attache à déterminer les causes de l'engagement de la barrière d'arrêt dans les domaines environnemental et des facteurs humains.

2.2.1. Séquence d'événements à partir du toucher des roues du train principal

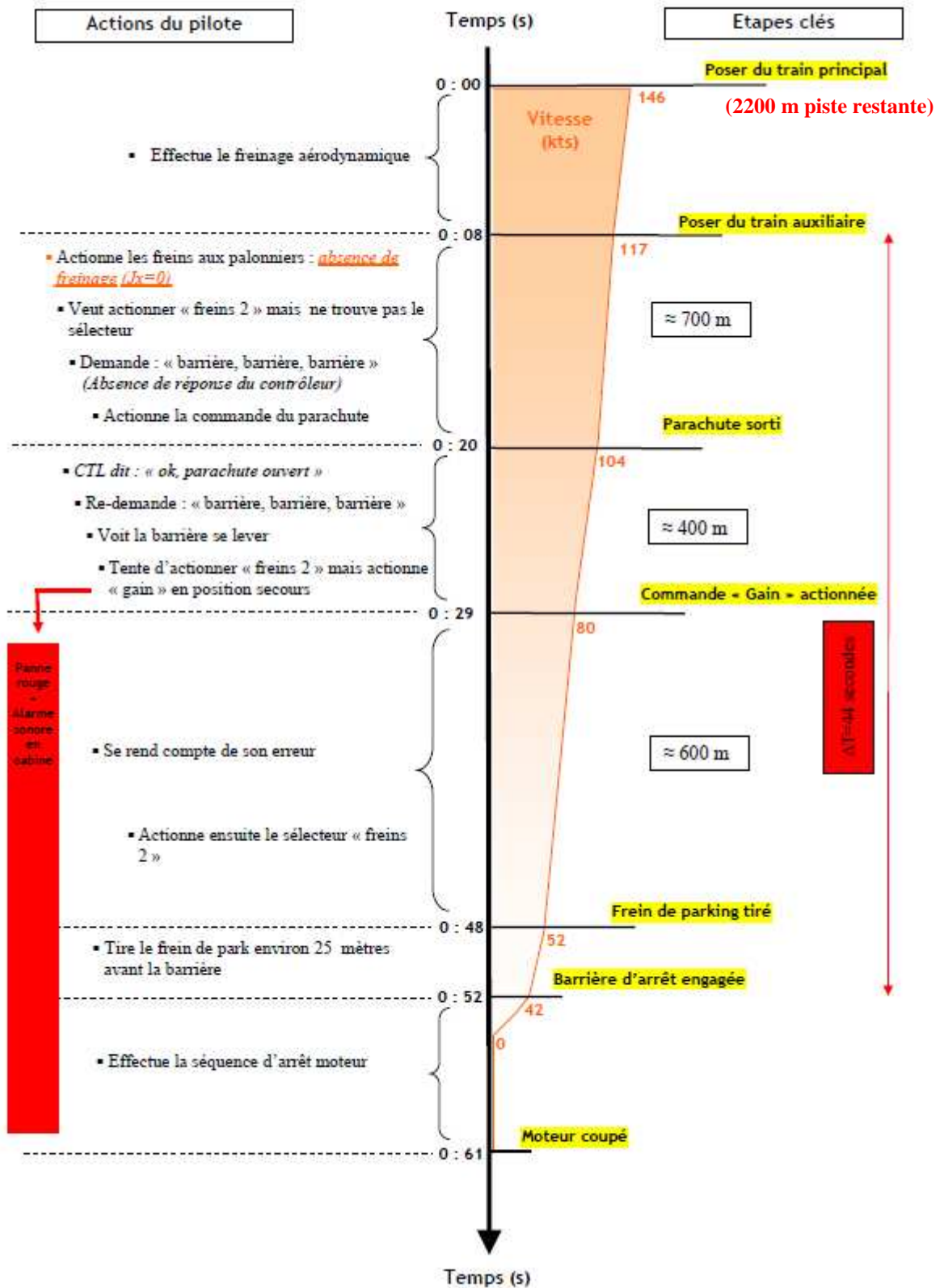
Après avoir effectué un break à l'est comme prévu, la procédure de sortie du train est appliquée : réajustement et vérification des paramètres moteur avant la sortie du train à 217 kt. Le test SPAD est effectué. La tour de contrôle autorise le Mirage 2000 C n° 89 à l'atterrissage.

Les éléments de finale sont standards, le toucher des roues est estimé à 2 200 mètres de piste restante à la vitesse de 147 kt. A l'issue du freinage aérodynamique, le pilote pose la roulette de nez à 117 kt. Il vérifie notamment qu'à 120 kt, il dispose de 1500 mètres de piste restante. Il estime à cet instant que les paramètres sont bons et que l'atterrissage est nominal. Il vérifie alors les freins et constate qu'ils sont inefficaces.

La chronologie des actions du pilote est représentée sur le schéma qui suit. En l'absence d'enregistrement vidéo issu de la VTH, elle repose sur les témoignages, l'enregistreur de paramètres et les communications audio avec la tour de contrôle.

Cette chronologie débute au moment où le train principal de l'appareil touche le sol.

⁵ Le sélecteur freins est la commande qui permet de basculer du circuit de freinage normal (freins 1) vers le circuit de freinage secours (freins 2)



Séquence d'événements à partir du toucher des roues du train principal

Au moment où le pilote constate l'absence totale de freinage, il pense immédiatement à sélectionner le circuit de freinage secours (actionner le sélecteur FREINS 2). De manière réflexe, il place sa main gauche vers le panneau horizontal gauche et regarde vers la direction de sa main mais il ne trouve pas l'interrupteur. Immédiatement, il demande au contrôleur de lever la barrière d'arrêt. La barrière ne se lève pas.

Le pilote sort alors le parachute à 104 kt puis demande une deuxième fois le relevage de la barrière qui se lève.

Dès lors, le pilote cherche à nouveau en cabine l'interrupteur FREINS 2 mais actionne la commande GAIN. Constatant son erreur, il recherche une nouvelle fois l'interrupteur qu'il actionne une cinquantaine de mètres avant la barrière selon son témoignage. Mais la proximité de la barrière le pousse à tirer instinctivement sur le frein de parking. Un nuage de fumée est observé par la vigie et l'appareil engage la barrière d'arrêt qui est délovée de 4 mètres.

Le moteur est coupé 9 secondes après l'engagement barrière. Le pilote bascule les interrupteurs BP et Coupe-feu sur arrêt. La batterie est maintenue sur marche. Les secours arrivent, puis coupent les sangles de la barrière afin d'ouvrir la verrière. Dès que le siège est sécurisé, le pilote sort de l'avion avant d'être pris en charge par le médecin pour une visite médicale.

2.2.2. Recherche des causes dans le domaine environnemental

2.2.2.1. Luminosité en cabine

La gêne occasionnée par le soleil a été soulignée par le pilote. En effet, il se pose à 12 h 00 en piste 18. Il avait le soleil de face, lui imposant le port de la visière fumée. En l'absence de freinage, et ne parvenant pas immédiatement à sélectionner FREINS 2, il lui a été nécessaire de regarder dans la cabine. Le contraste important de luminosité entre l'extérieur et l'intérieur de la cabine, associé au port de la visière fumée a assombri sa vision le gênant considérablement, à un moment où il est notamment confronté à une situation d'urgence.

L'hypothèse d'une gêne occasionnée par le contraste de luminosité entre l'extérieur et l'intérieur de la cabine contribuant à l'engagement barrière est possible.

2.2.2.2. Equipement du pilote

Le pilote est équipé de la combinaison étanche et son siège éjectable d'un harnais de nouvelle génération. Il est recommandé de loger les sangles de ce nouvel harnais, plus longues que celles du harnais précédent, à l'intérieur du pantalon anti-G car elles peuvent générer un risque d'accrochage intempestif d'interrupteurs au niveau des banquettes gauche et droite de la cabine.

Il est à noter que les jours suivants, à l'occasion de vols avec la même configuration d'équipements (combinaison étanche et nouveau harnais), il a été constaté que les sangles du harnais auraient pu cacher l'interrupteur FREINS 2.

Le pantalon anti-G et les sangles du harnais ont pu empêcher le pilote de voir directement le sélecteur FREINS 2. L'hypothèse d'une gêne occasionnée par son équipement est possible.

2.2.3. Recherche des causes dans le domaine des facteurs humains et organisationnels

2.2.3.1. Nature de l'erreur

Dès le toucher des roues principales, le pilote actionne les pédales de freins et réalise immédiatement qu'il n'a aucun freinage sur le circuit 1. En situation de panne soudaine et réelle, il ne parvient pas à actionner, de manière automatisée en situation d'urgence, le sélecteur FREINS 2. Or il connaît la procédure (il sait quelle est l'action prévue par la procédure ou nécessaire pour atteindre son objectif) et maîtrise son environnement cabine.

Ce type d'erreur peut être qualifié comme une **erreur de routine**, qui se définit comme étant le résultat d'une action automatisée incorrecte. C'est une erreur qui survient dans un comportement « automatisé », ne mettant en œuvre aucun raisonnement et au cours duquel les actions sont effectuées de manière quasi-automatique après un apprentissage (pouvant être relativement long). Une fois intégrées, l'appel à ces fonctions nécessite un minimum de ressources pour être mises en œuvre.

Dans cet événement, le pilote prend immédiatement conscience de son erreur dont les conséquences indirectes vont s'avérer plus importantes en favorisant l'émergence d'autres erreurs et l'entrée dans une chaîne d'erreurs.

2.2.3.2. Conditions de survenue de l'erreur de routine

- Hypothèse liée à un manque de technicité ou un défaut de connaissance

Le pilote totalise environ 700 heures de vol sur Mirage 2000 C. Compte-tenu de son expérience, une méconnaissance de l'emplacement des commandes ne saurait être envisagée.

De même, il connaît la procédure relative à la panne de freinage à l'atterrissage (intitulée dans le mémento pilote « Jx inférieur à -0,2 à l'atterrissage », voir annexe 4).

L'hypothèse d'un manque de technicité ou d'un défaut de connaissance est rejetée.

- Hypothèse liée à un manque d'entraînement à la panne de freinage à l'atterrissage

Avant cet incident, le pilote n'a jamais été confronté à une panne de freinage à l'atterrissage. Son unique action sur le sélecteur FREINS 2 à l'atterrissage en conditions réelles a eu lieu suite à un test SPAD négatif en vol lors de sa 10^{ème} heure de vol sur Mirage 2000.

La fréquence des entraînements relatifs aux pannes est d'une fois par mois lors des tests écrits CAPs⁶ et d'une à deux fois par an lors des séances de simulateurs dédiées. Toutefois, la panne de freinage à l'atterrissage est une panne qui n'est jamais pratiquée, que ce soit au simulateur ou en vol.

De nombreux pilotes ont été interrogés au cours de l'enquête sur la procédure « Jx inférieur à -0,2 g à l'atterrissage » et ils ont tous à l'esprit de passer immédiatement le sélecteur sur FREINS 2 mais ce geste n'est pas mécanisé. Rares sont les pilotes qui réagiraient par une remise de gaz qui est pourtant le 1^{er} item inscrit sur le mémento pilote. Là encore, cette action n'est pas mécanisée. En effet, il est interdit de s'entraîner aux *touch and go* en escadron, sauf dans les escadrons de transformation, ou à condition d'avoir un moniteur instructeur en place arrière.

Les entraînements aux *touch and go* sur simulateurs ne sont pas pratiqués car ils ne sont pas jugés suffisamment réalistes.

L'hypothèse d'un manque d'entraînement à la panne de freinage à l'atterrissage ayant contribué à l'erreur de routine est certaine.

⁶ CAPs : *Critical Action Procedures* - toutes les pannes nécessitant une action immédiate sans avoir le temps de sortir, lire et appliquer la check-list. Ceci implique de les connaître « par cœur ».

- Hypothèse liée à une méthode d'apprentissage et de maintien des basiques inadéquate

Les procédures, *check-lists* et briefings sont des outils qui permettent aux équipages de détecter, d'empêcher ou de récupérer des erreurs.

L'enquête a montré que la méthode d'apprentissage et d'entretien de la procédure « Jx inférieur à -0,2 g à l'atterrissage » consiste uniquement à réciter les items du memento pilote. Or, en situation réelle d'urgence, le seul apprentissage par cœur ne permet pas de l'appliquer concrètement.

En l'absence de mécanisation de la procédure (ici manipulation du sélecteur FREINS 2), il peut ainsi se produire des difficultés d'activation du mécanisme en cas d'urgence réelle.

- Le pilote n'a pas d'activation en mémoire de travail de la procédure de passage sur FREINS 2. En effet, les actions vitales avant décollage ne sont pas standardisées. Certains pilotes touchent, voire manipulent le sélecteur frein au cours des actions vitales avant décollage. D'autres le visualisent uniquement.
- Le premier item qui est de « remettre les gaz » ne fait pas partie des entraînements réguliers. Enseigné uniquement en début de formation, il est autorisé en cas de problème. Mais il est interdit de s'entraîner en conditions réelles, sauf dans les escadrons de transformation, ou à condition d'avoir un « moniteur instructeur » en place arrière.

La connaissance « par cœur » est primordiale mais doit être complétée par une pratique acquise par répétition et entretenue de manière régulière.

L'hypothèse d'une méthode d'apprentissage et de maintien des basiques inadéquate ayant pu contribuer à l'erreur de manipulation du sélecteur frein est probable.

2.2.3.3. Conditions de non récupération de l'erreur de routine

Conscient de son erreur (il ne parvient pas à sélectionner immédiatement FREINS 2), le pilote va rapidement s'enfermer dans une chaîne d'erreurs successives qui ne lui permettront pas de récupérer la maîtrise de la situation. Ces erreurs successives ont été favorisées par un état de stress important et une absence de réponse du contrôleur.

- Niveau élevé de stress

Le pilote a été soumis à un stress qui est inhérent à une panne de freinage à l'atterrissage, sans signe précurseur en vol ou au sol. Lorsqu'il ne parvient pas à appliquer son plan d'action et la procédure en vigueur pour palier cette panne (passage FREINS 2), le pilote prend non seulement immédiatement conscience de son erreur mais perçoit d'emblée qu'il risque de ne pas pouvoir gérer la situation.

Dès lors, l'enchaînement soudain et rapide auquel est confronté le pilote, à partir d'une situation sereine à faible charge cognitive (fin de mission, vol de liaison, appareil isolé, conditions météorologiques favorables) génère un niveau de stress qui augmente soudainement et altère ses capacités. Il s'en suit alors une « réaction en chaîne » du stress.

Focalisé sur l'échec de son action initiale, il va ensuite entamer une série de plans d'actions successifs qui vont alimenter son stress. En effet, à l'issue du check freins défectueux, le pilote est surpris, c'est l'incompréhension dans l'avion. La pensée immédiate est FREINS 2. Cependant, il ne voit pas l'interrupteur, ne le trouve pas. Il change alors de plan d'action et demande le relevage de la barrière d'arrêt. Elle ne se lève pas et il la demande à nouveau.

A partir de là, il revient sur son plan d'action initial, c'est-à-dire FREINS 2. Mais à cet instant, l'interrupteur GAIN est sélectionné par erreur. Constatant immédiatement son erreur, il revient voir, corrige son action et sélectionne a priori FREINS 2 mais il n'actionnera pas les pédales de frein.

L'option de la remise de gaz est alors écartée par le pilote, estimant être trop proche de la barrière à ce moment là. Son dernier plan d'action dans le but d'immobiliser son appareil sera de tirer le frein de parking juste avant d'engager la barrière.

Sous stress, le pilote n'a pas pu réagir en développant une stratégie de raisonnement basée sur l'expérience.

L'hypothèse selon laquelle une situation de stress n'a pas permis au pilote de récupérer son erreur est certaine.

- Capture de l'attention résultant de l'absence de réponse du contrôleur

Au moment où le Mirage 2000 C n° 89 (Coton Lima 3) se pose, à 8 Nm au nord, sur l'aérodrome de Ghisonaccia, un Cessna 172 encore au sol, demande sur la fréquence VHF à faire des tours de piste sur l'aérodrome de Ghisonaccia⁷. Les deux appareils sont donc sur deux fréquences différentes. Le seul point de convergence radio étant la tour de Solenzara.

La réponse du contrôleur est simultanée avec la 1^{ère} demande de relevage de barrière de Coton Lima 3. La ségrégation entre les deux fréquences est respectée. Mais le niveau sonore de la réponse du contrôleur couvre le message de Coton Lima 3. Les deux personnes présentes dans la tour de contrôle, le chef vigie et le contrôleur n'entendent pas le message émis par le haut-parleur du poste UHF.

Le directeur des vols à poste un étage en-dessous de la vigie, qui écoute seulement la fréquence tour UHF (pas d'écoute du poste VHF de Ghisonaccia), entend clairement les deux demandes successives de relevage de la barrière et se demande alors pourquoi celle-ci ne se lève pas à l'issue de la première demande.

La sortie du parachute surprend alors le contrôleur qui annonce aussitôt que le parachute est sorti. Immédiatement après, Coton Lima 3 demande une seconde fois, de manière plus insistante, le relevage de la barrière. Cette fois, le message est entendu et le contrôleur lève manuellement la barrière d'arrêt.

⁷ C'est la procédure normale à partir du moment où la zone R65 est active, le trafic de Ghisonaccia est contrôlé par Solenzara

Malgré l'atterrissage en cours du Mirage 2000 C, le contrôleur est intervenu à la radio avec un autre appareil qui ignore la séquence de décollage ou d'atterrissage. Cette intervention ne lui a pas permis d'entendre les communications émises par le pilote du Mirage 2000 C.

L'absence de réponse du contrôleur et donc du déclenchement de la barrière d'arrêt à sa demande a été générateur d'un stress supplémentaire pour le pilote confronté à une procédure d'urgence. L'attention du pilote s'est focalisée sur un autre objet (ici la barrière d'arrêt) que la tâche en cours (gestion de la panne - sélecteur FREINS 2).

L'absence de réponse du contrôleur à la demande de relevage de la barrière a perturbé le pilote en portant son attention sur une problématique autre que la tâche à réaliser.

- Erreur de capture en actionnant la commande GAIN au lieu du sélecteur FREINS 2

Une fois la barrière levée, le pilote se concentre de nouveau sur la résolution de sa panne. Il revient ainsi à son plan d'action initial mais son état de stress est particulièrement élevé. Or, au lieu d'actionner le sélecteur FREINS 2, il actionne la commande GAIN en position secours. Cette action correspond à une erreur de capture qui se traduit par le remplacement d'une action prévue par un programme cognitif plus fréquemment utilisé ou plus récent.

Il est couramment observé que, lors de situations de tension ou de mobilisation de ressources plus élevées qu'à l'habitude, des séquences d'actions antérieures fassent résurgence. Son état de tension (issu du stress occasionné par la prise de conscience de son erreur) peut avoir levé l'inhibition de routines anciennes. Il sait qu'il doit actionner une commande située sur le côté gauche. Son dernier exercice de panne au cours duquel il a dû actionner une commande du côté gauche avait été réalisé en septembre 2010, il s'agissait d'une panne gain. Ainsi, le pilote a actionné la commande gain en position secours au lieu d'actionner le sélecteur FREINS 2. L'appui sur la commande gain est le résultat d'une réponse comportementale. Cette réaction inadaptée a pu surprendre le pilote lui-même et contribuer ainsi à augmenter fortement son stress.

Cette erreur de capture, qui survient après une première tentative infructueuse, perçue d'emblée comme un échec, et une absence de réponse du contrôleur a eu pour effet de majorer la pression temporelle déjà présente.

Dans l'urgence, le pilote actionne la commande GAIN au lieu du sélecteur FREINS 2. Cette erreur de capture peut être le résultat d'une séquence d'actions issue d'un exercice de panne précédemment effectué qui s'est substituée à une séquence d'actions à entreprendre dans l'urgence.

2.3. Gestion de l'engagement barrière

Après deux tentatives infructueuses, le pilote a finalement actionné le sélecteur FREINS 2 environ 50 mètres avant la barrière. Mais son état de stress est particulièrement élevé. Au lieu d'actionner les pédales de frein, il va une nouvelle fois changer de plan d'action en essayant d'immobiliser l'appareil avant la barrière d'arrêt car il estime sa vitesse suffisamment faible (entre 40 et 50 kt).

Dès lors, il occulte la procédure d'engagement barrière puisque son objectif est d'éviter de l'engager. Il ne met pas son appareil en configuration et va actionner instinctivement le frein de parking car il veut à tout prix immobiliser son appareil avant la barrière.

L'enquête a montré qu'il n'y avait pas d'entraînement régulier spécifique à l'engagement barrière. Une répétition de la procédure a néanmoins lieu avant chaque décollage (cela fait partie du briefing avant décollage). Ainsi il est possible qu'une sous-estimation des risques liés à l'engagement barrière ait contribué au non respect de la procédure. En effet, pour la plupart des pilotes, les risques sont une blessure potentielle en cas de fragilisation une fois engagé ou un lacet non contrôlé pendant l'engagement. L'engagement avec un frein de parking serré ou en freinant reste un risque moins connu.

Une fois l'appareil immobilisé dans la barrière d'arrêt et après avoir coupé le moteur, le pilote bascule les interrupteurs BP et coupe-feu sur arrêt. La batterie est maintenue sur marche. Les secours arrivent, un échange oral est débuté entre le pompier responsable et le pilote pour connaître l'état du pilote et l'armement de l'avion. Les secours commencent à couper des sangles mais l'excès de tension dans les filets les conduisent à interrompre leur action, à demander à l'équipe de piste de détendre la barrière et à prendre des mesures de précaution. A cet instant, le pilote a souffert d'un manque de communication de la part des pompiers car ils ont ordonné à tous les personnels autour de l'appareil de reculer de 20 mètres sans en informer le pilote. Il s'est alors demandé ce qu'il se passait (craignant un feu sous l'avion ou une fuite de carburant).

Les sangles sont finalement coupées quelques minutes après, la verrière est ouverte, le siège est sécurisé. Le pilote sort de l'avion quinze minutes environ après l'engagement barrière. Il est pris en charge immédiatement par le médecin pour une visite médicale.

3. CONCLUSION

Le 6 février 2011, le Mirage 2000 C n° 89 engage la barrière d'arrêt en extrémité de piste sur la base aérienne de Solenzara suite à une absence totale de freinage sur le circuit normal.

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

- L'événement se déroule lors de l'atterrissage, au cours de la phase de décélération, à l'issue d'un vol de transit entre Orange et Solenzara.
- Après le toucher des roues du train auxiliaire, le pilote est confronté à une absence totale de freinage sur le circuit normal.
- L'aéronef a été entretenu conformément à la réglementation en vigueur.
- Les investigations menées sur le système de freinage ont conclu que l'absence totale de freinage sur le circuit 1 résulte du dysfonctionnement des deux génératrices tachymétriques du train principal au moment de l'événement.
- Le circuit de freinage secours (circuit 2) fonctionnait au moment de l'événement.
- Bien qu'expérimenté, le pilote ne parvient pas à actionner le sélecteur FREINS 2 (circuit secours) et il engage la barrière d'arrêt en extrémité de piste, à une vitesse de 52 kt.
- Au cours de l'enquête, une étude générale sur les génératrices tachymétriques a mis en évidence des pannes récurrentes de ces équipements. Rapportées par l'utilisateur depuis 1997, le taux de récurrence des pannes ne semble pas se réduire malgré la modification de conception de la génératrice tachymétrique apportée par l'industriel.
- Enfin, il existe peu de recherches approfondies sur l'origine des défaillances des génératrices tachymétriques en raison de la classification de l'équipement comme matériel consommable.

3.2. Causes de l'événement

Cet incident grave résulte d'une part d'un dysfonctionnement des deux génératrices tachymétriques du train principal et d'autre part d'une erreur de routine du pilote qui n'est pas parvenu à sélectionner le circuit de freinage secours.

Les causes du dysfonctionnement des deux génératrices tachymétriques n'ont pas pu être déterminées avec certitude. Pour chacune d'elle, une hypothèse a été avancée.

- Pour la génératrice tachymétrique du train principal gauche (génératrice ancienne version) : une surchauffe excessive de l'ensemble roue/frein produite au cours d'un événement antérieur a probablement provoqué des dommages internes à la génératrice, ce qui a conduit, après plusieurs heures de fonctionnement, à la rupture de son bobinage.
- Pour la génératrice tachymétrique du train principal droit (génératrice nouvelle version) : son dysfonctionnement au moment de l'événement résulte probablement de la présence de dépôts provenant de l'extérieur (pollution).

Les causes de l'erreur de routine se situent dans le domaine des facteurs humains et environnementaux :

- confronté à une situation d'urgence, le pilote n'a pas pu activer une action automatisée par manque d'entraînement à la procédure relative à une panne de freinage à l'atterrissage. La méthode d'apprentissage (apprentissage par cœur des actions réflexes sans pratique régulière) peut s'avérer inadéquate en cas de situation réelle d'urgence ;
- un manque d'entraînement aux *touch and go* n'a pas permis au pilote d'envisager, par réflexe, une remise de gaz dès qu'il constate, au toucher des roues, la panne de freinage.

Enfin, plusieurs facteurs ont pu contribuer à la non-récupération de son erreur :

- l'absence de réponse du contrôleur à la demande initiale de relevage de la barrière d'arrêt ;
- la pression temporelle et le niveau de stress élevé du pilote conscient de son erreur ;
- un enchaînement d'autres erreurs (réaction en chaîne d'erreurs) ;
- des éléments d'environnement (luminosité, équipement) ayant pu gêner le pilote en cabine.

4. RECOMMANDATIONS DE SECURITE

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

4.1.1. Dysfonctionnements des génératrices tachymétriques

L'enquête a montré que la défaillance des 2 génératrices tachymétriques du train principal était à l'origine de la perte totale de freinage sur le circuit normal à l'atterrissage.

Les types de génératrices tachymétriques avionnés connaissent des dysfonctionnements récurrents depuis plusieurs années. Cet aspect, régulièrement rapporté par l'utilisateur, a déjà été souligné dans le cadre de l'enquête technique BEAD-air-A-2010-016-I au cours duquel un Mirage 2000 D est sorti de piste suite à la défaillance de la génératrice tachymétrique du train auxiliaire.

Des modifications de conception des génératrices tachymétriques ont été effectuées depuis 2005, sans résultat probant en utilisation. Classé comme un équipement « consommable », aucune recherche approfondie n'a réellement été effectuée afin de comprendre l'origine exacte des dysfonctionnements des génératrices tachymétriques sur Mirage 2000. Au cours de l'enquête, deux hypothèses ont été émises afin d'expliquer l'endommagement constaté après démontage des génératrices tachymétriques et leurs scénarios de dégradation respectifs. Des travaux complémentaires sont nécessaires afin de confirmer ces hypothèses.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande à :

la DGA, en liaison avec l'utilisateur et l'industriel de mettre en place les actions nécessaires afin de déterminer les causes exactes des dysfonctionnements récurrents des génératrices tachymétriques de type C20260000 et C20260000-1 et de le tenir informé des résultats pertinents en cours, ou le cas échéant, des conclusions des travaux menés.

4.1.2. Suivi en utilisation des génératrices tachymétriques

A ce jour, les génératrices tachymétriques sont déposées selon état, sans suivi régulier et/ou particulier en utilisation. Aucun contrôle périodique n'est prévu pour ce type d'équipement, bien que des problèmes fréquents soient remontés par l'utilisateur.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande à :

la DGA, en concertation avec l'armée de l'air, la SIMMAD et l'industriel, de mener une réflexion sur :

- **une évolution du plan de maintenance des génératrices tachymétriques (suivi en utilisation, contrôles périodiques),**
- **des améliorations possibles des tests de fonctionnements des génératrices tachymétriques en unités (valises de tests SPAD, etc...).**

4.1.3. Apprentissage et maintien des basiques

Dans le cas d'un problème de freinage à l'atterrissage, le mémento pilote prévoit en premier lieu de remettre les gaz. Or, par manque d'entraînement, peu de pilotes sont conditionnés à réagir conformément à cette option et la plupart d'entre eux appliquent systématiquement la seconde partie de la procédure qui est de sélectionner FREINS 2.

Par ailleurs le pilote, bien qu'expérimenté, n'est pas parvenu à sélectionner le circuit de freinage secours (actionner le sélecteur FREINS 2) en situation réelle d'urgence. Un apprentissage « par cœur » des actions réflexes peut s'avérer insuffisante en situation critique s'il n'y a aucune pratique régulière.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande à :

l'armée de l'air :

- **d'étudier la possibilité de mettre en place des séances d'entraînements relatives aux *touch and go* au sein de l'ensemble des escadrons (déjà autorisé au centre d'expériences aériennes militaires) ;**
- **d'inclure dans les exercices CAPs (*critical action procedures*) le traitement de la panne de freinage à l'atterrissage.**

4.2. Mesures de prévention n'ayant pas trait directement à l'événement

- L'enquête a montré qu'il est possible que le pilote ait été gêné par son équipement de vol pour visualiser le sélecteur FREINS 2.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande à :

l'armée de l'air de sensibiliser les pilotes sur l'intérêt de porter les équipements de vol lors des séances de simulateurs afin de recréer le plus fidèlement possible les conditions du vol.

- Une fois l'appareil immobilisé dans les sangles de la barrière, le pilote n'a eu aucune information de la part des équipes de secours sur les actions en cours.

En conséquence, le bureau enquêtes accidents défense air recommande :

aux unités de secours de verbaliser davantage les actions entreprises aux personnes assistées afin d'éviter tout risque de réaction inadaptée de leurs parts.

ANNEXES

ANNEXE 1	Présentation du circuit de freinage du Mirage 2000 C.....	43
ANNEXE 2	Schéma de composition illustrée d'une génératrice tachymétrique.....	50
ANNEXE 3	Historique de la génératrice tachymétrique gauche n° 04825 du Mirage 2000 C n° 89.....	51
ANNEXE 4	Extrait du mémento pilote.....	52

ANNEXE 1

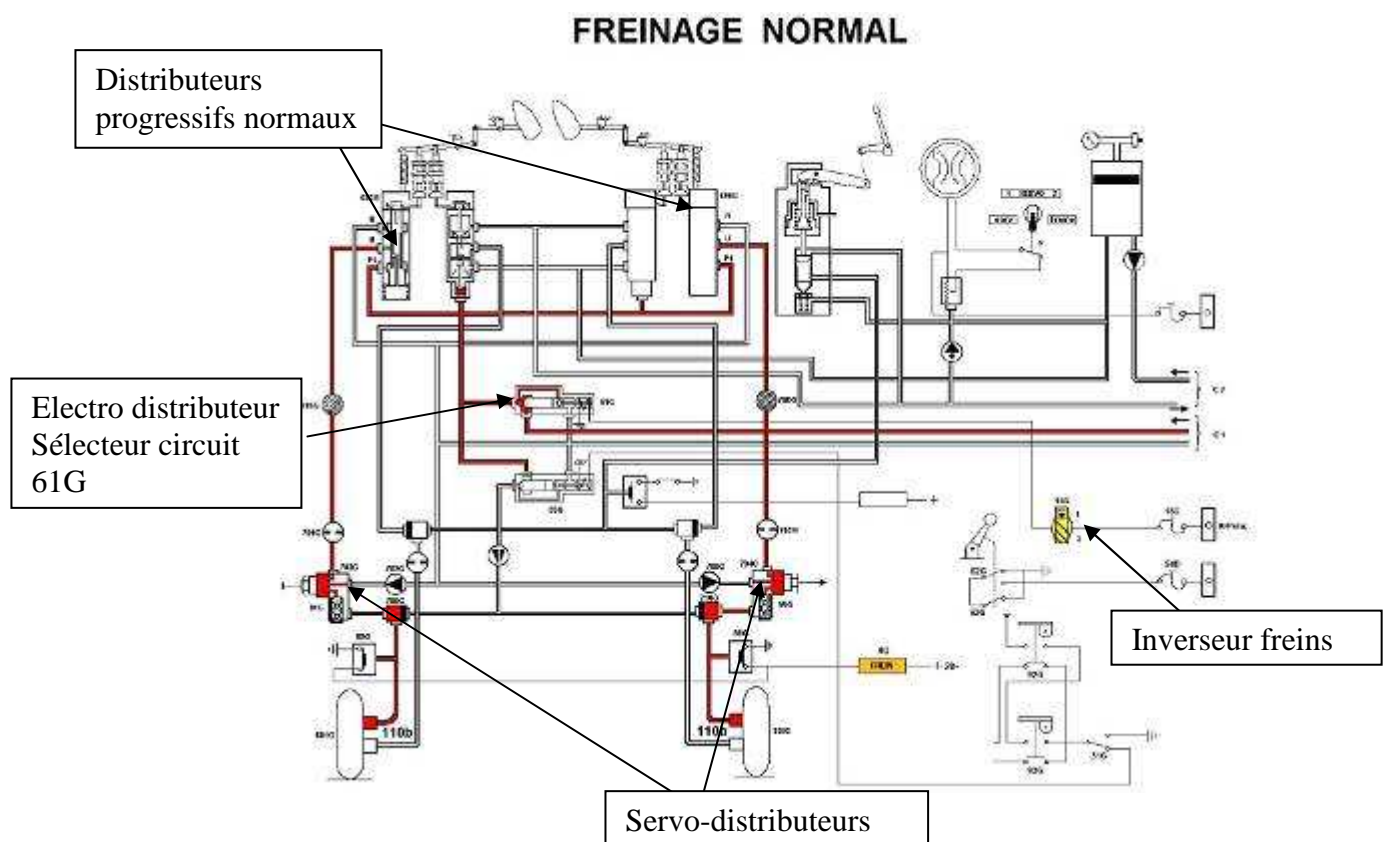
Présentation du circuit de freinage du Mirage 2000 C

Le Mirage 2000 est équipé de deux circuits de freinage indépendants :

- un circuit de freinage normal, alimenté hydrauliquement par la génération circuit 1. Il permet d'obtenir :
 - un freinage progressif et différentiel normalement contrôlé par un système perfectionné anti-dérapant : le SPAD ;
 - un freinage non différentiel utilisé pour le point fixe : lorsque les pédales sont enfoncées à fond, que la manette des gaz du poste avant est au-delà de 80 % et que l'amortisseur avant est comprimé ;
- un circuit de freinage secours, alimenté hydrauliquement par la génération circuit 2. Il permet d'obtenir :
 - un freinage progressif et différentiel à partir des pédales ;
 - un freinage, non différentiel, utilisé pour le freinage au parking, à partir de la manette de commande de freinage au poste avant.

La signalisation du freinage est matérialisée aux deux postes par un voyant FREIN, un voyant SPAD et un voyant PARK.

Présentation circuit frein normal



Le freinage normal s'obtient lorsque :

- l'inverseur FREINS est positionné sur la position 1 ;
- le pilote enfonce les pédales de l'un de deux postes.

La pression hydraulique de la génération circuit 1 est envoyée vers les distributeurs progressifs normaux au travers de l'électro-distributeur 61 G. L'enfoncement des pédales agit sur les leviers des distributeurs. Les leviers poussent les tiroirs des distributeurs, les retours sont isolés. La pression détendue par ces distributeurs est admise aux servo-distributeurs SPAD 90 G et 91 G.

Ceux-ci délivrent, vers les blocs de freins, une pression régulée en fonction des ordres reçus du boîtier de régulation SPAD ($90 \text{ bars} \leq P_{\text{MAX}} \leq 110 \text{ bars}$).

La pression est admise aux blocs freins après passage dans les clapets navettes 709 G et 710 G.

Les mano-contacteurs 88 G et 89 G signalent la mise en pression du circuit par l'allumage du voyant FREIN aux deux tableaux de configuration ($20 \text{ bars} < P < 28 \text{ bars}$).

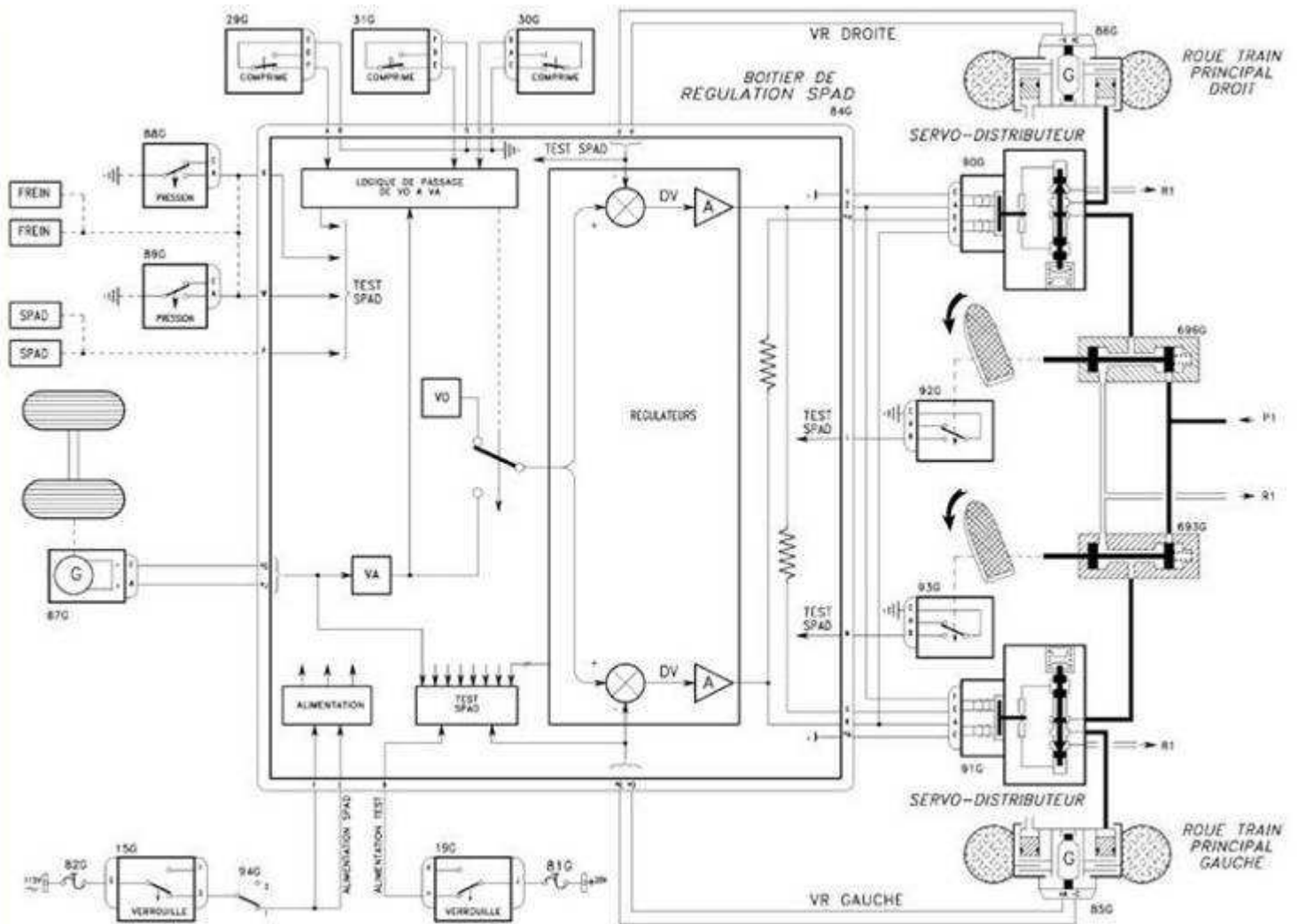
Fonctionnement détaillé du SPAD

Le SPAD n'est actif que dans le cadre d'un freinage normal, alimenté hydrauliquement par la génération circuit 1.

Le boîtier de régulation SPAD (84G) permet de contrôler le freinage de telle sorte que l'adhérence pneu-sol des roues freinées soit aussi près que possible de son maximum. L'adhérence étant fonction du glissement, le boîtier de régulation permet d'ajuster la vitesse de rotation de la roue freinée autour d'une vitesse de référence, correspondant à une valeur donnée de glissement fournissant le maximum du coefficient d'adhérence en fonction de la vitesse de l'avion au roulage.

Le SPAD est un régulateur de freinage comprenant :

- un système de détection mesurant la vitesse des roues et distribuant ces informations au boîtier de régulation ;
- un système de calcul, recherchant en permanence le glissement pour lequel l'adhérence des pneus est maximum ;
- un système de régulation, imposant à la roue freinée la vitesse correspondant au paramètre précité, afin d'assurer un freinage optimum ;
- deux servo-distributeurs.



Système de détection

Il est constitué de trois génératrices tachymétriques (85 G), (86 G) et (87 G) entraînées par chacune des roues des atterrisseurs principaux gauche et droit et par la roue gauche de l'atterrisseur auxiliaire. Chaque génératrice délivre un signal électrique continu proportionnel à la vitesse de rotation de la roue.

La vitesse de référence sol VA est donnée par la génératrice tachymétrique (87 G) du train auxiliaire. Les vitesses des roues freinées VR sont mesurées par les génératrices tachymétriques (85 G) et (86 G) du train principal.

Boitier de régulation

Il renferme une carte logique comprenant notamment les fonctions :

- VO, référence théorique qui simule une vitesse de l'avion à l'atterrissage (85 m/s) (280 ft/s) ;
- VA, vitesse angulaire de la roue gauche de l'atterrisseur auxiliaire, fournie par la génératrice tachymétrique (87 G) ;
- un régulateur double dont chaque voie contrôle une roue freinée. Chaque voie reçoit, sous forme de courant continu, l'information de vitesse roue freinée VR et roue non freinée VA ou VO ;
- une carte de test.

Servo-distributeurs (90G) et (91G)

Ils délivrent aux blocs freins la pression nécessaire au freinage commandée par le boitier régulateur SPAD.

Pour diminuer le mouvement de lacet en cas de freinage dissymétrique sur piste mouillée, une bobine du servo-distributeur droit (90 G) est montée en série avec une bobine du servo-distributeur gauche (91 G) pour conserver une symétrie partielle de freinage (50 %).

Principe du SPAD

- Interdiction de freinage avant l'impact

Si la pression était transmise aux freins, les roues seraient bloquées lors de la prise de contact avec le sol, ce qui entraînerait l'éclatement des pneus, il est donc nécessaire de disposer d'une interdiction de freinage avant l'impact.

Cette interdiction est obtenue par la comparaison des deux tensions VO et VR.

Les roues étant immobiles avant l'impact, VR signale que les roues sont bloquées, alors que VO représente une vitesse fictive de 85 m/s (280 ft/s).

La comparaison de VO et VR détermine un ΔV maximum, les régulateurs droit et gauche envoient un ordre de défreinage de 100 % aux deux servo-distributeurs (90G) et (91G) ces derniers mettent la pression provenant des distributeurs progressifs au retour : les roues sont libres à l'atterrissage.

- Freinage en position trois points

Dès que l'amortisseur de l'atterrisseur auxiliaire est comprimé et que le micro-rupteur du commutateur (31G) change d'état ou que la vitesse de la roue auxiliaire VRA est supérieure à un seuil (V_{seuil} de 20 ms/s) (65.6 ft/s), VO disparaît au profit de l'information VA de la roue de l'atterrisseur auxiliaire. La suppression de VO est auto-maintenue par un signal des commutateurs d'amortisseurs (29G) et (30G) de train principal comprimé (en cas de rebond).

Chaque comparateur reçoit sous forme de tension, l'information de vitesse avion VA et de vitesse de roue freinée VR, ce qui détermine un ΔV . La valeur de ΔV traitée par le régulateur génère l'ordre de défreinage qui est envoyé dans la bobine du servo-distributeur concerné qui module la pression délivrée par celui-ci au frein.

L'ordre de défreinage généré par le régulateur dépend de la valeur de $\Delta V = VA - VR$.

Trois cas sont à envisager :

- si $VR > VA \Rightarrow \Delta V < 0$: le régulateur autorise le freinage ;
- si $VR < VA \Rightarrow \Delta V > 0$: la roue tend à partir vers le patinage, le régulateur envoie un ordre de défreinage compris entre 0 % et 100 % proportionnel à la valeur de ΔV ;
- cas particulier du ΔV minimum > 0 : en dessous d'une VA minimum, il n'est plus possible d'obtenir un ΔV suffisant pour générer un ordre de défreinage. A partir de cette VA minimum, le SPAD devient inopérant.

Tests du SPAD

Intégrés au boîtier de régulation (84G) ils permettent la vérification du bon fonctionnement des différents composants de la régulation de freinage. Les tests se scindent en :

- test permanent au sol (à l'arrêt ou au roulage) ;
- test automatique en vol (train verrouillé bas). Différence VA remplacée par V0.

Le résultat des tests est visualisé au tableau configuration (9G) et (209G) par un voyant "SPAD" :

- allumé fixe pour indiquer une panne ;
- clignotant pour avertir le pilote qu'il doit lancer le test automatique avant l'atterrissage ;
- éteint, lorsque tout est correct.

Les circuits tests sont alimentés en 28 V continu au travers du déclencheur (81G) et du micro-rupteur (19G) (train verrouillé bas).

Détail des éléments vérifiés lors du test SPAD :

- 1°) vérification résistance ohmique de la ligne de la génératrice roue principale gauche
- 2°) vérification résistance ohmique de la ligne de la génératrice roue avant
- 3°) vérification résistance ohmique de la ligne de la génératrice roue principale droite
- 4°) ouverture du micro-rupteur pédale gauche (93 G)
- 5°) ouverture du micro-rupteur pédale droite (92 G)
- 6°) vérification correspondance entre la position physique avion commutateur d'amortisseur de l'atterrisseur principal gauche (29 G)
- 7°) vérification correspondance entre la position physique avion commutateur d'amortisseur de l'atterrisseur principal droit (30 G)
- 8°) vérification correspondance entre la position physique avion commutateur d'amortisseur de l'atterrisseur auxiliaire (31 G)
- 9°) vérifie que le mano contacteur (89 G) est ouvert
- 10°) vérifie que le mano contacteur (88 G) est ouvert
- 11°) vérifie l'apparition du $V_A = V_0$
- 12°) vérifie au sol à l'arrêt, l'absence de courant de défreinage dans la bobine AC du servo-distributeur du frein gauche et l'absence de courant de symétrisation de la bobine EF du servo-distributeur du frein droit
- 13°) vérifie au sol à l'arrêt, l'absence de courant de défreinage dans la bobine AC du servo-distributeur du frein droit et l'absence de courant de symétrisation de la bobine EF du servo-distributeur du frein gauche
- 14°) vérifie la fermeture du microrupteur pédale gauche (93 G)
- 15°) vérifie la fermeture du microrupteur pédale droite (92 G)
- 16°) vérifier le circuit de freinage (appui sur les pédales)
- 17°) vérifie le basculement du mano-contacteur de freinage résiduel (89 G) en présence d'une pression de freinage
- 18°) vérifie le basculement du mano-contacteur de freinage résiduel (88 G) en présence d'une pression de freinage
- 19°) vérifie l'élaboration de $V_A = 0$ pour $V_{gt} = 0$

20°) vérifie l'élaboration de VA en fonction de Vgt

21°) vérifie lors d'un glissement de la roue gauche supérieur au glissement de consigne, la présence d'un courant de freinage dans la bobine AC du servo-distributeur (91 G) du frein gauche et la présence d'un courant de symétrisation dans la bobine EF du servo-distributeur (90 G) du frein droit

22°) vérifie lors d'un glissement de la roue droite supérieur au glissement de consigne, la présence d'un courant de freinage dans la bobine « AC » du servo-distributeur (90 G) du frein droit et la présence d'un courant de symétrisation dans la bobine EF du servo-distributeur (91 G) du frein gauche

23°) vérifie l'absence de pression de freinage lorsqu'un courant de défreinage circule dans le servo-distributeur (91 G)

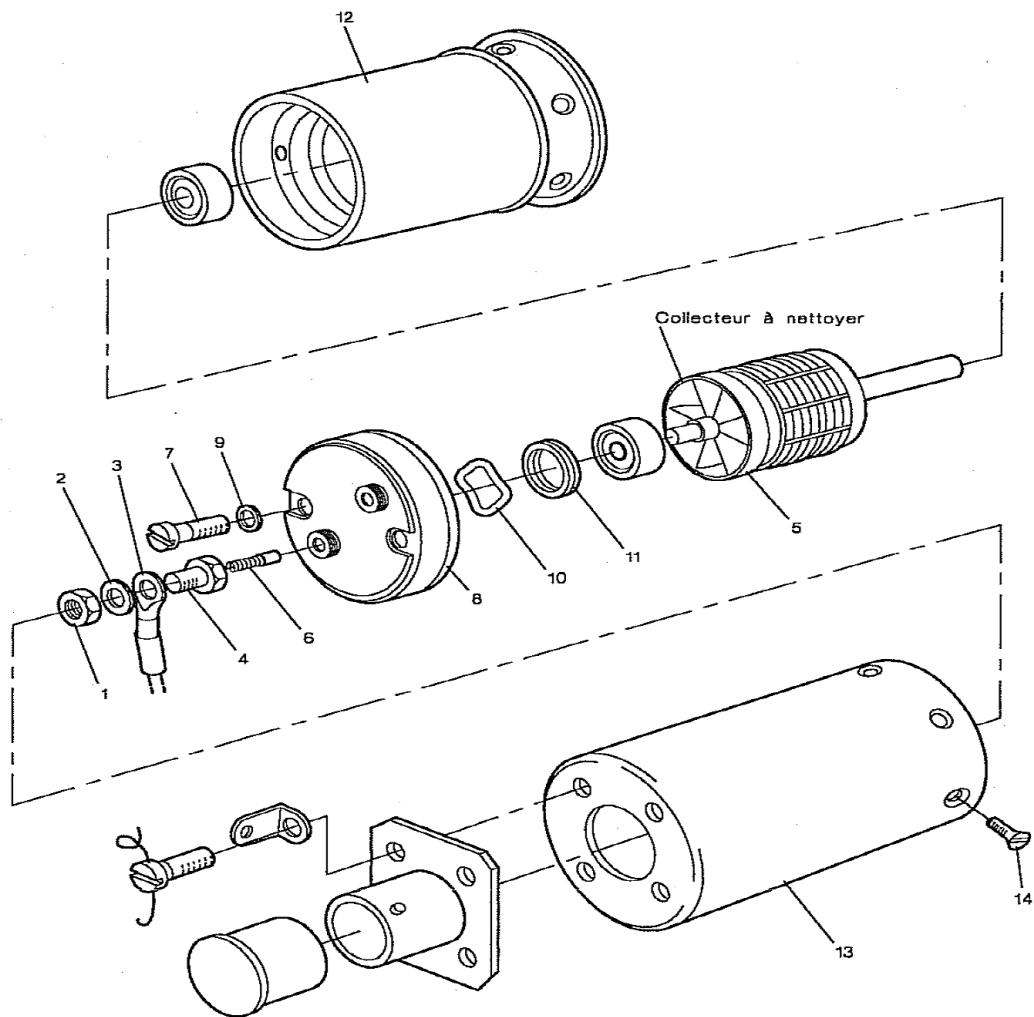
24°) vérifie lors d'un glissement de la roue gauche inférieur au glissement de consigne, l'absence d'un courant de freinage dans la bobine AC du servo-distributeur (91 G) du frein gauche et la présence d'un courant de symétrisation dans la bobine EF du servo-distributeur (90 G) du frein droit

25°) vérifie lors d'un glissement de la roue droite inférieur au glissement de consigne, l'absence d'un courant de freinage dans la bobine AC du servo-distributeur (90 G) du frein droit et la présence d'un courant de symétrisation dans la bobine EF du servo-distributeur (91 G) du frein gauche

26°) vérifie l'absence de freinage lorsqu'un courant de défreinage circule dans le servo-distributeur (90G)

ANNEXE 2

Schéma de composition illustrée d'une génératrice tachymétrique



- 1 : écrou
- 2 : rondelle
- 3 : cosse
- 4 : vis écrou support de balai
- 5 : rotor
- 6 : balai
- 7 : vis
- 8 : bride
- 9 : rondelle
- 10 : rondelle élastique
- 11 : entretoise
- 12 : stator
- 13 : boîtier (carcasse)
- 14 : vis

ANNEXE 3

Historique de la génératrice tachymétrique gauche n° 04825 du Mirage 2000 C n° 89

Le 18/10/2004 – 0 h 00 de fonctionnement : génératrice posée à gauche sur le M 2000 D 668
Suite à cette pose, la CT 15-50-607 "Contrôle du SPAD" a été appliquée (auto-test valise et test à l'entraîneur) sans déceler d'anomalie.

Le 09/03/2006 – 577 h 30 de fonctionnement : génératrice déposée bon état du M 2000 D 668

Le 18/03/2006 – 577 h 30 de fonctionnement : génératrice posée à gauche sur le M 2000 D 630.

Suite à cette pose, la CT 15-50-607 "Contrôle du SPAD" a été appliquée (auto-test valise et test à l'entraîneur) sans déceler d'anomalie.

Le 04/07/2006 – 686 h 00 de fonctionnement : génératrice déposée **mauvais état** suite interruption de décollage, éclatement des pneumatiques (VORTEX n° 2006 188 0011 du 03/07/2006). Cet événement s'est déroulé sur la base de Djibouti.

Lors de l'application de la CT 15-50-609 "Vérification à effectuer après surchauffe de l'ensemble roue et frein" (voir § B.3), il est mis en évidence par le technicien que la génératrice présente des traces de surchauffe (la peinture noire du corps de la génératrice est cloquée).

Il applique donc les consignes de la CT, lui recommandant de changer la génératrice.

Au vu du code de réparabilité du matériel (CB2), ce dernier est envoyé au NTI2 accompagnée de la FIT.

Le 01/08/2006 – 686 h 00 de fonctionnement :

Le NTI2 effectue les tests inscrits sur la notice technique de la génératrice tachymétrique NLB 573 (résistance, isolement, tests dynamiques). Le matériel est déclaré bon état.

Il est à noter qu'il n'apparaît pas sur la notice technique de critères de rebus pour une génératrice présentant des traces de surchauffe et/ou provenant d'un avion ayant subi une surchauffe de l'ensemble roue et frein (voir paragraphe 25.1 "Vérifications").

Le 30/08/2006 – 686 h 00 de fonctionnement : Générateur posée à gauche sur le M 2000 C 89.

Suite à cette pose, la CT 15-50-607 "Contrôle du SPAD" a été appliquée (auto-test valise et test à l'entraîneur) sans déceler d'anomalie.

Le 21/05/2007 – 875 h 45 de fonctionnement : génératrice déposée bon état, puis reposée à gauche le même jour.

Suite à cette pose, la CT 15-50-607 "Contrôle du SPAD" a été appliquée (auto-test valise et test à l'entraîneur) sans déceler d'anomalie.

Le 09/02/2011 – 1409 h 10 de fonctionnement : génératrice déposée **mauvais état** suite au non freinage du M 2000 C 89 sur FREINS 1.

Cet équipement est constaté défectueux par la valise de test SPAD.

ANNEXE 4

Extrait du mémento pilote

Jx INFÉRIEUR A - 0,2 A L'ATERRISSAGE sur piste sèche

- Si longueur de piste suffisante et en fonction des conditions (pannes, MTO, pétrole, etc.) :

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

- Sinon :

- 1 - Sortir le parachute (si installé)
- 2 - SELECTEUR BRAKES : 2
- 3 - Attendre 2 secondes
- 4 - Freiner modérément (SPAD inopérant)
- 5 - Contrôler le freinage à la VTH : $Jx = - 0.2 \text{ à } - 0.3$
- 6 - Se préparer à engager la barrière

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