

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

Rapport d'enquête de sécurité



A-2021-15-A

Date de l'évènement	30 juin 2021
Lieu	Base aérienne de Nancy Ochey (Meurthe-et-Moselle)
Type d'appareil	Mirage 2000D
Organisme	Armée de l'Air et de l'Espace

AVERTISSEMENT

UTILISATION DU RAPPORT

Conformément à l'article L.1621-3 du code des transports, 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 aux engagements internationaux de la France, à l'esprit des lois et des règlements et relève de la seule 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	Patrice Olivier	8
Figure 2	RESEDA	8
Figure 3	Armée de l'Air et de l'Espace et BEA-É	10
Figure 4	Direction de la circulation aérienne militaire	11
Figures 4 à 6	Armée de l'Air et de l'Espace et BEA-É	12
Figure 7	RESEDA et BEA-É	13
Figure 8	Armée de l'Air et de l'Espace et BEA-É	13
Figure 9	RESEDA et BEA-É	13
Figure 10	BEA-É	16
Figures 11 et 12	DGA TA	18
Figure 13	RESEDA, Art & Engineering Designer et BEA-É	20
Figure 14	Météo-France et BEA-É	21
Figure 15	Météo-France	21
Figures 16 et 17	RESEDA	22 et 23
Figure 18	Dassault Aviation et BEA-É	24
Figure 19	Dassault Aviation	27
Figures 20 et 21	Dassault Aviation et BEA-É	28
Figures 22 et 23	Dassault Aviation	40

TABLE DES MATIÈRES

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. Aides à la navigation	10
1.9. Télécommunications	10
1.10. Renseignements sur la base aérienne	11
1.11. Enregistreurs de bord.....	11
1.12. Constatations sur l'aéronef et sur la zone de l'accident.....	11
1.13. Renseignements médicaux.....	14
1.14. Incendie.....	14
1.15. Questions relatives à la survie des occupants et à l'organisation des secours	14
1.16. Essais et recherches	14
1.17. Renseignements sur les organismes.....	14
1.18. Renseignements supplémentaires	15
2. Analyse.....	17
2.1. Expertises techniques.....	17
2.2. Séquence de l'évènement.....	24
2.3. Recherche des causes de l'évènement.....	24
2.4. Fragilités organisationnelles	33
3. Conclusion	35
3.1. Éléments établis utiles à la compréhension de l'évènement	36
3.2. Causes de l'évènement	36
4. Recommandations de sécurité	38
4.1. Mesures de prévention ayant trait directement à l'évènement	38
4.2. Mesures n'ayant pas trait directement à l'évènement	39
ANNEXE.....	40

GLOSSAIRE

DGA EP	Direction générale de l'armement Essais propulseurs
DGA TA	Direction générale de l'armement Techniques aéronautiques
EC	Escadron de chasse
ETD	Escadron de transformation sur Mirage 2000D
ft	<i>Feet</i> – pieds (un pied vaut 0,3048 m)
GUO	Guide d'utilisation opérationnelle
IS	Indice de service
Jx	Accélération longitudinale mesurée en g ou en $m.s^{-2}$
kt	<i>Knots</i> – nœuds (1 nœud vaut 1,852 km/h)
M2000	Mirage 2000
MCB	Memento des procédures
NOSA	Navigateur officier système d'armes
RESEDA	Restitution des enregistreurs d'accidents
SPAD	Système perfectionné anti-dérapant
UCB	Manuel de vol
VTH	Visualisation tête haute

SYNOPSIS

Date et heure de l'évènement : 30 juin 2021 à 11h27
Lieu de l'évènement : base aérienne de Nancy Ochev (LFSO)
Organisme : armée de l'Air et de l'Espace
Commandement organique : commandement des forces aériennes
Unité : escadron de chasse (EC) 3/3 Ardennes
Aéronef : Mirage 2000D¹ immatriculé F-UGXN
Nature du vol : entraînement
Nombre de personnes à bord : 2

Résumé de l'évènement selon les premiers éléments recueillis

Au retour d'une mission d'entraînement à la navigation très basse altitude, le M2000D atterrit en piste 20 à Nancy Ochev. Suite à une récente averse, la piste est mouillée. Le pilote exécute la procédure de freinage normal. Ce freinage étant jugé insuffisant, il déploie le parachute frein et bascule sur le circuit de freinage de secours.

Les deux membres d'équipage ne ressentent pas l'efficacité du freinage dans ces configurations successives. Vers 900 mètres (m) de piste restants, l'avion dévie vers la droite de sa trajectoire puis part en dérapage latéral droit et sort de piste à gauche à hauteur du panneau 600 m restants.

Les deux membres d'équipage se préparent à réaliser une procédure d'éjection. Cependant, l'avion qui est alors à une vitesse inférieure à 50 kt est instantanément arrêté par l'entrée dans la zone herbeuse.

L'équipage évacue immédiatement l'avion et les secours sont déclenchés dans le même temps.

L'avion est fortement endommagé. L'équipage est indemne.

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 enquêteur technique (BEA-É) ;
- un enquêteur de première information ;
- un pilote ayant une expertise sur M2000D ;
- un mécanicien ayant une expertise sur M2000D ;
- un médecin breveté supérieur de médecine aéronautique.

Autres experts consultés

- Direction générale de l'armement Essais propulseurs (DGA EP) / Restitution des enregistreurs d'accidents (RESEDA) ;
- DGA EP / Direction de l'évaluation des systèmes aéronautiques (DESA) ;
- Direction générale de l'armement Techniques aéronautiques (DGA TA) / division d'investigations suite à accident ou incident (MTI) ;
- Dassault Aviation.

¹ Désigné M2000D dans la suite du rapport.

PAS DE TEXTE

1. RENSEIGNEMENTS DE BASE

1.1. Déroulement du vol

1.1.1. Mission

Type de vol : circulation aérienne militaire

Type de mission : entraînement

Dernier point de départ : base aérienne de Nancy Ochey

Heure de départ : 10h02

Point d'atterrissage prévu : base aérienne de Nancy Ochey

1.1.2. Déroulement

1.1.2.1. Préparation du vol

L'équipage désigné prépare la mission la veille de l'évènement et actualise les dernières données météorologiques le matin du vol lors du briefing avant de rejoindre l'avion stationné sur le parking.

1.1.2.1.1. Contexte du vol

La mission est un vol d'entraînement autonome au profit du pilote, nouvellement qualifié, pour lui permettre de s'aguerrir à l'utilisation de procédures opérationnelles de navigation récemment apprises, sous la supervision du navigateur officier système d'armes (NOSA) expérimenté.

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

L'ensemble du vol se déroule conformément au briefing et aux ordres de vols. Dans l'heure précédant l'atterrissage, plusieurs épisodes d'averses se produisent sur le terrain de Nancy Ochey. Lorsque l'avion à l'approche de Nancy Ochey entre en contact radio, le contrôleur lui annonce que le terrain est « jaune² » et que la piste 20 en service est mouillée³. L'équipage souhaitait initialement réaliser un tour de piste. Cependant, compte tenu des conditions météorologiques, il revoit ses intentions et décide de réaliser une procédure d'approche aux instruments suivie d'un atterrissage complet.

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

En sortant de la couche nuageuse vers 660 ft, le pilote maintient la trajectoire d'aboutissement vers les marques cibles d'approche aux instruments. Après l'arrondi, le train principal prend contact avec le sol à la vitesse de 143 kt à 11h27. Le pilote réalise un freinage aérodynamique⁴ selon la pratique habituelle et pose le train auxiliaire à 1 500 m restants et à 120 kt. La première action de freinage entraîne l'affichage en visualisation tête haute (VTH) d'un Jx⁵ de -0,15 g. Le pilote a la sensation que celui-ci n'est pas nominal, et l'annonce au navigateur. Il tire le parachute frein à la vitesse de 98 kt tout en relâchant l'action aux freins et bascule sur le circuit de freins de secours (frein 2). Après deux secondes, lors de la reprise du freinage, celui-ci est encore perçu comme inefficace par l'équipage. L'avion dévie de l'axe de piste de plusieurs mètres vers la droite. Alors que le pilote tente de contrôler la trajectoire par freinage différentiel, une embardée à gauche se produit et l'avion part en dérapage latéral droit. Celle-ci se poursuit jusqu'à la sortie de piste de l'appareil à 600 m restants avec un angle de 90 degrés par rapport à l'axe de piste. Avant que l'avion sorte de la piste par la gauche, la dernière vitesse lue par l'équipage est de 50 kt, ce qui amène celui-ci à se préparer à l'éjection. Néanmoins, l'avion décélère encore et s'immobilise immédiatement dans l'herbe à cinq mètres du bord de piste. La procédure d'évacuation rapide est réalisée et l'équipage s'éloigne de l'appareil en attendant les secours.

² Code couleur indiquant les conditions de plafond et visibilité. Jaune : plafond inférieur à 700 ft – visibilité inférieure à 3 700 m.

³ Piste mouillée : la surface est mouillée mais il n'y a pas d'eau stagnante (pellicule d'eau de moins de trois millimètres d'épaisseur et couvrant moins de 25% de la surface de la piste).

⁴ Action de maintenir le nez haut pour que l'intrados de l'aile s'oppose au vent relatif, afin que l'avion ralentisse.

⁵ Jx : accélération longitudinale, mesurée en g ou en m.s⁻² ; négative, elle indique une décélération de l'avion.

L'avion est fortement endommagé et l'équipage est indemne.



Figure 1 : trajectoire d'atterrissage

1.1.3. Localisation

- Lieu :
 - pays : France
 - département : Meurthe-et-Moselle (54)
 - commune : Ochey
 - coordonnées géographiques : N 48°34'59'' / E 005°57'16''
 - hauteur du lieu de l'évènement : au sol
- Moment : jour

1.2. Dommages corporels

Les deux membres d'équipages sont indemnes.

1.3. Dommages à l'aéronef

L'avion est fortement endommagé.

1.4. Autres dommages

Le terrain en bordure de piste est creusé par le passage des trains d'atterrissage et l'affaissement de l'avion.

1.5. Renseignements sur l'équipage

1.5.1. Pilote

- Âge : 28 ans
- Unité d'affectation : EC 3/3 Ardennes depuis avril 2021
- Formations :
 - qualification : pilote de combat autonome
 - école de spécialisation : école de l'aviation de chasse (2019)
- 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)	500	180	87	87	21	21

- Date du précédent vol sur M2000D : 29 juin 2021

1.5.2. NOSA, commandant de bord

- Âge : 46 ans
- Unité d'affectation : EC 3/3 Ardennes
- Formations :
 - qualification : chef navigateur
 - école de spécialisation : école de l'aviation de chasse (1997)

- 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)	4 962	4 621	143	142	16	16

- Date du précédent vol sur M2000D : 29 juin 2021

1.6. Renseignements sur l'aéronef

- Organisme : armée de l'Air et de l'Espace
- Commandement d'appartenance : commandement des forces aériennes
- Base aérienne de stationnement : Nancy Ochey
- Unité d'affectation : escadron des services techniques aéronautiques (ESTA) 15/003 Malzéville
- Type d'aéronef :

	Type-série	Numéro	Heures de vol totales	Heures de vol depuis
Cellule	M2000D	652	4 528	VI ⁶ : 162
Moteur	M53P3	60 559	3 276	RG ⁷ : 255

- Trains d'atterrissage :

	Type-série	Numéro de série	Nombre total d'atterrissages	Nombre d'atterrissages depuis RG et date de sortie de RG
Atterrisseur auxiliaire	C23899025-9	B9	2 364	201 - 08/02/2018
Atterrisseur principal droit	C23894010-4	U332	4 095	625 - 03/02/2014
Atterrisseur principal gauche	C23893010-4	U429	4 165	1 186 - 01/12/2008

1.6.1. Maintenance

La maintenance est conforme à l'attendu. Le certificat d'examen de navigabilité est valide jusqu'au 28 novembre 2021.

1.6.2. Performances

Compte tenu de la masse, des conditions de température et d'altitude, l'appareil avait des performances compatibles avec la réalisation de l'atterrissage sur la piste de Nancy Ochey.

1.6.3. Masse et centrage

Masse au moment de l'évènement : 10,7 tonnes.

Le centrage est dans les normes.

1.6.4. Carburant

- Type de carburant utilisé : F-34
- Quantité de carburant au décollage : 6 tonnes
- Quantité de carburant au moment de l'évènement : environ 1,6 tonnes

⁶ Visite intermédiaire.

⁷ Révision générale.

1.7. Conditions météorologiques

1.7.1. Prévisions

Les conditions météorologiques prévues entre 6h00 et 12h00 sur le terrain de Nancy Ochey sont :

- vent du 220° pour 10 kt
- visibilité supérieure à 10 km
- couverture nuageuse totale (*overcast*) à 1 200 ft

évoluant entre 9h00 et 11h00 vers :

- visibilité à 4 km
- pluie faible
- couverture nuageuse à 800 ft

1.7.2. Observations

À 11h20, les observations de la station de Nancy Ochey indiquent :

- vent : 210° pour 13 kt avec des rafales à 18 kt
- visibilité : 3 km
- couverture nuageuse morcelée (BKN) à 700 ft, à 1 500 ft et à 3 600 ft
- pluie et bruine faibles
- température : +15,8°C
- QNH⁸ : 1 014 hectopascals

Dans la période précédant l'atterrissage, la pluviométrie a été importante : la veille de l'accident, il est tombé 12,1 mm d'eau ; dans la demi-heure précédant l'évènement, il est tombé 1,4 mm d'eau.

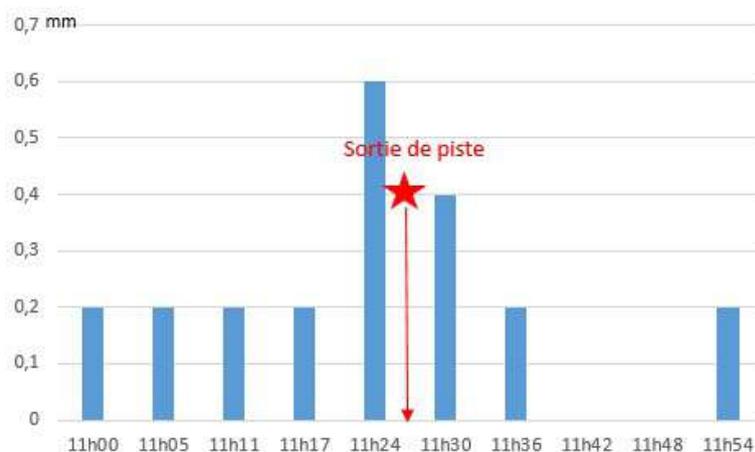


Figure 2 : pluviométrie mesurée sur la base aérienne le jour de l'évènement

1.8. Aides à la navigation

Le M2000D est équipé d'un système de navigation par satellite (GPS⁹) et de deux centrales inertielles.

1.9. Télécommunications

L'équipage est en contact radio avec le service du contrôle aérien de la base aérienne.

⁸ Pression atmosphérique de la base aérienne rapportée au niveau de la mer.

⁹ GPS : global positioning system.

1.10. Renseignements sur la base aérienne

La base aérienne de Nancy Ochey est un terrain réservé aux aéronefs de l'État. Il dispose d'une piste orientée 02/20 de 2 400 m pour exploiter des avions de type M2000D principalement. Des panneaux d'indication de la distance restante jusqu'à la fin de piste sont disposés tous les 300 mètres.

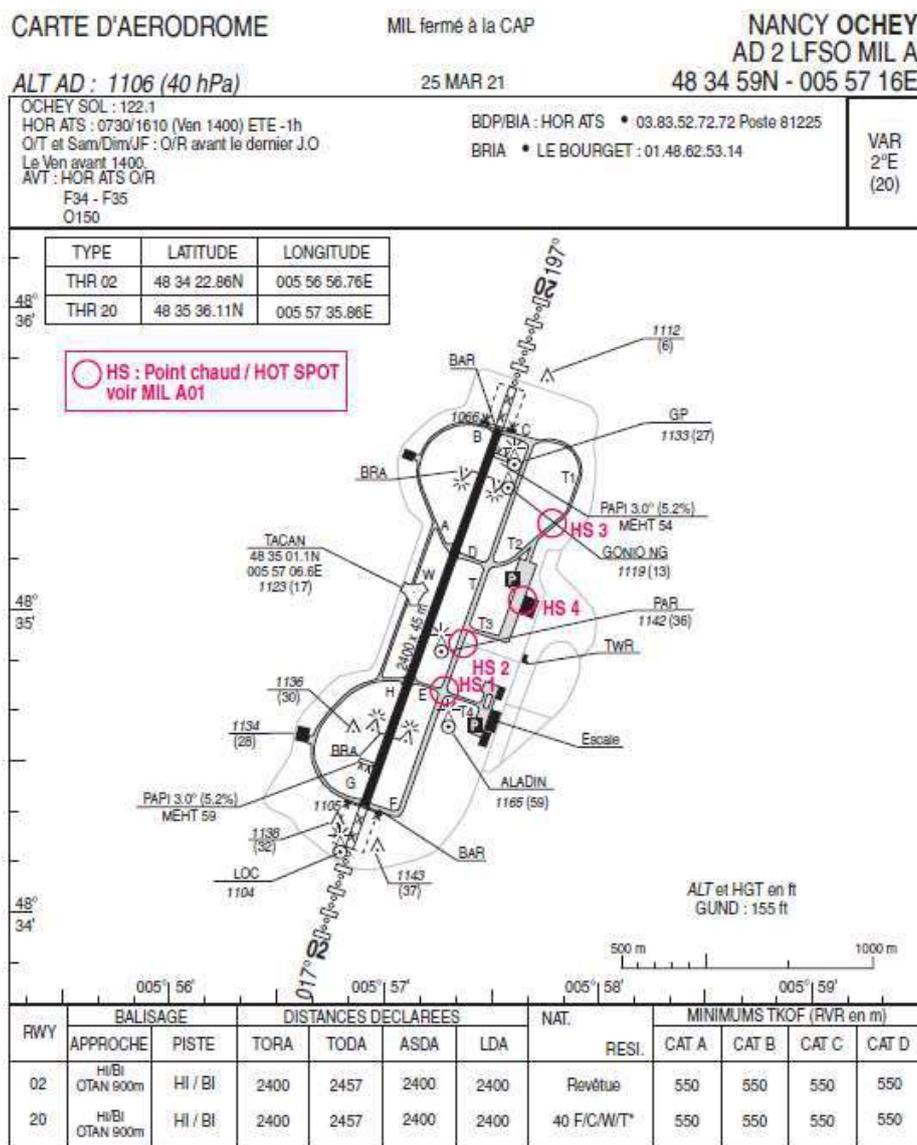


Figure 3 : carte de base aérienne

1.11. Enregistreurs de bord

Le M2000D est équipé d'un système d'enregistrement statique de paramètres, qui est exploitable. Il dispose également d'un média de restitution de mission enregistrant le flux vidéo de la VTH. L'enregistrement sur ce média a dysfonctionné et le vol ne peut pas être restitué ; quelques images sont cependant exploitables.

1.12. Constatations sur l'aéronef et sur la zone de l'accident

1.12.1. Examen de l'aéronef

Le M2000D repose dans l'herbe sur son réservoir pendulaire largable droit qui s'est désolidarisé de son pylône de fixation, son train principal gauche et son train auxiliaire.

Le train principal droit est partiellement déboîté de ses points d'articulation. La contrefiche est brisée. De ce fait, le train est partiellement rétracté. Les pneus des roues principales sont éclatés et présentent des traces d'abrasions (escalopes).

Les trois fusibles de chaleur de chaque roue sont en bon état et n'ont pas fondu.
La structure de l'aile est endommagée.
L'examen des trois trains d'atterrissage ne révèle pas de fuite hydraulique des chambres des amortisseurs. Les valeurs de pression des chambres des amortisseurs des trains d'atterrissage sont relevées.



Figure 4 : vue générale de l'aéronef après sa sortie de piste



Figure 5 : atterrisseur droit



Figure 6 : roues principales

1.12.2. Examen de la zone de l'accident

Des traces de gomme des pneus principaux et d'abrasion de la jante de la roue droite sont visibles sur les trois cents derniers mètres de la trajectoire.

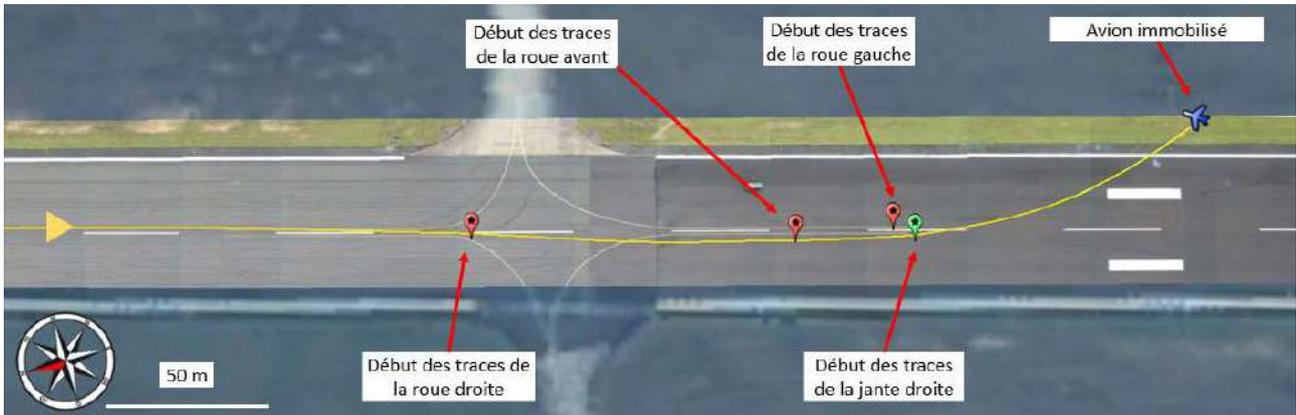


Figure 7 : traces relevées sur la piste

La piste est recouverte d'eau.



Figure 8 : piste recouverte d'eau sur la trajectoire de l'aéronef (10 mn après l'évènement)

Dans la zone de l'évènement, la piste présente deux qualités successives du revêtement :

- jusqu'à 180 mètres avant la sortie de piste, l'enrobé est ancien avec des pontages de fissures ;
- au-delà, le revêtement a été rénové en 2020.



Figure 9 : revêtements de surface de la piste

1.13. Renseignements médicaux

1.13.1. Pilote

- Dernier examen médical : 14 juin 2021
 - type : expertise¹⁰ en centre d'expertise médicale du personnel navigant (CEMPN)
 - résultat : apte
- Examens biologiques : effectués
- Blessures : néant

1.13.2. NOSA, commandant de bord

- Dernier examen médical : 6 janvier 2021
 - type : expertise CEMPN
 - résultat : apte
- Examens biologiques : effectués
- Blessures : néant

1.14. Incendie

Sans objet.

1.15. Questions relatives à la survie des occupants et à l'organisation des secours

1.15.1. Abandon de bord

À l'approche de la sortie de piste, les deux membres d'équipage envisagent l'éjection et s'y préparent. Cependant, l'avion ralentissant fortement au cours du dérapage et s'immobilisant en quelques mètres après la sortie de piste, l'équipage renonce à l'éjection et évacue immédiatement par ses propres moyens.

1.15.2. Organisation des secours

Le déclenchement des services de secours (pompiers et équipe médicale) est réalisé par le contrôleur aérien en service au moyen du klaxon de crash. L'équipe de première intervention de l'escadron de soutien incendie et secours arrive sur les lieux en deux minutes. Les pompiers prennent en charge l'équipage qui a déjà évacué et mettent en sécurité l'avion. Le chef de l'organisation des secours et l'équipe de renfort arrivent dans les cinq minutes. L'équipe d'astreinte médicale arrive également dans les cinq minutes sur le lieu de l'accident et prend en charge les membres d'équipage.

1.16. Essais et recherches

L'exploitation des données de l'enregistreur de paramètres, ainsi qu'une exploitation d'images extraites de l'enregistreur de la VTH sont réalisées par RESEDA.

L'examen des paramètres de vol est réalisé avec le concours de Dassault Aviation.

L'expertise du système de freinage est réalisée par DGA TA.

L'analyse des fluides prélevés sur l'avion est réalisée par DGA EP.

Une analyse des facteurs organisationnels et humains est réalisée par le BEA-É.

1.17. Renseignements sur les organismes

1.17.1. Escadron de chasse 3/3 Ardennes

L'escadron de chasse 3/3 Ardennes de la base aérienne de Nancy (BA 133) est spécialisé dans les missions d'attaque au sol. Il utilise des M2000D dont l'équipage est composé d'un pilote et d'un navigateur.

¹⁰ En référence au décret n° 2008-943 du 12 septembre 2008 portant statut particulier des corps des officiers de l'air, des officiers mécaniciens de l'air et des officiers des bases de l'air et à l'arrêté du 12 février 2021 relatif aux normes médicales d'aptitude applicables au personnel militaire de l'armée de l'Air.

Les pilotes sont formés à l'école de l'aviation de chasse puis à l'escadron de transition opérationnelle sur Alphajet. Ils sont ensuite formés au pilotage du M2000 au sein de l'escadron de chasse 2/5 à Orange, puis au sein de l'escadron de transformation sur M2000D (ETD) à Nancy. À l'issue de ce parcours, ils sont affectés en escadron de chasse à Nancy. Au sein de cette nouvelle affectation, ils suivent un cursus de progression alternant des phases d'instruction et d'examen des qualifications opérationnelles, des phases d'entraînement et d'aguerrissement adaptées au niveau de chacune des qualifications.

1.17.2. Escadron de soutien technique aéronautique 15/003 Malzéville

Les M2000D sont mis à disposition de l'escadron de chasse par l'escadron de soutien technique aéronautique stationné sur la base. Les techniciens de maintenance de cet escadron sont chargés du dépannage et de la préparation avant vol des avions (vérifications, contrôles, sécurité au sol, etc.).

1.18. Renseignements supplémentaires

1.18.1. Piste de la base aérienne de Nancy Ochey

Construite en 1952, la plateforme aéronautique de la BA 133 de Nancy Ochey compte environ 21 000 mouvements par an. 99% du trafic est réalisé par des avions de chasse, le reste étant partagé entre des avions de transport et des hélicoptères.

La piste, orientée 02/20, a été rénovée en 2001 et la double pente transversale a été modifiée en une seule pente latérale (l'aval vers l'ouest). La piste n'est pas drainée et seul un système de drainage des zones herbeuses adjacentes a été installé. Depuis, plusieurs projets de réfection ont été envisagés. Les évolutions successives des stratégies d'implantation de l'armée de l'Air et de l'Espace ont conduit à reporter à plusieurs reprises ces projets.

1.18.2. Phénomène d'aquaplaning

La littérature générale définit trois types d'aquaplaning :

- l'aquaplaning visqueux peut se produire au freinage, lors d'un décollage interrompu ou lors du roulage après atterrissage. Il est typique des pistes humides ou mouillées ou de pistes recouvertes de glace mouillée. Une fois amorcé, il peut persister jusqu'à de très faibles vitesses. Il faut toutefois que la surface de la piste soit particulièrement lisse, ce qui peut être le cas des zones recouvertes d'une épaisse couche de caoutchouc déposée par les pneus lors du toucher des roues ou rendues lisses sous l'effet de la circulation ;
- l'aquaplaning dynamique se produit au-delà d'une vitesse critique qui est fonction de la pression de gonflage des pneus. Ce type d'aquaplaning est dû à l'inertie de l'eau : la pression dirigée vers le bas (pression de gonflage du pneu) est insuffisante pour chasser l'eau qui s'interpose entre la piste et le pneu pendant la brève période où elle s'exerce. Plus grande sera cette pression, plus élevée sera la vitesse à laquelle se produira l'aquaplaning dynamique. Enfin, l'aquaplaning dynamique se manifeste aux vitesses les plus élevées atteintes lors du roulage à l'atterrissage ou au décollage. Il a par ailleurs été constaté qu'il suffit d'une nappe d'eau stagnante de 0,5 mm pour qu'il se produise ;
- l'aquaplaning par dévulcanisation du caoutchouc. Ce type d'aquaplaning peut se produire dans tous les cas et à toutes les vitesses où une roue (freinée ou non) reste bloquée pendant une période de temps prolongée. Ce type d'aquaplaning était plus fréquent avant la généralisation des systèmes d'anti-dérapage. Généralement, ce phénomène se produit sur les appareils équipés d'anti-dérapage lorsque le freinage secours (qui désactive le système d'anti-dérapage) est utilisé.

1.18.3. Système de freinage

Les freins du M2000 peuvent être actionnés par deux circuits distincts commandés tous deux par l'enfoncement des pédales de frein situées en haut des palonniers.

Le circuit normal agit avec le contrôleur de freinage SPAD¹¹ sur un premier jeu de pistons actionnant les freins, par l'intermédiaire d'un distributeur et de servovalves. Le SPAD régule la pression de freinage pour éviter le glissement du pneu sur la piste et obtenir la meilleure adhérence.

¹¹ Système perfectionné anti-dérapant.

Le circuit de secours agit par l'intermédiaire du distributeur secours sur un deuxième jeu de pistons. Avec ce circuit, l'efficacité du freinage est réglée directement par le pilote lorsqu'il actionne les freins, sans système intermédiaire de régulation automatique, donc sans SPAD. Dans cette configuration, la dirigeabilité reste disponible pour orienter l'avion autour de l'axe de lacet à l'aide du palonnier.

Le passage sur circuit de secours s'effectue manuellement par l'utilisation d'un inverseur dans le poste de pilotage qui permet de sélectionner le circuit secours. Pour basculer sur le circuit de secours, les freins doivent être relâchés pendant deux secondes afin d'éviter le blocage des roues.

1.18.4. Hypo-sustentation

Lorsque les trois trains sont posés et l'action au frein a commencé, l'hypo-sustentation consiste à positionner la commande de profondeur vers l'arrière pour relever les élevons. Cette action réduit la portance de l'aile, ce qui augmente la force verticale s'appliquant sur le train principal, favorisant ainsi l'adhérence des pneus sur le sol. De plus, les élevons relevés ont un effet d'aérofreins.

1.18.5. Activité sur la base aérienne le matin de l'évènement

Dans la matinée, plusieurs avions, dont le M2000 n° 652, ont décollé de la base aérienne de Nancy Ochey. Avant l'évènement, un seul avion atterrit une heure plus tôt, les autres étant programmés pour arriver plus tard.

Le dernier décollage est autorisé 43 minutes avant le retour à Nancy de ce M2000. Les autres avions encore en vol au moment de l'évènement sont déroutés vers une autre base aérienne.

Types d'avion	heure de décollage	heure d'atterrissage prévue	Observations
M2000	09h22	11h59	dérouté
Alphajet	09h25	10h25	
Learjet	09h26	12h01	dérouté
M2000	09h54	11h59	dérouté
M2000	10h01	extérieur	
M2000	10h02	11h28	sortie de piste
M2000	10h05	11h58	dérouté
Alphajet	10h45	12h21	dérouté

Figure 10 : départs et arrivées sur la base aérienne de Nancy Ochey le jour de l'évènement

2. ANALYSE

2.1. Expertises techniques

2.1.1. Système de freinage

2.1.1.1. Élaboration des ordres de freinage

Les circuits électriques, les capteurs (génératrices tachymétriques) de chaque roue et le boîtier SPAD ont été testés au banc ou sur l'avion. Tous fonctionnent normalement.

Le SPAD et les capteurs fonctionnent normalement pour élaborer les ordres de freinage différentiels vers les blocs freins gauche et droit.

2.1.1.2. Circuit de freinage

Les circuits hydrauliques ne présentent pas de fuite. Les fusibles des roues principales n'ont pas fondu, indiquant l'absence d'échauffement élevé des blocs de frein. Les tests réalisés sur les blocs freins rendent compte d'un bon fonctionnement et de la liberté de mouvement des pistons des circuits hydrauliques principal et secours. La décélération observée lors de l'atterrissage démontre le fonctionnement des circuits de freinage.

Le circuit de freinage a fonctionné normalement lors de l'atterrissage.

2.1.2. Trains d'atterrissage

Les trains d'atterrissage principaux ne présentent pas d'anomalie ni de fuite. Plusieurs semaines après l'évènement, les pressions de gonflage des chambres de l'amortisseur du train droit endommagé sont identiques à celles relevées après l'évènement. Celles-ci sont cependant inférieures aux pressions attendues.

	Chambre haute pression	Chambre basse pression
Train principal gauche	88 bars	5 bars
Train principal droit	88 bars	22 bars
Train auxiliaire	/	15 bars
Pression nominale	100 bars +/- 5	22 bars +/- 3

Des relevés sur d'autres avions en ligne révèlent des valeurs de pression présentant les mêmes écarts. Les écarts de pression relevés sur les trains de l'avion accidenté pouvaient donc être préexistants à l'évènement. En effet, la pression de l'amortisseur ne fait pas partie des contrôles systématiques avant chaque vol. Seule la hauteur de l'amortisseur est contrôlée.

La cinématique anormale de dérapage latéral de l'avion et les chocs subis en fin de course en dehors de la piste peuvent également être à l'origine de cette situation.

L'expertise du train d'atterrissage ne permet pas de déterminer si les pressions insuffisantes des amortisseurs de train sont la conséquence de l'évènement.

2.1.3. Pneumatiques

La bande de roulement des deux pneumatiques principaux contient un plat (escalope) qui s'étend sur toute la largeur, témoignant d'un blocage de la rotation de chacune des roues. À cet endroit, la gomme est usée jusqu'à perforer le pneumatique. La gomme restante présente des petites boules et des brûlures. Les autres détériorations sont postérieures à l'éclatement du pneu, provoquées par le contact avec la piste, ou dues à la sortie de piste.

La perforation et les parties usées forment un « fer à cheval », caractéristique d'un phénomène d'aquaplaning. Les marques d'abrasion sont parallèles aux rainures des pneumatiques, indiquant que le blocage des roues a eu lieu lorsque les roues étaient parallèles au sens de déplacement de l'avion.

Sur le pneumatique gauche, le reste de la bande de roulement ne présente pas d'usure majeure. La profondeur des rainures est constante et est d'environ six millimètres.

Sur le pneumatique droit, l'ensemble de la bande de roulement présente des usures de la gomme de type brûlures et une usure prononcée du flanc probablement due au dérapage. Les rainures ont des profondeurs inégales : la profondeur des rainures centrales est d'environ un millimètre et celle des rainures extérieures est d'environ trois millimètres. Le minimum attendu est d'un millimètre.

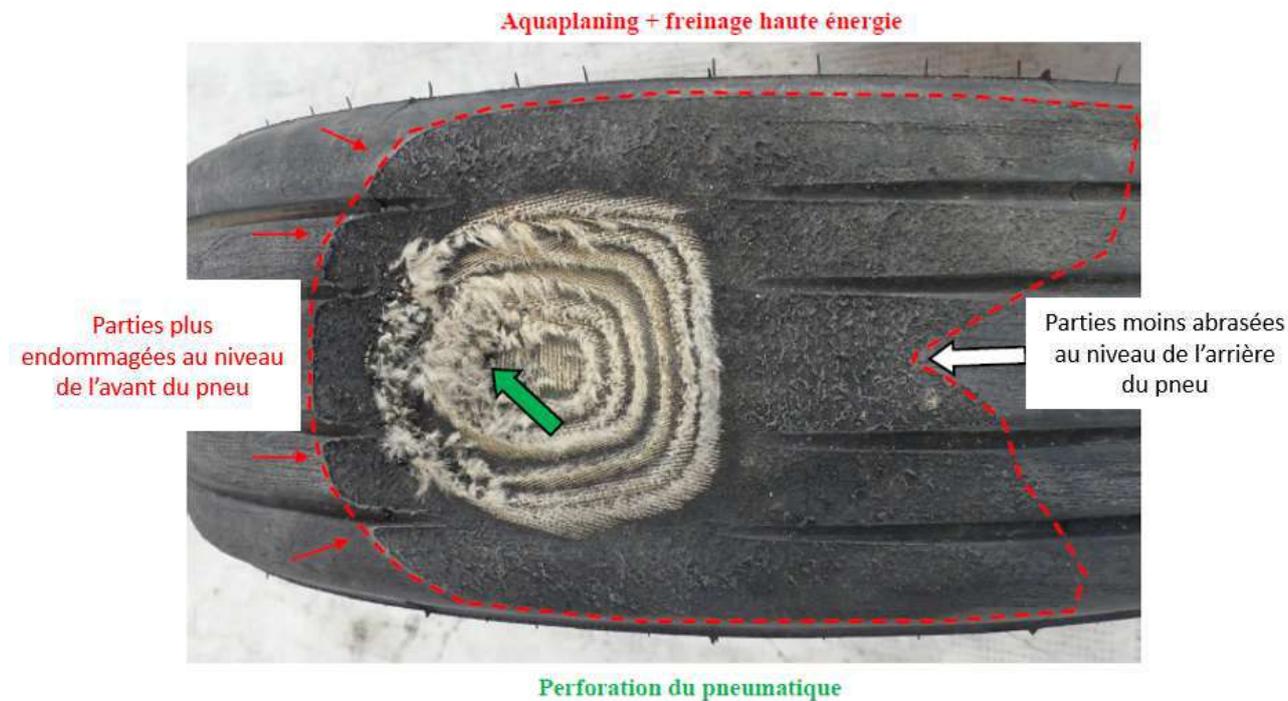


Figure 11 : escalope du pneumatique gauche



Figure 12 : escalope et marques d'aquaplaning sur le pneumatique droit

Les "escalopes" témoignent du blocage des roues. Les dégradations autour de ces "escalopes" sont la conséquence d'un phénomène d'aquaplaning par devulcanisation (§1.18.2). L'aquaplaning est apparu après le blocage des roues.

Les pneumatiques mettent en évidence un blocage de la rotation des roues principales, conduisant à un phénomène d'aquaplaning, puis à l'éclatement des pneus.

2.1.4. Caractéristiques et état de la piste

2.1.4.1. Usure de la piste

La campagne de 2018 de relevé des indices de service¹² (IS) fait ressortir les éléments suivants :

- les indices de service par maille montre que les deux tiers de la piste ont un IS inférieur au seuil d'alarme et en certains points, les IS sont inférieurs au seuil de réfection ;
- l'IS global de la piste et de la bretelle F est très mauvais ;
- l'IS global du seuil 20 et des bretelles C et D est mauvais ;
- l'IS global du seuil 02, de la bretelle Echo et du taxiway est passable ;
- la réfection complète (surface et structure) de la piste est recommandée à moyen terme (2020/2021).

De 2019 à 2021, la piste fait l'objet d'une réfection de la surface de roulement en trois tranches, sans que la structure de la piste soit modifiée. Les deux premières, au cours des étés 2019 et 2020, ont concerné les parties entre le seuil de piste et les zones de prises de contact. La troisième tranche est prévue à l'été 2021 (après l'évènement) pour achever la rénovation du revêtement de surface de la piste.

Les indices de service de la piste témoignent d'une usure prononcée de la piste, d'une part pour la portion centrale du revêtement non encore rénovée, et d'autre part pour la structure totale de la piste. La combinaison du niveau d'usure du revêtement sur le tronçon central et du mauvais état général de la structure favorise le risque d'apparition d'aquaplaning, surtout dans le tronçon central.

2.1.4.2. Adhérence

L'adhérence de la piste a fait l'objet d'une campagne de mesure en décembre 2020. Les résultats sont dans la norme : les caractéristiques de frottement intrinsèque sont conformes aux objectifs définis par la documentation n° 2013/03 de la direction générale de l'aviation civile et l'arrêté du 10 juillet 2006 relatif aux caractéristiques techniques des bases aériennes terrestres utilisés par les aéronefs à voilure fixe. Cependant, le relevé montre une adhérence plus faible sur les 900 mètres précédant la zone de la sortie de piste. Cette faiblesse ressortait déjà dans les rapports des campagnes précédentes.

¹² L'indice de service est un indicateur numérique, compris entre 0 (chaussée hors service) et 100 (chaussée neuve), qui représente la moyenne des dégradations observées. Il permet d'apprécier le niveau de qualité d'une chaussée aéronautique. Il est élaboré par une méthode définie par le service technique de l'aviation civile (STAC), reprise et imposée par la DIRCAM pour l'homologation des bases aériennes des armées. L'indice de service global est composé de l'indice de service structurel et de l'indice de service superficiel.

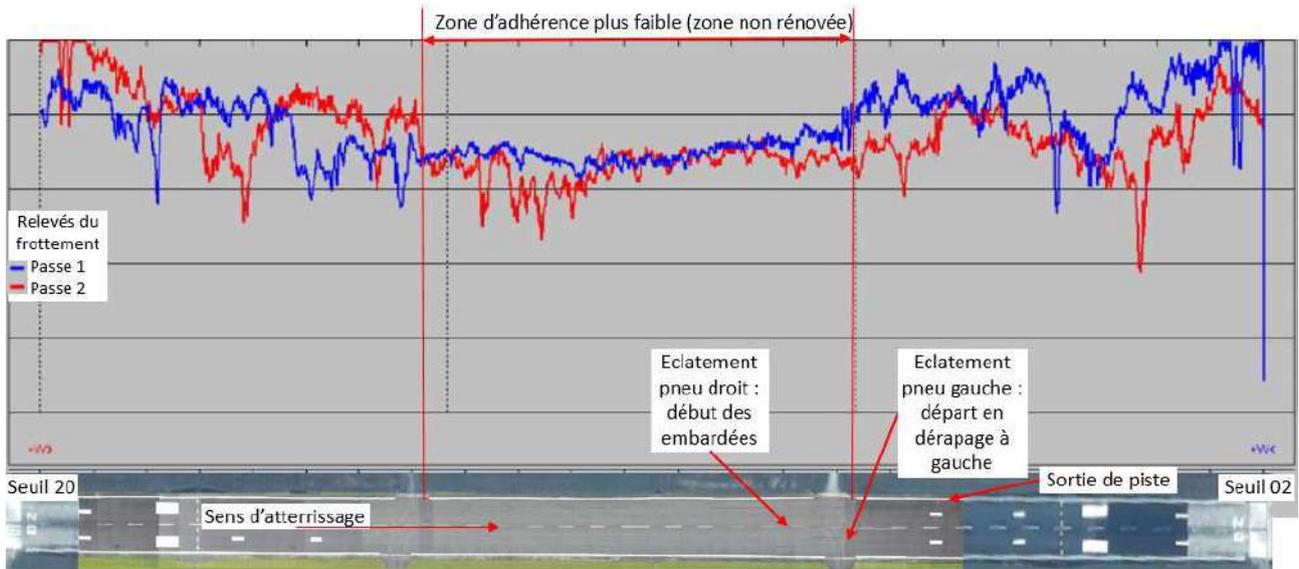


Figure 13 : correspondance entre les relevés d'adhérence de la piste de décembre 2020 et l'évènement

L'état de la piste 02/20 de la base aérienne de Nancy Ochev présente des caractéristiques d'adhérence dans les normes. Néanmoins, la zone dans laquelle le pilote analyse le freinage insuffisant correspond à la zone de moindre qualité d'adhérence.

2.1.4.3. Drainage de la piste et résurgence d'eau

La structure de la piste n'est pas drainée. Seul un système de drainage périphérique dans les zones herbeuses adjacentes a été installé.

Les experts du domaine des infrastructures ont mis en évidence à plusieurs reprises un problème récurrent de résurgences d'eau à caractère saisonnier. Ce phénomène se traduit par la présence de flaques d'eau sur la couche de roulement de la piste, même en cas de temps sec et en période d'augmentation des températures (printemps et été). Ils soulignent également l'insuffisance du drainage structurel de la piste, quels que soient les travaux d'entretien entrepris. Ce phénomène est bien connu depuis plusieurs décennies et devrait être traité lors de travaux futurs.

En 2015, des travaux curatifs sur le drainage périphérique ont été réalisés pour le déboucher et le restaurer partiellement. À cette époque, les plans d'investissements envisageaient que la piste soit rénovée en 2019-2020, ce qui a conduit à ne réaliser que les seules interventions curatives.

La piste est sujette à des remontées d'eau et à la présence de flaques d'eau. Du fait de l'absence de drainage structurel sous la piste, en cas de pluies abondantes, l'eau peut facilement recouvrir la piste.

2.1.5. Expertise météorologique

Le jour de l'évènement, à Nancy Ochev, le plafond est voisin de 600 ft, avec des pluies ou des averses localisées, devenant plus continues et d'intensité modérée au moment de l'atterrissage de l'avion.

Les mois de mai et juin 2021 ont été nettement plus pluvieux que les mois de mai et juin des trois années précédentes.

	2018	2019	2020	2021
Moyenne journalière de pluie en mai et juin (mm)	1,9	1,7	2,6	3,5

L'état de saturation aqueux des sols est un paramètre local qui dépend de la composition du sol. Compte tenu des précipitations de la dernière semaine de juin, le sol de nature argileuse est très humide le jour de l'évènement.

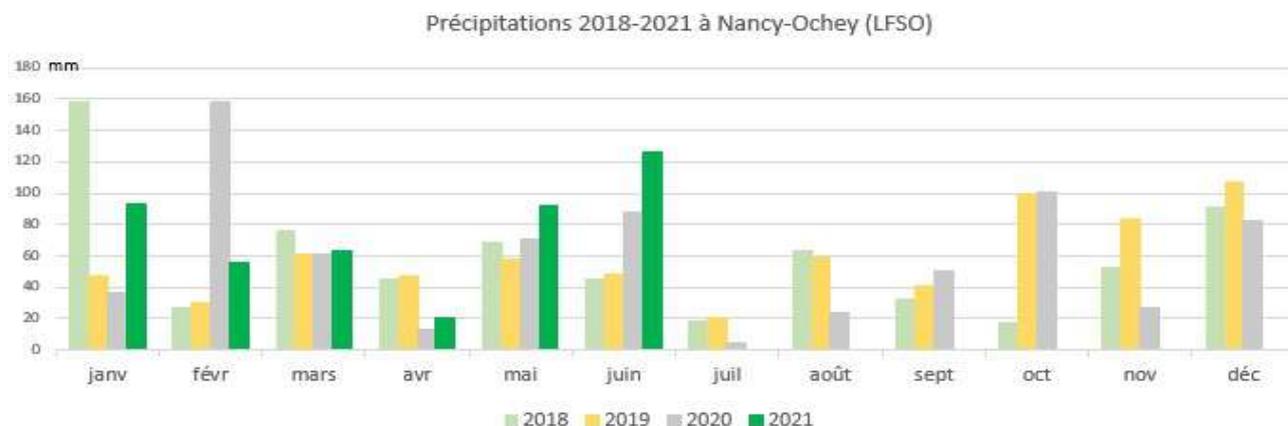


Figure 14 : précipitations mensuelles - comparatifs

Date	Précipitations					
	de 08h00 à 20h00		de 20h00 à 08h00		de 08h00 à 08h00	
	durée	hauteur	durée	hauteur	durée	hauteur
	heures	mm	heures	mm	heures	mm
lun. 21	.	.	0h07	0.4	0h07	0.4
mar. 22	1h42	2.4	.	0.2	1h42	2.6
mer. 23	.	.	.	.	.	.
jeu. 24	4h17	23.5	2h26	2.0	6h43	25.5
ven. 25	.	.	.	.	.	.
sam. 26	.	.	0h36	2.6	0h36	2.6
dim. 27	2h24	1.4	-	0.2	-	1.6
lun. 28	1h09	0.2	0h16	.	1h25	0.2
mar. 29	3h42	12.1	0h18	.	4h00	12.1
mer. 30	5h47	6.7	1h24	4.4	7h11	11.1

Figure 15 : pluviométrie journalière au mois de juin 2021

Les mois de mai et juin 2021 ont été très pluvieux. Le sol sous la piste est très humide, voire saturé en eau.

2.1.6. Exploitation des enregistreurs de vol

Aucune anomalie technique de fonctionnement de l'avion n'est relevée sur les enregistreurs de vol.

La fin de la trajectoire d'approche aux instruments est nominale : les roues principales touchent la piste après les marques d'aboutissement de la finale aux instruments. La vitesse est de 143 kt. Il reste alors 1 982 mètres de piste disponible.

Les phases de roulement sur la piste sont successivement :

- période de freinage aérodynamique pendant 7,6 secondes sur 476 mètres jusqu'à une vitesse de 120 kt, moment du poser de la roue avant ;
- période de freinage normal (frein 1, avec le SPAD) de quatre secondes. Le Jx moyen est de -0,18 g ; il varie entre -0,16 g et -0,19 g avec un pic à -0,21 g. La vitesse décroît de 118 kt à 110 kt ; le SPAD régule alors le freinage ;
- temps de relâchement des freins pendant 2,3 secondes. Le Jx est nul car l'action sur les freins a été interrompue. C'est le moment pendant lequel le pilote applique la procédure de passage sur freins 2, qui requiert un relâchement total des freins pour manipuler le sélecteur correspondant ;

- période de freinage sur frein 2 (sans SPAD) et de déploiement du parachute. Le Jx obtenu est de -0,14 g en moyenne jusqu'au moment de l'éclatement du pneu droit ; il varie entre -0,12 g et -0,17 g avec un pic à -0,19 g. À partir de ce moment, la décélération s'accroît jusqu'à -0,25 g, probablement grâce à l'effet du parachute ;
- les éclatements des pneus se produisent pendant la phase de freinage sur frein 2 :
 - le pneu droit éclate dans la zone non rénovée de la piste, deux secondes et 120 mètres après le passage sur frein 2, entraînant l'embarquée à droite. L'inclinaison augmente de deux degrés ;
 - le pneu gauche éclate cinq secondes après le pneu droit pendant que le pilote tente de ramener l'avion au centre de la piste par un freinage différentiel à gauche. L'inclinaison revient à un degré (inclinaison de la piste) ;
- dérapage par rapport à la trajectoire sur 284 mètres jusqu'à la sortie de piste :
 - dans un premier temps, dérapage latéral gauche jusqu'à -4° pendant trois secondes ;
 - puis dérapage latéral droit jusqu'à +100° pendant huit secondes.

Après le poser de la roue avant, la commande de profondeur est maintenue au neutre (absence d'hypo-sustentation).

La dernière vitesse enregistrée est 33 kt. L'avion sort de piste latéralement à une vitesse inférieure.

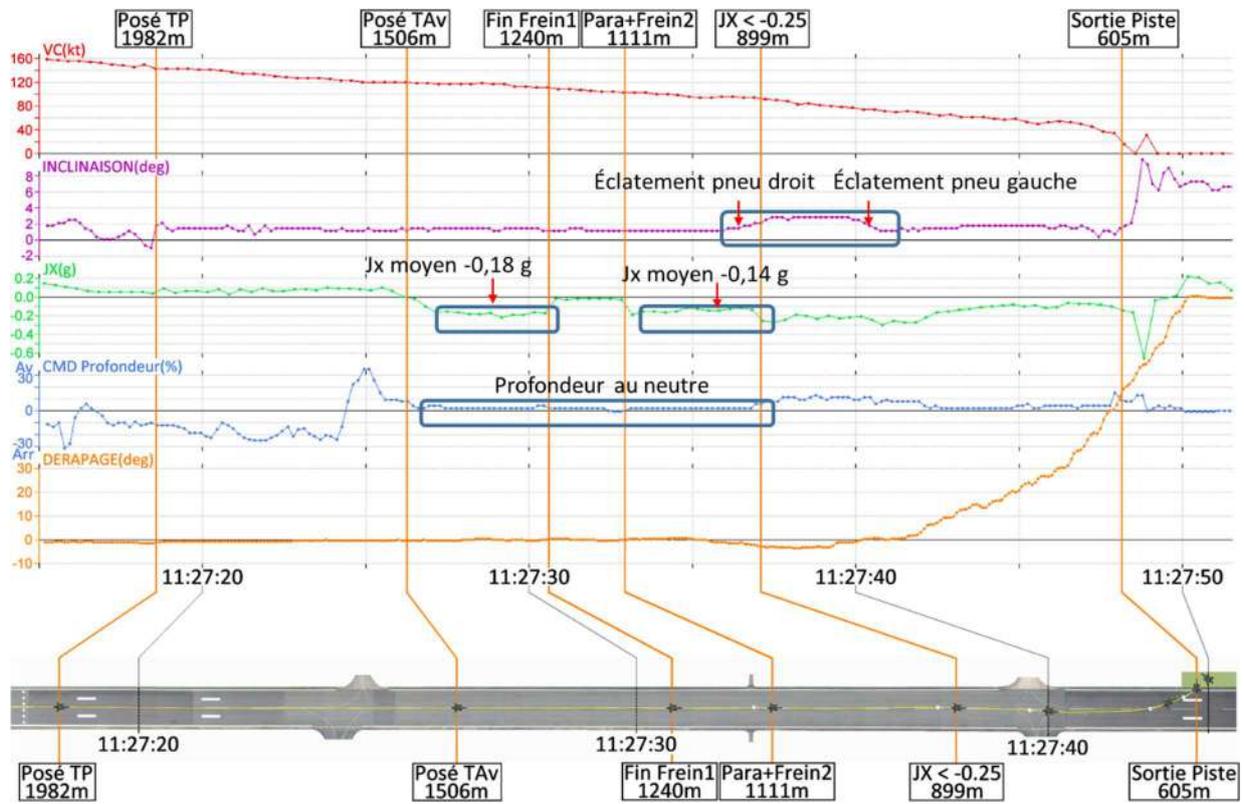


Figure 16 : paramètres lors de l'atterrissage

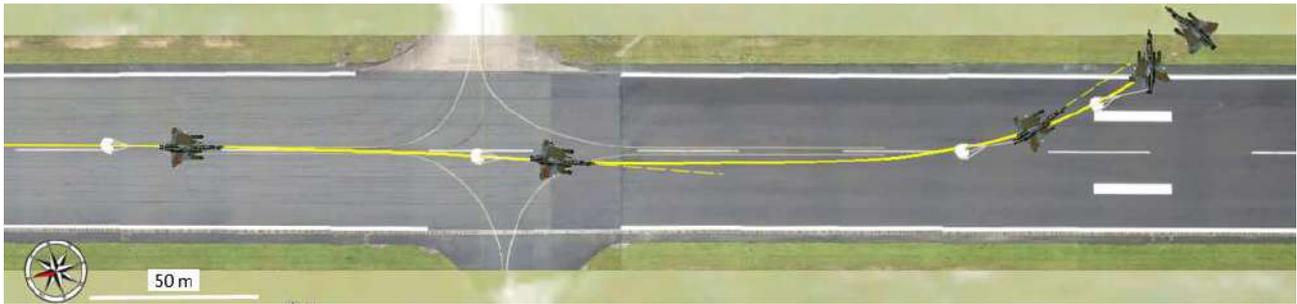


Figure 17 : zoom sur la fin de la trajectoire

La décélération de l'avion est de $-0,18\text{ g}$ en moyenne pendant le freinage normal. Le pilote cesse de freiner pendant plus de deux secondes pour passer sur frein 2. La décélération sur frein 2 est alors de $-0,14\text{ g}$ en moyenne.

La technique d'hypo-sustentation n'est pas appliquée.

Le pilote perd le contrôle de l'avion pendant le freinage sur frein 2, après l'éclatement successif des pneus des roues principales droite puis gauche.

2.1.7. Performances d'atterrissage

Les calculs théoriques suivants sont réalisés avec les paramètres de l'atterrissage lors de l'évènement (masse de l'avion, vitesse de toucher des roues principales à 143 kt, piste mouillée) et permettent d'établir la distance de roulement, entre le toucher des roues principales et l'immobilisation de l'avion, et d'identifier le Jx atteignable (Cf. annexe, figure 22 et 23).

Au moment de l'évènement, la documentation à disposition de l'équipage contenait une classification de l'état des pistes différente de celle utilisée aujourd'hui : une piste « mouillée » dans l'UCB d'alors correspondait pour les paramètres de vol à disposition de l'équipage à une piste « inondée » actuelle. En effet, l'UCB distinguait piste sèche (RCR = 23), humide (RCR=12) et piste mouillée (RCR=9). Or suite aux enseignements tirés de l'enquête de sécurité BEAD-air A-2016-007-I, Dassault Aviation a proposé l'uniformisation de cette classification avec celle du Rafale, c'est-à-dire : piste sèche (RCR = 23), mouillée (RCR=12), inondée (RCR=9) ou verglacée (RCR=5). Dans la suite du rapport, les données se réfèrent à cette nouvelle terminologie.

Par ailleurs, les calculs donnés dans le manuel de performance (UCB) tiennent compte de l'application de l'hypo-sustentation.

2.1.7.1. Atterrissage réalisé

Dans les conditions de l'atterrissage tel qu'initié par l'équipage (freinage aérodynamique jusqu'à 120 kt, puis freinage normal, sans parachute, sans hypo-sustentation), en appliquant la pression normale sur les freins (et sans déficit d'adhérence au sol de type aquaplaning pour lequel le SPAD réduit la pression de freinage), les performances théoriques issues du logiciel de calcul du constructeur donnent :

- une distance de roulement de 1 600 m ;
- un Jx compris entre $-0,23\text{ g}$ et $-0,20\text{ g}$.

L'équipage a obtenu un Jx légèrement inférieur à ce qu'il pensait obtenir. Toutefois, dans cette configuration et dans l'hypothèse où l'équipage entame un freinage maximal dès le toucher des roues, la distance de roulement restait compatible avec la longueur de la piste. Dans ces conditions de contamination, cette valeur de Jx témoigne d'un fonctionnement cohérent du SPAD.

Lors du freinage normal, le Jx théorique sur piste mouillée n'est pas atteint. L'efficacité du SPAD est toutefois démontrée.

2.1.7.2. Performances nominales théoriques

Différents cas de calcul mettent en évidence des performances théoriques atteignables, avec un début de freinage à 120 kt et le déploiement du parachute à 98 kt, selon les conditions de piste et la technique utilisée.

Selon ces calculs avec les conditions de la piste du jour, les Jx obtenus lors de l'évènement indiquent que dans la phase de freinage normal, avec le SPAD opérant, l'état de la piste était entre mouillée et inondée¹³.

		Avec hyposustentation			Sans hyposustentation		
		Jx (g)	Rolling Distance (m)	EDF (MJ)	Jx (g)	Rolling Distance (m)	EDF (MJ)
Sans parachute	Piste sèche	[-0.50, -0.45]	1120	19.3	[-0.45, -0.40]	1160	20.6
	Piste mouillée	[-0.35, -0.25]	1380	18.4	[-0.25, -0.20]	1600	20.3
	Piste inondée	[-0.22, -0.12]	1910	16.5	[-0.13, -0.10]	2430	19.7
Avec parachute	Piste sèche	[-0.55, -0.45]	1090	18.2	[-0.50, -0.45]	1130	19.3
	Piste mouillée	[-0.40, -0.25]	1310	16.6	[-0.32, -0.22]	1480	17.7
	Piste inondée	[-0.25, -0.10]	1710	13.8	[-0.20, -0.10]	2070	15.5

Figure 18 : performances théoriques d'atterrissage

Les valeurs de Jx enregistrées sont en-deçà des valeurs théoriques atteignables avec la technique appliquée lors de l'évènement. Elles témoignent d'une action cohérente et non excessive sur les freins pendant l'utilisation freins 1.

Les Jx enregistrés indiquent que la piste était probablement plus contaminée qu'une piste mouillée.

2.2. Séquence de l'évènement

- À 10h02, le M2000D n° 652 décolle de la base aérienne de Nancy Ochey pour un vol d'entraînement ;
- dans l'heure précédant l'atterrissage, la pluie tombe abondamment sur la base aérienne ;
- lors du contact radio avec l'avion au retour de la mission, le contrôleur annonce que la piste est mouillée alors qu'elle est probablement inondée ;
- l'équipage effectue une percée aux instruments et l'avion atterrit en piste 20 à 11h27 ;
- le pilote réalise un freinage aérodynamique, pose le train avant puis effectue la procédure de freinage normal sur frein 1 pendant moins de quatre secondes. Le SPAD régule le freinage sur la piste mouillée à inondée. Le Jx moyen est de -0,18 g ;
- considérant ce freinage comme étant peu efficace, le pilote exécute la procédure de freinage insuffisant. Il relâche les freins pendant 2,3 secondes, déploie le parachute frein, bascule sur le circuit de frein 2 (circuit de secours, SPAD inopérant) et reprend l'action de freinage. Le Jx moyen est alors de -0,14 g ;
- le pilote entame un freinage sur frein 2 et bloque les roues en freinant trop fermement ;
- les roues de l'avion rencontrent un phénomène d'aquaplaning pendant la phase de freinage de secours ;
- vers 900 m de piste restants, le pneu droit éclate et l'avion dévie vers la droite de sa trajectoire. Lorsque le pilote tente de maintenir l'axe de piste par freinage différentiel, le pneu gauche éclate. L'avion part alors en dérapage latéral droit et sort de piste au niveau du panneau 600 m restants à une vitesse inférieure à 33 kt ;
- l'avion est instantanément arrêté par l'entrée dans la zone herbeuse à quelques mètres du bord de la piste.

2.3. Recherche des causes de l'évènement

2.3.1. Causes relevant du domaine environnemental

2.3.1.1. Présence d'eau sur la piste

¹³ Piste inondée : de vastes nappes visibles d'eau stagnante ou de neige fondue recouvrent plus de 25% et de plus de trois millimètres d'eau la surface de la piste (extrait du manuel d'exploitation de la base aérienne de Nancy Ochey).

Le printemps a été particulièrement humide et les pluies nombreuses. Dans les deux derniers jours, les pluies ont été importantes. Les sols sont gorgés d'eau, rendant difficile l'évacuation de l'eau fraîchement tombée. Dans la demi-heure, et particulièrement les dix minutes précédant l'atterrissage, l'eau s'est accumulée sur la piste.

La présence d'une grande quantité d'eau sur la piste issue d'une longue période pluvieuse est contributive à l'évènement.

2.3.1.2. Performances de la piste

Par construction, la piste ne dispose pas d'un drainage de sa structure mais seulement des zones à sa périphérie. La saison favorise les résurgences d'eau sous la piste et l'apparition de flaques d'eau. L'usure du revêtement a limité ses caractéristiques naturelles et optimales de drainage par infiltration.

Le drainage insuffisant de l'eau sous la piste est contributif à l'évènement.

2.3.1.3. Aquaplaning après le blocage des roues

L'eau de pluie présente sur la piste a favorisé un manque d'adhérence des roues pendant la phase de freinage sur frein 2 et le déclenchement du phénomène d'aquaplaning de l'avion.

L'avion a subi un phénomène d'aquaplaning qui a contribué de façon certaine à l'évènement.

2.3.2. Causes relevant du domaine technique

L'ensemble du système de freinage (génératrices tachymétriques, SPAD, circuits hydrauliques, blocs freins) a fonctionné normalement. La recherche des causes relevant des facteurs techniques porte sur les trains d'atterrissage principaux et les roues principales.

2.3.2.1. État du pneumatique droit

Le pneumatique de la roue droite présente une usure prononcée : la profondeur des rainures centrales est relevée à environ un millimètre, ce qui est le minimum attendu. Les rainures extérieures sont quant à elle de l'ordre de trois millimètres.

Le pneumatique droit a un vieillissement de 47 atterrissages, ce qui correspond à un vieillissement habituel à l'approche de l'opération de remplacement.

Au cours de la visite journalière puis de la visite avant vol, ni le technicien de piste ni l'équipage n'a constaté d'usure excessive du pneumatique droit et n'a relevé de besoin de déclencher une opération de remplacement.

Or les rainures jouent un rôle dans l'évacuation de l'eau présente sous la roue pendant la phase d'atterrissage ou de décollage : plus elles sont profondes, mieux l'eau est évacuée et meilleure est l'adhérence.

La profondeur de la rainure n'a pas suffi à évacuer l'eau présente sous le pneu droit.

En outre, pendant la phase d'aquaplaning, la roue ne tourne plus et n'évacue donc plus l'eau.

L'usure importante, mais dans les normes, du pneumatique principal droit a pu être contributive à l'évènement en favorisant l'aquaplaning de la roue droite et aboutissant à la sortie de piste à gauche.

2.3.2.2. Amortisseurs de train d'atterrissage

Avant la mise en vol de l'avion, les mécaniciens de piste ont procédé aux vérifications des hauteurs des tiges d'amortisseur. Si le contrôle avait établi un défaut de hauteur, une opération de maintenance aurait été diligentée pour rétablir des valeurs dans les normes. De plus, des contrôles par sondage dans le parc des M2000D ont révélé des cas de pressions insuffisantes sur les atterrisseurs d'autres avions. Ces pressions sont contrôlées seulement à l'occasion des visites d'entretien de type progressif, selon les préconisations du plan

d'entretien de l'aéronef. Ces baisses de pression ne sont donc pas toujours détectables lors de la mesure de hauteur de la tige d'amortisseur.

Or la qualité de l'adhérence d'une roue sur un sol dépend de l'efficacité de l'amortisseur de la jambe de train à laquelle elle est fixée, notamment du gonflage des chambres de celui-ci. En conséquence, les roues ont pu avoir une adhérence au sol perturbée, provoquant un glissement de la roue, et impliquant une régulation de la puissance du freinage par le SPAD. Toutefois, l'appui du pilote sur la pédale n'étant pas enregistré, il n'a pas pu être établi que le freinage était effectivement maximal. En outre, les informations de régulation et d'atténuation du freinage du SPAD ne sont pas enregistrées, elles non plus.

La pression insuffisante de gonflage dans les chambres des amortisseurs de trains d'atterrissage a pu réduire la qualité de l'adhérence des roues. Ce phénomène a pu éventuellement générer une régulation du freinage par le SPAD.

2.3.3. Causes relevant du domaine des facteurs organisationnels et humains

2.3.3.1. Actions du pilote

2.3.3.1.1. Interprétation du Jx

Pendant l'atterrissage, le pilote a interprété la valeur du Jx comme celle d'un freinage insuffisant, déclenchant ainsi l'exécution de la procédure de secours associée, prévue en action réflexe dans le MCB¹⁴ 110-02. Pourtant, selon l'UCB¹⁵ en vigueur au moment de l'évènement, une valeur de Jx comprise entre -0,1g et -0,2g est cohérente avec les performances de freinage attendues de l'aéronef sur piste mouillée (selon l'ancienne terminologie).

Le pilote n'a pas connaissance de la valeur attendue du Jx sur piste mouillée. Cette méconnaissance est à l'origine d'une analyse erronée de la situation.

2.3.3.1.2. Exécution de la procédure de secours

L'analyse des actions réalisées par le pilote lors de l'application de la procédure de secours « freinage insuffisant à l'atterrissage » montre qu'elles ont été bien séquencées, dans un premier temps. Puis, dans un deuxième temps, il commet une erreur en omettant d'amener la commande de profondeur en arrière. Il entame son freinage sur frein 2 sans appliquer la technique d'hypo-sustentation pourtant prévue dans l'UCB dans le cas d'une procédure freinage insuffisant. La valeur du Jx reste faible.

Le pilote a appliqué de façon incomplète la procédure de secours « freinage insuffisant à l'atterrissage » prévue dans l'UCB, qui recommande l'utilisation de l'hypo-sustentation afin d'améliorer les performances de freinage. L'absence d'application de l'hypo-sustentation est contributive à l'évènement.

2.3.3.2. Consignes imprécises concernant l'atterrissage

2.3.3.2.1. Absence de procédure d'atterrissage sur piste mouillée

Selon le manuel d'exploitation de la base aérienne de Nancy Ochev, l'état de la piste en cas de précipitations est évalué selon cinq niveaux : piste sèche, humide, mouillée, inondée ou verglacée. Dans ce dernier cas, la piste est fermée. Ainsi, en pratique quatre états de piste susceptibles d'influencer les performances au freinage sont rencontrés à Nancy.

Le MCB 110-01 du M2000D, qui synthétise les procédures normales connues des pilotes, présente seulement deux procédures : la procédure « freinage normal » et la procédure « freinage maximal », sans qu'il soit fait mention de différence basée sur l'état de la piste. Dans le MCB 110-02 (procédure de secours), une procédure traite d'un « freinage insuffisant à l'atterrissage ». Celle-ci précise que son application doit avoir lieu si le Jx est

¹⁴ Mémento des procédures ; la partie -01 énonce les procédures normales ; la partie -02 correspond aux procédures de secours.

¹⁵ Manuel de vol.

compris entre 0 g et -0,2 g sur piste sèche. Il n'y a pas de précision sur le moyen de détection d'un freinage insuffisant sur piste humide, mouillée ou inondée.

Dans l'UCB 110-01, d'autres procédures spécifiques de freinage sont répertoriées : atterrissage lourd, atterrissage court, atterrissage sur piste inondée ou glissante. Les procédures freinage normal et freinage maximal sont également décrites mais les valeurs de Jx attendues sont précisées pour une piste sèche. Il n'existe pas de procédure spécifique à un atterrissage sur piste humide ou mouillée. Quant à la procédure de secours « freinage insuffisant à l'atterrissage » de l'UCB, elle n'apporte pas plus de précisions que celle présente dans le MCB sur le freinage sur piste mouillée.

La relation entre les procédures répertoriées et l'état de la piste mouillée est insuffisante pour établir clairement la situation et la procédure à appliquer. En réalité, l'affichage d'un Jx supérieur à -0,2 g ne signifie pas systématiquement une panne du système de freinage lorsque la piste est mouillée ou inondée. Dès lors, l'application de la procédure « freinage inefficace à l'atterrissage » peut, dans ces conditions, être inadaptée. Enfin, le guide d'utilisation opérationnelle (GUO) du M2000D en vigueur au moment de l'évènement ne donne pas d'indication pour l'exécution d'un atterrissage sur piste mouillée.

Les différentes documentations d'utilisation du M2000 ne précisent pas la procédure associée à un atterrissage sur piste mouillée, permettant une analyse et une réaction adaptée du pilote. Ainsi, les connaissances des pilotes et leurs savoir-faire sur piste mouillée reposent sur le partage entre pairs.

Il n'existe pas de procédure spécifique de freinage sur piste mouillée. La documentation opérationnelle n'est pas précise sur les cas d'atterrissage avec des performances dégradées liées à la piste.

2.3.3.2.2. Déficit de mise en valeur dans la documentation

L'UCB 110-01 précise que la valeur du Jx indiquée en VTH est une aide permettant au pilote d'estimer l'efficacité du freinage. Cette valeur dépend de plusieurs déterminants : l'état de la piste, la masse de l'avion, l'enfoncement des pédales de frein, l'emploi du parachute frein, l'utilisation de la technique d'hypo-sustentation, la poussée résiduelle du moteur et la vitesse. Il est précisé que, à effort de freinage constant, la valeur du Jx remonte au fur et à mesure que la vitesse diminue, et que l'état de contamination de la piste divise la valeur du Jx.

L'état de la piste est déterminant sur la valeur du Jx. Tous les paramètres étant égaux par ailleurs, une approximation du Jx en fonction de l'état de la piste peut être obtenue en divisant le Jx sur piste sèche (RCR = 23) :

- par 2 sur une piste dite "humide" (RCR = 12),
- par 4 sur une piste dite "mouillée" (RCR = 9),
- par 8 sur une piste dite "verglacée" (RCR = 5).

Figure 19 : extrait UCB 110-01 (ancienne terminologie)

L'exploitation de cette information n'apparaît pas dans le GUO ni dans le MCB édités par l'armée de l'Air et de l'Espace. La connaissance de l'évolution du Jx en fonction de l'état de la piste dépend donc uniquement de la connaissance détaillée de l'UCB. Une grande partie des pilotes ne semble pas avoir retenu cette information. Pourtant, suite à un événement similaire en mai 2016, le rapport d'enquête du BEAD-Air A-2016-007-I mettait déjà en lumière la difficulté pour les pilotes à trouver ces informations.

Les informations sur le Jx sont peu mises en valeur dans la documentation de l'armée de l'Air et de l'Espace. L'absence de description détaillée et organisée dans la documentation contribue à une connaissance perfectible des pilotes sur l'évolution du Jx en fonction de l'état de la piste et les techniques de pilotage associées.

2.3.3.2.3. UCB, MCB et GUO imprécis

Le MCB ordonne et synthétise les procédures de l'UCB sous forme de check-list à appliquer par l'équipage. Si l'UCB doit être connu des équipages, il ne peut pas être emporté pour être exploité en vol. Le MCB est quant à lui le memento emporté en vol et au simulateur par les équipages.

Lors de l'atterrissage, aucune panne n'est signalée et la piste est annoncée comme mouillée. Ainsi, la procédure initialement prévue d'être appliquée par le pilote est la procédure « freinage normal », décrite dans l'UCB et le MCB. Cette procédure ne précise pas la vitesse à partir de laquelle la roue avant peut être posée, après le freinage aérodynamique, ni la vitesse à partir de laquelle le freinage peut être appliqué.

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. Endencher 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.

MCB110-01 M2000D
2009-01

FREINAGE NORMAL

- 1 - MANETTE DES GAZ sur RALENTI
- 2 - Conserver le réticule de décollage sur l'horizon 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, risque d'auto cabrage rapide dès 90 kt

- 3 - Poser le train avant sans brutalité
- 4 - Endencher la DIRAV
- 5 - Freiner. Doser au Jx. Valeur moyenne - 0,2 à - 0,3

Lorsque la vitesse de freinage est atteinte, l'utilisation des freins est plus efficace que le freinage aérodynamique

Figure 20 : extrait de l'UCB (à gauche) et extrait du MCB (à droite)

Au début de l'atterrissage normal, le Jx lu par le pilote est compris entre -0,1 g et -0,2 g. Il est donc insuffisant en comparaison de la valeur du Jx préconisée dans le MCB. De fait, le pilote ressent un freinage inefficace par rapport à son habitude malgré la pression qu'il exerce sur les freins pour rechercher la valeur habituelle indiquée dans le MCB. Dans ce document, il n'est pas précisé que les valeurs de Jx indiquée correspondent à des valeurs sur piste sèche, contrairement à la précision dans l'UCB.

Le pilote dispose de moins de quatre secondes pour interpréter ce Jx. Sans autre information, il l'analyse comme une panne du système de freinage. Il interrompt alors la procédure « freinage normal » et réalise la procédure de secours « freinage insuffisant à l'atterrissage ».

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.

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 21 : extrait de l'UCB (à gauche) et extrait du MCB (à droite)

De même que pour la procédure « freinage normal », cette procédure de secours est détaillée dans l'UCB et transcrite dans le MCB (avec des appellations différentes). L'UCB précise que cette procédure s'applique en cas de panne du système de freinage et précise que des performances de freinage réduites sur piste dégradée ne correspondent pas systématiquement à une panne du système de freinage. Cette dernière information découle des recommandations suite à l'évènement de 2016.

Ainsi, la procédure « freinage inefficace » peut être inadaptée, c'est pourquoi le NOTA en début de procédure renvoie à l'application de la procédure « freinage normal » avec laquelle il faut rechercher un Jx compris entre -0,2 g et -0,3 g. Dans le MCB, la procédure est associée à une valeur de Jx afin d'évaluer l'efficacité du freinage. Il est précisé que cette procédure doit s'appliquer en cas de Jx compris entre 0 g et -0,2 g sur piste sèche, mais sans précision sur piste mouillée.

La rédaction du MCB, dans un but de synthèse, a omis des précisions dans les procédures de freinage.

De plus, le GUO, autre référence procédurale pour les équipages servant à préciser les procédures et techniques pour l'emploi opérationnel de l'avion, n'explique pas les techniques et procédures de freinage sur piste dégradée.

Les écarts entre l'UCB et le MCB, ainsi que l'absence dans le GUO d'information sur le freinage sur piste mouillée, ont favorisé une perte d'information sur les conséquences au freinage d'un atterrissage sur piste mouillée.

2.3.3.2.4. Interprétation erronée des performances à l'atterrissage

Les performances à l'atterrissage sont définies dans l'UCB par une distance de freinage. Elles sont calculées avec l'application d'un freinage maximal, ce qui signifie une utilisation maximale des freins, et l'exécution de la technique d'hypo-sustentation, dès la vitesse de freinage à énergie normale¹⁶ atteinte.

Or l'absence d'application systématique de l'hypo-sustentation, de même que l'application systématique du freinage aérodynamique bien en-deçà de la vitesse de freinage à énergie normale lors d'un freinage normal, ne permet pas d'assurer les performances d'atterrissage calculées à partir de la documentation d'emploi du constructeur.

Les équipages ont une faible connaissance de ces critères de calcul de performances, et appliquent quasi systématiquement la technique d'atterrissage normal sans connaissance des performances réelles du jour, mais en s'appuyant sur une fiche d'opération générique.

Les équipages ont une conscience incomplète de la performance de freinage à l'atterrissage lorsqu'ils appliquent la procédure de freinage normal, et n'appliquent pas systématiquement l'hypo-sustentation.

2.3.3.3. Évaluation de l'état de la piste

Conformément au manuel d'exploitation de la base aérienne de Nancy Ochev, l'évaluation de l'état de la piste est effectuée par les contrôleurs lors de l'ouverture du terrain, à la mi-journée et avant les vols de nuit. En fonction des circonstances, des contrôles supplémentaires peuvent être diligentés. L'estimation est réalisée à vue, éventuellement renforcée par une mesure de hauteur d'eau avec l'outillage disponible dans le véhicule de piste, par un essai de freinage avec un véhicule, ou par la prise en compte des informations transmises par les équipages.

La pluie est apparue peu après le dernier départ 43 minutes avant l'évènement, avec une intensification dans les minutes précédant l'atterrissage du M2000D n° 652. Les conditions météorologiques se dégradant, l'état de la piste se dégrade également. Peu avant la série d'atterrissages prévus, ils actualisent l'information par observation visuelle depuis la tour de contrôle. Il est alors difficile d'évaluer et de qualifier de manière précise et objective l'état de la piste (mouillée ou inondée).

La piste est connue pour la mauvaise qualité du drainage des eaux de pluie. Dès lors, l'eau reste sur la piste, sans que soit connu le degré de contamination et la proximité avec le niveau « inondé ». Les contrôleurs n'ont

¹⁶ Vitesse à partir de laquelle les freins peuvent être actionnés sans risque de surchauffe pour obtenir la meilleure performance de freinage.

pas anticipé l'évaluation de l'état de la piste, qui était probablement presque inondée, et les conséquences associées pour les atterrissages. Une sous-évaluation du risque par le service du contrôle est probable.

Lorsque le M2000D n° 652 se présente à l'atterrissage, l'équipage ne dispose pas d'autre indication sur le degré de présence d'eau sur la piste que l'annonce du contrôleur d'une piste mouillée.

La limite d'appréciation entre une piste mouillée et une piste inondée est donc imprécise. De plus, l'équipage est le premier à se poser après le début de l'averse, il n'y a donc pas encore eu de retour vers les contrôleurs de l'état de la piste par un autre aéronef.

L'annonce d'une piste mouillée étant très fréquente à Nancy Ochev, l'équipage n'a pas anticipé la dégradation de Jx ni révisé les valeurs attendues, ou le risque de glisser ou de déraper sur la piste, avec les procédures associées. À la différence du manque de cohérence des procédures pour un freinage sur piste mouillée, les procédures d'atterrissage sur piste inondée ou glissante permettent d'anticiper ces risques. Dans cette situation, l'UCB conseille l'emploi du parachute et l'action d'hypo-sustentation au plus tôt.

L'évaluation subjective et erronée de l'état de la piste est à l'origine d'une approximation pouvant conduire à une sous-estimation du risque par le contrôleur. L'équipage n'a pas anticipé la dégradation de Jx attendue sur piste mouillée.

2.3.3.4. Formation du pilote sur M2000 à Orange

L'atterrissage et le freinage sur M2000, et les procédures secours associées, compétences de base du pilotage de l'aéronef, sont enseignés lors d'un stage de quatre mois sur la base aérienne d'Orange pour la formation initiale. Lorsque les nouveaux pilotes poursuivent ensuite leur formation à l'ETD à Nancy, ces compétences sont considérées comme acquises et ne donnent pas lieu à une instruction complémentaire.

2.3.3.4.1. Discontinuité de la formation

Au sein de l'escadron 2/5 à Orange en charge de la formation initiale des pilotes sur M2000, les instructeurs doivent faire face à une disponibilité limitée des avions et du simulateur. En conséquence, l'instruction dispensée aux stagiaires souffre de discontinuité, rendant plus complexe la consolidation de leurs compétences.

Cette discontinuité de la formation a été aggravée par la crise sanitaire liée à la pandémie de Covid-19. En effet, le pilote, qui était en formation initiale à Orange au moment de cette crise, a vu sa formation s'étaler dans le temps en raison des premières mesures sanitaires. Il a alterné des périodes de deux semaines de formation, au cours desquelles il se rendait à l'escadron s'il était programmé en vol ou au simulateur, avec des périodes de confinement strict de deux semaines à domicile.

La faible disponibilité des aéronefs et le manque de créneaux sur simulateur associés à la crise sanitaire ont conduit à une formation discontinue du pilote. Cette situation n'est pas optimale pour l'acquisition et la consolidation des compétences de jeunes pilotes.

2.3.3.4.2. Apprentissage des compétences techniques de freinage

Le programme de formation initiale sur M2000 prévoit que les stagiaires réalisent une trentaine de missions, ce qui correspond à autant d'atterrissages complets. Sans être prévue au programme de ces vols, la technique d'hypo-sustentation peut être montrée une fois aux stagiaires lors d'un freinage, à l'initiative de l'instructeur. Il est alors précisé au stagiaire que la technique d'hypo-sustentation ne doit être effectuée qu'en-dessous de 80kt en raison d'un risque de redécollage de la roulette de nez en cas de vitesse trop élevée. Le pilote ne se souvient pas avoir vu cette technique lors de sa formation.

De même, l'utilisation du frein de secours et les risques associés sont également montrés aux stagiaires une fois au cours d'un atterrissage standard dans de bonnes conditions d'atterrissage. L'objectif est de les sensibiliser aux particularités du freinage de secours, notamment à l'absence de régulation du freinage associé au risque d'éclatement de pneumatique.

Lors de l'instruction au sol, les dégradations des performances d'atterrissage en fonction des conditions de piste ne sont pas formellement évoquées dans la documentation de cours. C'est seulement lors d'échanges

oraux que les pilotes partagent leurs expériences de ces conditions, lorsque les circonstances le permettent ou le requièrent. Cette transmission de savoir dépend donc de l'expérience individuelle des instructeurs.

En raison des limites technologiques des simulateurs de M2000 à Orange, les procédures de freinage ne sont pas travaillées au simulateur car non représentatives de la réalité. Les stagiaires terminent donc leur formation en ayant potentiellement réalisé un atterrissage avec la technique de l'hypo-sustentation et un atterrissage standard en utilisant le frein de secours.

Les compétences d'un pilote ne peuvent être considérées comme acquises et consolidées après une seule démonstration. La formation insuffisante sur ces points particuliers, fragilise la mécanisation et le dosage du pilote aux procédures de freinage.

2.3.3.4.3. Compétences techniques de freinage sur piste contaminée

En raison des conditions météorologiques régnant sur la région d'Orange, la piste est peu souvent déclarée mouillée. Il est donc rare qu'un stagiaire réalise un atterrissage dans ce contexte au cours de sa formation. Ses connaissances reposent alors sur les informations transmises par les instructeurs et peu sur l'expérience de ce type de conditions.

Or, au cours de la formation, il est expliqué à l'élève d'appliquer la procédure de freinage normal en cas de piste mouillée, le Jx recherché étant considéré très similaire à un Jx sur piste sèche.

À l'issue de leur formation à Orange, les pilotes n'ont pas connaissance d'une dégradation significative possible du Jx sur piste contaminée. Ils ne sont pas mécanisés aux actions à effectuer en cas d'atterrissage sur piste mouillée ou inondée afin d'améliorer l'efficacité du freinage.

À l'issue de leur formation à Orange, les pilotes n'ont pas de connaissance ni d'expérience d'une dégradation significative possible du Jx sur piste mouillée. Ils n'ont pas connaissance des procédures spécifiques pouvant être appliquées lorsque l'état de la piste est dégradé.

2.3.3.5. Pratique du pilote sur piste mouillée

2.3.3.5.1. Faible expérience sur piste mouillée

Arrivé à Nancy depuis une année, le pilote a une faible expérience des atterrissages sur des pistes mouillées et inexistante sur des pistes inondées. Au cours de tous ses atterrissages précédents, il n'a jamais constaté de Jx supérieur à -0,2 g.

De plus, le pilote est arrivé alors que le simulateur M2000D était inopérant. Ce dernier a été démonté dans le cadre du programme de rénovation de mi vie du M2000D. Il a donc réalisé ses entraînements synthétiques sur un entraîneur tactique qui ne permet pas de simuler un atterrissage sur piste mouillée avec réduction des performances au freinage. Il ne s'est donc pas accoutumé à un Jx plus élevé mais non nul sur piste mouillée.

Le manque d'expérience du pilote récemment qualifié sur M2000D et les limites technologiques du simulateur utilisé ont contribué à une erreur d'interprétation du Jx.

2.3.3.5.2. Entraînement inadapté à l'atterrissage sur piste dégradée

En raison des limites technologiques des simulateurs, les instructeurs utilisent la simulation d'une piste verglacée pour l'entraînement à la procédure freinage insuffisant à l'atterrissage. Dans le but de déclencher l'exécution de la procédure de secours par le pilote, une fois l'aéronef posé, l'instructeur simule une piste verglacée entraînant ainsi un Jx insuffisant. Une fois la procédure réalisée par le pilote, l'instructeur rétablit une piste sèche pour redonner de l'efficacité de freinage et le Jx reprend une valeur habituelle, entre -0,3 g et -0,2 g. Les équipages sont donc mécanisés sur simulateur pour appliquer une procédure de freinage de secours dès lors que le Jx n'est pas compris entre -0,2 g et -0,3 g.

L'utilisation de moyen de contournement au simulateur pour pallier un déficit technologique contribue au développement d'un processus de diagnostic inadapté.

2.3.3.5.3. Manque d'entraînement à la technique d'hypo-sustentation et à l'utilisation du frein 2

Le pilote a une faible expérience de l'application du frein 2 à l'atterrissage en situation réelle. Il l'a réalisée une seule fois en raison d'une panne survenue en vol. Il s'y était donc préparé avant l'atterrissage.

Par ailleurs, l'entraîneur tactique, utilisé pour les séances de simulation en raison de l'indisponibilité du simulateur M2000D depuis deux ans, n'est pas représentatif de la réalité ni sur les commandes de vol, ni sur le freinage. Or, la technique d'hypo-sustentation comme celle de l'utilisation du frein de secours nécessite de mécaniser les actions et de doser finement le freinage à travers un ressenti, ce qui est impossible sur l'entraîneur tactique. Ainsi, il est probable que le pilote ne soit pas suffisamment aguerri à ces deux actions.

Un manque de mécanisation à la technique d'hypo-sustentation et d'entraînement au dosage du frein de secours a contribué à l'évènement.

2.3.3.6. Diminution du partage d'information

Pendant la formation du pilote durant la crise sanitaire de la covid-19, les escadrons se sont adaptés en limitant la présence de personnel dans les locaux. Le personnel ne devait se rendre dans les escadrons qu'à condition que son travail du jour l'impose. Cette situation a nui au partage d'expérience entre les pilotes expérimentés et les pilotes les moins expérimentés.

Ainsi, les pilotes nouvellement formés sur M2000 ne bénéficient que de manière limitée des échanges informels avec les pilotes plus expérimentés. Ces partages d'expérience sont pourtant essentiels au développement des compétences et des connaissances.

La diminution du partage d'expérience au sein des escadrons, induite par les contraintes posées par la crise sanitaire, a probablement favorisé le déficit d'acquisition des spécificités liées à un atterrissage sur piste mouillée.

2.3.3.7. Contrôle par le CDB

2.3.3.7.1. Évaluation du risque lors de la préparation et en vol

La préparation est débutée la veille puis terminée le matin du vol. L'équipage a connaissance des conditions météorologiques dégradées pour le vol. Cependant, compte tenu de la mission, ces dernières n'influencent pas ou peu les exercices prévus.

Le NOSA commandant de bord, expérimenté sur le terrain de Nancy, a connaissance des problématiques d'évacuation de l'eau sur la piste. Il sait que, en cas d'averse, la piste est rapidement mouillée voire inondée. Le poser sur une piste mouillée est une situation routinière pour lui. Il ne le perçoit pas comme une situation à risque. Le NOSA sait que, sur une piste mouillée, la décélération n'est pas autant prononcée que sur piste sèche.

Au cours du vol, le pilote a démontré une aisance lors des exercices. La mission a été réalisée comme attendue. De plus, au sein de l'escadron, la progression de ce jeune pilote est jugée satisfaisante par l'ensemble des leaders dont le NOSA fait partie.

Ainsi, le NOSA n'aborde pas le risque d'un atterrissage sur la piste mouillée ni lors de la préparation et du briefing avant vol ni en vol lors d'un briefing avant atterrissage, d'autant plus qu'il s'agit d'une action de pilotage pur pour laquelle il n'est pas compétent. En avion isolé, l'équipage n'est pas tenu de préparer l'atterrissage sur une piste mouillée. En vol, le NOSA initie un briefing lorsqu'il ressent que le pilote peut en avoir besoin, notamment lorsque la mission a été intense et que le pilote lui semble fatigué, ce qui n'est pas le cas lors de l'évènement.

La sous-évaluation du risque d'un atterrissage sur une piste mouillée à Nancy par le NOSA commandant de bord expérimenté, et le respect strict de ses prérogatives de navigateur ont contribué à l'absence d'anticipation du risque.

2.3.3.7.2. Conscience erronée des compétences du pilote

Les procédures en vigueur sur M2000D n'imposent pas au NOSA la surveillance du Jx lors de l'atterrissage. Le NOSA très expérimenté a l'habitude cependant de régler ses écrans pour afficher le Jx, afin d'être en mesure de l'annoncer au pilote en cas de besoin, mais aussi de le surveiller.

Il est admis que, une fois sa formation à Orange terminée, le pilote maîtrise les compétences basiques de pilotage dont l'atterrissage fait partie. Le NOSA n'a donc pas conscience de la faible expérience du pilote sur les atterrissages sur piste mouillée ni d'un potentiel manque de connaissances. La confiance envers les compétences du pilote, démontrées depuis son arrivée dans l'escadron, a probablement favorisé l'adoption d'une posture passive vis-à-vis du pilotage à l'atterrissage, phase de pilotage pur dans laquelle le NOSA n'intervient pas sauf urgence.

Le NOSA a une conscience erronée des compétences du pilote sur piste mouillée.

2.4. Fragilités organisationnelles

2.4.1. Retour d'expérience consécutive à l'évènement de 2016

L'évènement objet de la présente enquête est très similaire à l'évènement de 2016 objet de l'enquête A-2016-007-I. Malgré les recommandations émises par le BEA-É, des causes similaires ont été identifiées.

La contamination de la piste est de nouveau identifiée comme une cause contributive dans l'évènement. La recommandation, qui avait été acceptée sous condition d'obtention des ressources financières, n'était que partiellement appliquée au moment de l'évènement. Ainsi, la problématique de drainage de l'eau sur la piste n'est toujours pas résolue.

Le manque de mécanisation concernant l'hypo-sustentation est une nouvelle fois en cause. La recommandation n'a pas été retenue en raison des contraintes supposées de maintenance que pourrait induire la systématisation d'une telle pratique. En revanche, elle a été introduite dans la procédure freinage insuffisant à l'atterrissage. Cette procédure étant rarement mise en pratique en situation réelle, seul un entraînement régulier au simulateur peut permettre une mécanisation. L'absence d'un simulateur représentatif ne permet pas cette mécanisation. Par ailleurs, cette technique n'est pas dans le programme d'enseignement pendant la formation sur M2000.

Le rôle défaillant du simulateur dans l'entraînement du personnel navigant est pourtant identifié une nouvelle fois comme cause de l'évènement. Par ailleurs, cette situation s'est aggravée par l'absence depuis plus de deux ans de disponibilité du simulateur M2000D (déjà peu représentatif) et le recours à un entraîneur tactique non représentatif pour cette phase du vol.

L'absence d'une préparation des pilotes à un atterrissage sur piste dégradée est de nouveau mis en évidence. Le précédent rapport avait donné lieu à des rappels aux unités et à une préconisation visant à insister lors du briefing avant vol sur les procédures applicables en cas de difficultés à l'atterrissage afin de réactiver mentalement et par anticipation les actions applicables en cabine. La préconisation d'un briefing avant atterrissage permettant de rappeler les conditions du moment et les techniques à mettre en œuvre a, quant à elle, été rejetée. Le renouvellement régulier des équipages au sein des escadrons et l'absence de modification et d'harmonisation documentaire par l'armée de l'Air et de l'Espace suite aux modifications apportées par Dassault Aviation ont contribué à la perte progressive de cette information au sein des équipages.

Plusieurs causes déjà identifiées lors d'un évènement similaire en 2016, ayant fait l'objet de recommandations, ont été une nouvelle fois identifiées dans cet évènement.

2.4.2. Décision d'éjection

L'évènement conduit l'équipage à une sortie de piste avec une dernière lecture de vitesse en VTH proche de 50 kt et une vitesse réelle inférieure à 33 kt.

Au sein des escadrons de M2000, il est partagé entre les équipages qu'au-delà de 30 kt, vitesse minimale affichée en VTH, les équipages doivent s'éjecter en cas de sortie de piste. Cependant, la valeur de 30 kt n'est pas perçue comme une valeur seuil : la décision d'éjection dépend du ressenti de la cinématique par l'équipage. Lors de l'évènement, l'équipage a perçu que l'aéronef s'arrêtait quasi immédiatement en sortant de la piste. Il a donc décidé de ne pas s'éjecter.

Les conditions d'éjection en cas de sortie de piste en avion isolé ne sont décrites dans aucun document d'emploi. L'UCB et le MCB indiquent que l'équipage doit effectuer une évacuation rapide ou s'éjecter.

Le GUO ne décrit pas de procédure quant à la sortie de piste en avion isolé, mais décrit une procédure d'atterrissage en patrouille serrée : un seul avion peut engager la barrière, l'autre devant alors sortir de piste s'il ne peut s'arrêter. En cas de sortie de piste à une vitesse supérieure à 30 kt, l'équipage de l'autre avion doit alors s'éjecter.

Les équipages ont donc adapté partiellement pour les atterrissages en avion isolé une procédure de sortie de piste initialement écrite pour l'atterrissage en patrouille serrée, créant ainsi une procédure non écrite.

L'absence de procédure explicite quant à la décision d'éjection en cas de sortie de piste en avion isolé autorise une appréciation fondée sur un ressenti individuel.

PAS DE TEXTE

3. CONCLUSION

L'évènement est une perte de contrôle à l'atterrissage ayant conduit à une sortie de piste.

#LOC-G¹⁷

#RE¹⁸

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

La mission est un vol d'entraînement autonome au profit du pilote, nouvellement arrivé, pour lui permettre de s'aguerrir à l'utilisation de procédures opérationnelles de navigation, sous la supervision d'un navigateur officier système d'armes expérimenté.

Dans l'heure précédant l'atterrissage à Nancy Ochev, plusieurs épisodes d'averses se produisent sur le terrain. À l'approche de l'avion, le contrôleur annonce que la piste est mouillée.

Après l'arrondi, le train principal prend contact avec le sol à la vitesse de 143 kt. Le pilote réalise un freinage aérodynamique puis pose le train auxiliaire à 1 500 m restants et 120 kt. Lors de la première action de freinage normal, le Jx moyen est de -0,18 g. L'équipage a la sensation que le freinage est insuffisant. Dès lors, le pilote applique la procédure « freinage insuffisant » : il relâche les freins, tire le parachute frein à la vitesse de 98 kt et bascule sur le circuit de freinage de secours (frein 2). Il reprend alors le freinage, qu'il perçoit encore comme inefficace. En bloquant les roues, il provoque un phénomène d'aquaplaning. Les deux pneus principaux éclatent et l'avion part en dérapage latéral jusqu'à sortir de piste à 600 m restants avec un angle de 90 degrés par rapport à l'axe de piste. L'équipage se prépare à l'éjection, mais l'avion s'immobilise immédiatement en bordure de piste.

L'équipage indemne évacue immédiatement l'avion par ses propres moyens.

L'avion est fortement endommagé.

3.2. Causes de l'évènement

Les causes de l'évènement ont été identifiées dans les domaines techniques, environnementaux et des facteurs organisationnels et humains. (Cf. annexe 2)

La sortie de piste est une conséquence de la perte de contrôle engendrée par l'éclatement des pneus principaux dû à un blocage des roues en freinage de secours puis un phénomène d'aquaplaning.

Le blocage des roues a été causé par l'interprétation erronée du Jx, ayant conduit à l'application d'une procédure inadaptée et l'exécution incomplète de cette procédure. L'interprétation erronée du Jx a été engendrée par :

- la faible expérience du pilote, notamment pour l'atterrissage sur piste mouillée, dont le NOSA a une conscience erronée ;
- la méconnaissance des effets d'une piste mouillée sur le Jx ;
- l'absence de procédure spécifique de freinage pour le cas d'une piste mouillée ;
- une sous-évaluation du risque d'atterrir sur une piste mouillée ;
- la discontinuité de la formation pendant la période de crise sanitaire ;
- la formation et l'entraînement insuffisants sur piste mouillée et à la procédure « freinage insuffisant » ;
- la mécanisation sur entraîneur tactique à la procédure de freinage insuffisant dès que le Jx n'est pas inférieur à -0,2 g ;
- l'absence de simulateur de vol représentatif et les solutions de contournement non représentatives sur simulateur tactique ;
- la faiblesse de la connaissance de la communauté des pilotes des performances d'atterrissage du M2000 ;
- le déficit de partage de l'information ;
- les documentations imprécises, incomplètes et insuffisamment organisées pour appréhender les problématiques de freinage dégradé.

¹⁷ Loss of Control-Ground. Taxonomie du système de déclaration des données sur les accidents/incidents de l'organisation de l'aviation civile internationale : <https://www.icao.int/safety/airnavigation/aig/pages/adrep-taxonomies.aspx>.

¹⁸ Runway Excursion.

Le phénomène d'aquaplaning a été provoqué par :

- un phénomène pluvieux important saisonnier et journalier ;
- un drainage insuffisant de la piste ;
- le gonflage insuffisant des amortisseurs de train d'atterrissage ;
- l'usure du pneumatique de la roue droite proche de la limite.

L'information de l'état de la piste à la disposition de l'équipage ne lui a pas permis d'élaborer une conscience de la situation, lui permettant d'anticiper la procédure adaptée aux conditions réelles. Cette situation est due à une sous-évaluation du niveau de contamination de la piste.

4. RECOMMANDATIONS DE SECURITE

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

4.1.1. Emploi des performances et techniques d'atterrissage sur M2000

L'apprentissage des techniques et des performances liées au freinage sont peu détaillées dans le programme de formation des pilotes sur M2000. Il est fait par transmission orale selon l'expérience et les opportunités.

Le freinage du M2000 est quasiment systématiquement réalisé par les pilotes selon la même technique : freinage aérodynamique, poser de la roue avant vers 120 kt, freinage avec un Jx compris entre -0,2 g et -0,3 g, sans hypo-sustentation. Or les performances optimales ne requièrent pas systématiquement le freinage aérodynamique et le Jx varie selon les performances de l'avion, de la piste et l'emploi de l'hypo-sustentation. Ces techniques et performances sont insuffisamment pratiquées et connues.

La documentation opérationnelle de l'avion ne détaille pas les différentes techniques de freinage dégradé et les performances d'atterrissage, pour traduire en emploi opérationnel les consignes de l'UCB et du MCB.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'armée de l'Air et de l'Espace de mieux formaliser dans le programme de formation initiale sur M2000 l'instruction aux techniques d'atterrissage sur piste dégradée, développant une meilleure connaissance des performances optimales pour l'atterrissage (cas d'emploi du freinage aérodynamique, hypo-sustentation, parachute).

R1 – [A-2021-15-A] Destinataire : CEMAAE

à l'armée de l'Air et de l'Espace de réviser et harmoniser l'ensemble des documents décrivant les techniques et procédures d'atterrissage sur piste contaminée des M2000.

R2 – [A-2021-15-A] Destinataire : CEMAAE

4.1.2. Préparation à l'atterrissage

L'analyse de l'évènement montre une insuffisance de la conscience des conditions d'exécution de l'atterrissage, des performances attendues et des conséquences induites sur la conduite de l'atterrissage à mettre en œuvre. Malgré les conditions dégradées, un atterrissage normal est exécuté.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'armée de l'Air et de l'Espace d'inclure, pour l'aviation de chasse, dans la préparation avant l'atterrissage, à l'instar d'un briefing avant décollage, le choix de la technique d'atterrissage découlant de l'évaluation des performances, des conditions de piste et des risques associés.

R3 – [A-2021-15-A] Destinataire : CEMAAE

Une recommandation similaire a déjà été émise par le BEA-É en 2018 à l'occasion de l'enquête A-2016-007-I.

4.1.3. Emploi de l'hypo-sustentation

La procédure normale d'atterrissage prévue par l'UCB et le MCB évoque la technique de l'hypo-sustentation sans l'imposer. Cette technique n'est donc pas mécanisée par une utilisation systématique en condition réelle, car l'idée est répandue que cette technique engendre des contraintes sur les trains principaux, accélère l'usure des pneus et augmente par conséquent les actes de maintenance.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'armée de l'Air et de l'Espace d'organiser une campagne d'évaluation et d'objectivation des conséquences techniques de l'application systématique de l'hypo-sustentation sur les organes mécaniques et de statuer sur son emploi.

R4 – [A-2021-15-A] Destinataire : CEMAAE

4.1.4. Drainage de la piste

Le drainage de la piste de Nancy Ochey ne permet pas une évacuation suffisante des eaux de pluie et de résurgences s'accumulant en surface. Ce phénomène est connu depuis de nombreuses années. Les indices de services structurels et globaux sont mauvais.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'armée de l'Air et de l'Espace de faire réaliser des travaux structurels pour assurer un drainage efficace de l'eau s'accumulant sur la piste de Nancy Ochey pour obtenir un état de piste satisfaisant.

R5 – [A-2021-15-A] Destinataire : CEMAAE

Une recommandation similaire a déjà été émise par le BEA-É en 2018 à l'occasion de l'enquête A-2016-007-I.

4.1.5. Moyens de simulation

Les moyens de simulation employés au cours de la formation et de l'entraînement pour travailler les techniques d'atterrissage ne sont pas représentatifs des conditions que les équipages de M2000 peuvent rencontrer en réel.

De plus, le simulateur de vol de la base aérienne de Nancy a été démonté depuis plus de deux ans dans le cadre d'un programme de rénovation. Le remplaçant n'a toujours pas été livré. Pour pallier cette absence de simulateur, l'entraînement aux procédures d'urgence est réalisé avec un entraîneur tactique, rendant impossible une mécanisation et une expérience au plus près de la réalité.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'armée de l'Air et de l'Espace d'accélérer le remplacement des simulateurs de vol de M2000 par des outils représentatifs des conditions de vol.

R6 – [A-2021-15-A] Destinataire : CEMAAE

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

4.2.1. Référence à l'état de la piste dans la documentation

Dans l'UCB, selon le constructeur, la notion de « piste humide » doit être comprise comme « piste mouillée » (au sens de l'organisation de l'aviation civile internationale), et celle de « piste mouillée » comme « piste inondée », avec des conséquences sur l'évaluation des performances et sur les techniques de réalisation des atterrissages.

Par ailleurs, la classification des états de piste utilisée dans l'UCB fait référence à une échelle ancienne (cotation du *runway condition report* de 0 à 23). La notion de piste humide a disparu de la cotation.

Ces décalages entre les règles édictées par l'aviation civile reprises par la direction de la circulation aérienne militaire et le manuel de vol sont de nature à générer une confusion pour l'emploi opérationnel.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à Dassault Aviation, en liaison avec l'armée de l'Air et de l'Espace et la DGA, de réviser les UCB pour tenir compte des classifications en vigueur des états de piste et d'harmoniser l'ensemble des informations.

R7 – [A-2021-15-A] Destinataire : Dassault Aviation

ANNEXE
PERFORMANCES THEORIQUES A L'ATTERRISSAGE LORS DE L'EVENEMENT

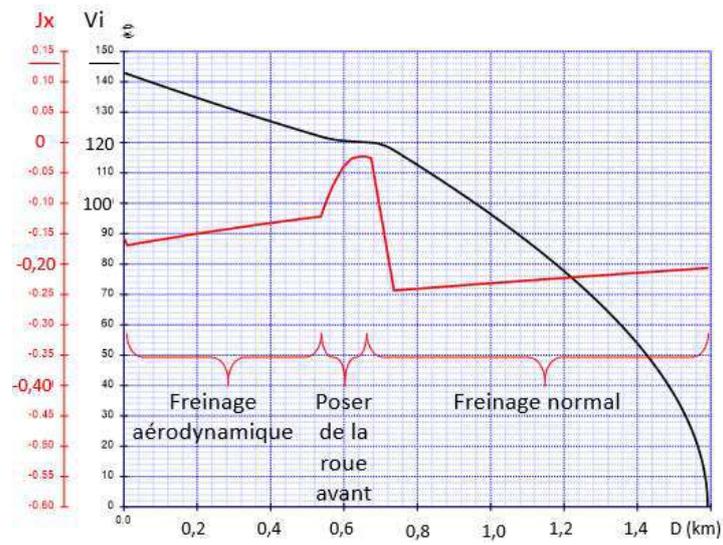


Figure 22 : performance théorique de freinage dans les conditions de l'évènement

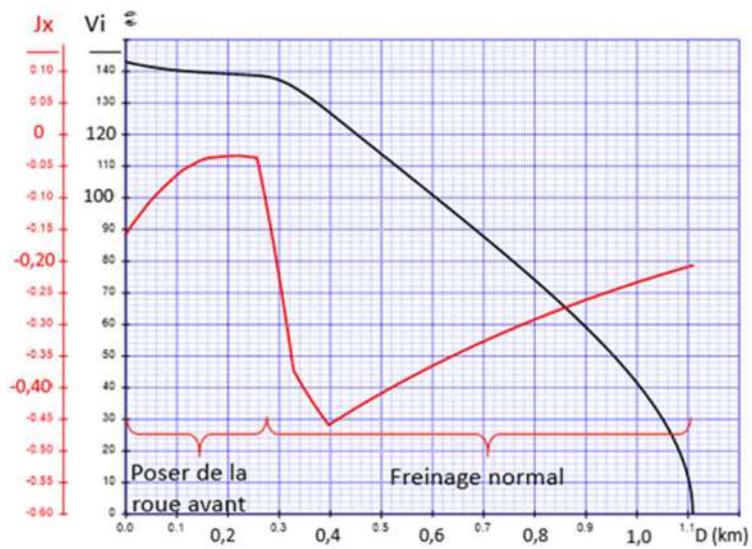


Figure 23 : freinage nominal théorique avec hypo-sustentation