

BUREAU ENQUÊTES ACCIDENTS POUR LA SÉCURITÉ DE L'AÉRONAUTIQUE D'ÉTAT

RAPPORT D'ENQUÊTE DE SÉCURITÉ



A-2024-19-A

Date de l'évènement	14 août 2024
Lieu	Colombey-les-Belles (Meurthe-et-Moselle)
Type d'appareil	Rafale B
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 (UTC+2).

CRÉDITS

	Internet	Page de garde
Figures 1 et 2	RESEDA et BEA-É	8 et 9
Figures 3 à 5	DGA/TA et BEA-É	13 et 14
Figure 6	Armée de l'Air et de l'Espace	17
Figures 7 et 8	Dassault Aviation et BEA-É	19
Figure 9	BEA-É	20
Figures 10 et 11	RESEDA et BEA-É	22
Figures 12 à 15	DGA TA et BEA-É	23 à 25
Figure 16	DGA EV	26
Figures 17 et 18	DGA TA	26 et 27
Figures 19 et 20	Dassault Aviation	28 et 29
Figures 21 et 22	IRBA	33 et 34
Figure 23	BEA-É	37
Figures 24 à 26	RESEDA et BEA-É	38 et 39
Figures 27 et 28	BEA-É	41 et 42
Figures 29 et 30	RESEDA et BEA-É	44 et 45
Figures 31 et 32	Armée de l'Air et de l'Espace et BEA-É	47

TABLE DES MATIÈRES

GLOSSAIRE	4
SYNOPSIS.....	5
1. RENSEIGNEMENTS DE BASE.....	7
1.1. Déroulement du vol.....	7
1.2. Dommages corporels.....	10
1.3. Dommages à l'aéronef	10
1.4. Autres dommages	10
1.5. Renseignements sur l'équipage.....	10
1.6. Renseignements sur l'aéronef	11
1.7. Conditions météorologiques	12
1.8. Aides à la navigation	12
1.9. Télécommunications	12
1.10. Renseignements sur l'aérodrome	12
1.11. Enregistreurs de bord.....	12
1.12. Constatations sur les aéronefs et sur la zone de l'accident.....	13
1.13. Renseignements médicaux.....	15
1.14. Incendie.....	15
1.15. Questions relatives à la survie des occupants et à l'organisation des secours	15
1.16. Essais et recherches	16
1.17. Renseignements sur les organismes.....	16
1.18. Renseignements complémentaires	17
2. ANALYSE.....	21
2.1. Expertises techniques.....	21
2.2. Séquence de l'évènement.....	35
2.3. Recherche des causes de l'évènement.....	38
3. CONCLUSION	51
3.1. Éléments établis utiles à la compréhension de l'évènement	51
3.2. Causes de l'évènement	51
4. RECOMMANDATIONS DE SÉCURITÉ	53
4.1. Mesures de prévention ayant trait directement à l'évènement	53
4.2. Mesures n'ayant pas trait directement à l'évènement	54

GLOSSAIRE

AoA	<i>Angle of attack</i> — angle d'incidence
ARCC	<i>Aeronautical Rescue Coordination Center</i> — centre de coordination et de sauvetage
BAAC	Brigade aérienne de l'aviation de chasse
BFM	<i>Basic Fighter Maneuvers</i>
CEMPN	Centre d'expertise médicale du personnel navigant
CTH	Collimateur tête haute
DGA EP	Direction générale de l'armement - Essais propulseurs
DGA EV	Direction générale de l'armement - Essais en vol
DGA TA	Direction générale de l'armement – Techniques aérospatiales
ESPAR	Enregistreur statique de paramètres
ETR	Escadron de transformation Rafale
EVN	Enregistreur vidéo numérique
ft	<i>Feet</i> — pieds (1 ft vaut 30,48 cm)
g	Unité de mesure de l'accélération (1 g vaut 9,81 m/s ²)
hPa	Hectopascal
kt	<i>Knots</i> – nœuds (1 kt vaut 1,852 km/h)
Nm	<i>Nautical miles</i> — milles nautique (1 Nm vaut 1 852 m)
RESEDA	Restitution des enregistreurs d'accidents
SATER	Sauvetage aéroterrestre
SIAé	Service industriel des ateliers de l'aéronautique

SYNOPSIS

Date et heure de l'évènement : 14 août 2024 à 12 h 23 (10 h 23 UTC¹)

Lieu de l'évènement : commune de Colombey-les-Belles (Meurthe-et-Moselle)

Organisme : armée de l'Air et de l'Espace

Commandement organique : brigade aérienne de l'aviation de chasse (BAAC)

Unité : escadron de transformation Rafale (ETR) 3/4 « Aquitaine »

Aéronefs : Rafale B n°350 immatriculé F-UHFQ et Rafale B n°356 immatriculé F-UHFW

Nature du vol : instruction

Nombre de personnes à bord : 2 dans le Rafale B n° 350, 1 dans le Rafale B n°356

Résumé de l'évènement

En retour d'un vol d'instruction au ravitaillement en vol au-dessus de l'Allemagne, une patrouille de deux Rafale biplaces, un leader² avec deux pilotes et un équipier avec un seul pilote à bord, effectue une percée aux instruments en formation avec le contrôle aérien de Nancy-Ochey. Rencontrant des conditions météorologiques défavorables en basse altitude et disposant d'une autonomie en carburant suffisante, la patrouille fait demi-tour et remonte vers les espaces aériens de Nancy où elle demande à l'approche une zone pour travailler en moyenne altitude. Après une phase d'entraînement au tir canon au profit de l'équipier, les deux appareils débutent une phase de combat rapproché à vue l'un contre l'autre (*Basic Fighter Maneuvers*). Les deux Rafale se croisent et commencent les exercices par une évolution dans le plan vertical. Lors de la phase de redescente de cette manœuvre vers un nouveau croisement, les deux appareils se percutent. L'équipier s'éjecte après la collision, le moniteur et le pilote stagiaire de l'autre avion décèdent dans l'accident. Les deux aéronefs sont détruits.

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 directeur d'enquête de sécurité adjoint du BEA-É ;
- un enquêteur technique du BEA-É ;
- un expert en facteurs organisationnels et humains ;
- un enquêteur de première information ;
- un pilote ayant une expertise sur Rafale ;
- un parachutiste d'essai ayant une expertise sur les éjections ;
- un expert contrôleur aérien ;
- un mécanicien avionique ayant une expertise sur Rafale ;
- un mécanicien vecteur ayant une expertise sur Rafale ;
- un médecin breveté supérieur de médecine aéronautique.

Autres experts consultés

- Bureau d'enquêtes et d'analyses (BEA) ;
- Direction générale de l'armement – Essais propulseurs (DGA EP) / Restitution des enregistreurs d'accidents (RESEDA) ;
- Direction générale de l'armement – Techniques aérospatiales (DGA TA) / Département investigation suite à accidents et incidents ;
- Direction générale de l'armement – Essais en vol (DGA EV) ;
- Dassault Aviation ;
- Institut de recherche biomédicale des armées (IRBA) ;
- Météo-France ;
- Safran Data Systems avec le concours d'Orion ;
- Thalès Services.

¹ *Coordinated universal time* — temps universel coordonné.

² Appareil qui mène la patrouille.

PAS DE TEXTE

1. RENSEIGNEMENTS DE BASE



EQUIPIER



LEADER

1.1. Déroulement du vol

1.1.1. Mission

Type de vol : circulation aérienne militaire aux instruments (CAM I) et tactique (CAM T)

Type de mission : vol d'instruction, 3^{ème} vol de transformation au ravitaillement en vol (TRV3)

Point de départ : base aérienne 113 de Saint-Dizier (LFSI)

Heure de décollage : 11 h 10

Point d'atterrissage prévu : base aérienne 113 de Saint-Dizier (LFSI)

1.1.2. Déroulement

1.1.2.1. Préparation du vol

Le 14 août 2024, les équipages de deux Rafale effectuent à l'heure prévue le briefing de leur vol sur la base de Saint-Dizier. L'objectif est de poursuivre la formation au ravitaillement en vol « TRV 3³ » d'un pilote stagiaire avec un moniteur en place arrière et de reconduire la qualification au ravitaillement en vol de l'équipier seul à bord dans l'autre Rafale. Le pilote stagiaire est en fin de formation à l'ETR, à ce stade il est en mesure de gérer un certain niveau de complexité et d'adaptation de la mission. Le moniteur est responsable de la mission et de la patrouille des deux appareils. Certains moyens de contrôle aérien régionaux étant hors service ce jour, l'exercice de ravitaillement ne peut se faire dans l'espace aérien national et la patrouille devra rejoindre un ravitailleur français au-dessus de l'Allemagne. Le briefing prévoit un ravitaillement en vol au profit du pilote stagiaire et de l'équipier. À l'issue, la patrouille doit d'abord effectuer une percée aux instruments en formation sur la base aérienne de Luxeuil, puis un retour en basse altitude vers la base de Saint-Dizier et de l'entraînement au tir canon au profit de l'équipier afin qu'il entretienne ses compétences pour les missions de police du ciel. Durant le briefing, compte tenu de la quantité carburant qui sera disponible pour les deux avions après la séance de ravitaillement, le moniteur demande au pilote stagiaire de préparer également un exercice d'attaque au sol (AASM⁴). Les points de sécurité de la mission sont abordés lors du briefing dont les cas non conformes⁵. Les équipages sont avertis d'une panne temporaire des moyens du contrôle aérien local rendant inutilisable la plateforme de Saint-Dizier. Ils font alors appel à la cellule de conduite du ravitaillement en vol pour rallonger le créneau de réservation de l'espace aérien du ravitailleur. Il est décidé par les équipages d'une heure maximum de mise en route après laquelle la mission devra être reprogrammée.

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

Ayant rejoint leurs appareils, les deux équipages s'installent à bord et préparent leurs avions. Se rapprochant bientôt de la limite horaire leur permettant de conserver le créneau de ravitaillement en vol, ils contactent le contrôle aérien local qui leur indique que les moyens de contrôle de la base sont toujours hors service mais que la panne est sur le point d'être réglée. Les deux Rafale mettent alors en route et commencent à rouler en espérant une remise en service du radar d'ici le décollage. Environ 10 minutes après être arrivés au point d'attente⁶, le contrôle aérien local indique la résolution du problème technique et l'ouverture de la plateforme de Saint-Dizier. Le moniteur décide alors d'exécuter la mission.

Après avoir décollé en patrouille à 11 h 10 puis rejoint le ravitailleur au-dessus de l'Allemagne, le pilote stagiaire et l'équipier effectuent leur ravitaillement. Durant cette phase, le ravitaillement doit être interrompu

³ 3^{ème} vol de formation au ravitaillement en vol.

⁴ Armement air-sol modulaire.

⁵ Scénarios alternatifs en cas de panne, de dégradation météorologique.

⁶ Arrivée de la patrouille au point d'attente à 10 h 58.

quelques minutes en raison de turbulences. Le chef de patrouille est informé des conditions météorologiques dégradées à Luxeuil et demande au pilote stagiaire d'effectuer en position de leader de formation une percée aux instruments avec le contrôle aérien de Nancy-Ochey à la place de celle prévue à Luxeuil. Il annule l'exercice planifié d'attaque au sol. À l'issue de cette phase, les deux appareils entament une navigation à basse altitude vers le sud pour revenir vers la base aérienne de Saint-Dizier. Une fois en basse altitude ils rencontrent des conditions météorologiques défavorables. Les deux commandants de bord se concertent et évaluent leur autonomie carburant. Le responsable de la patrouille, en accord avec l'équipier, décide alors de remonter dans les zones de Nancy afin d'y effectuer les passes de tir canon fictives au profit de l'équipier. Le contrôle aérien de Nancy leur octroie à cet effet une zone d'évolution en moyenne altitude (entre 6 500 ft et 18 500 ft) où les conditions météorologiques sont favorables.

L'équipier réalise ses passes de tir canon fictives sur l'avion du leader qui joue le rôle de plastron en réalisant des cercles et des lignes droites à altitude constante. À l'issue, les deux appareils se regroupent en formation vers 13 000 ft afin de débiter un entraînement d'opportunité au combat aérien rapproché à vue (BFM) afin notamment de consolider les acquis du pilote stagiaire. Leurs masses respectives leur permettent des évolutions aux capacités maximales des appareils. L'adaptation en vol du programme d'une mission est prévue et pratiquée régulièrement.

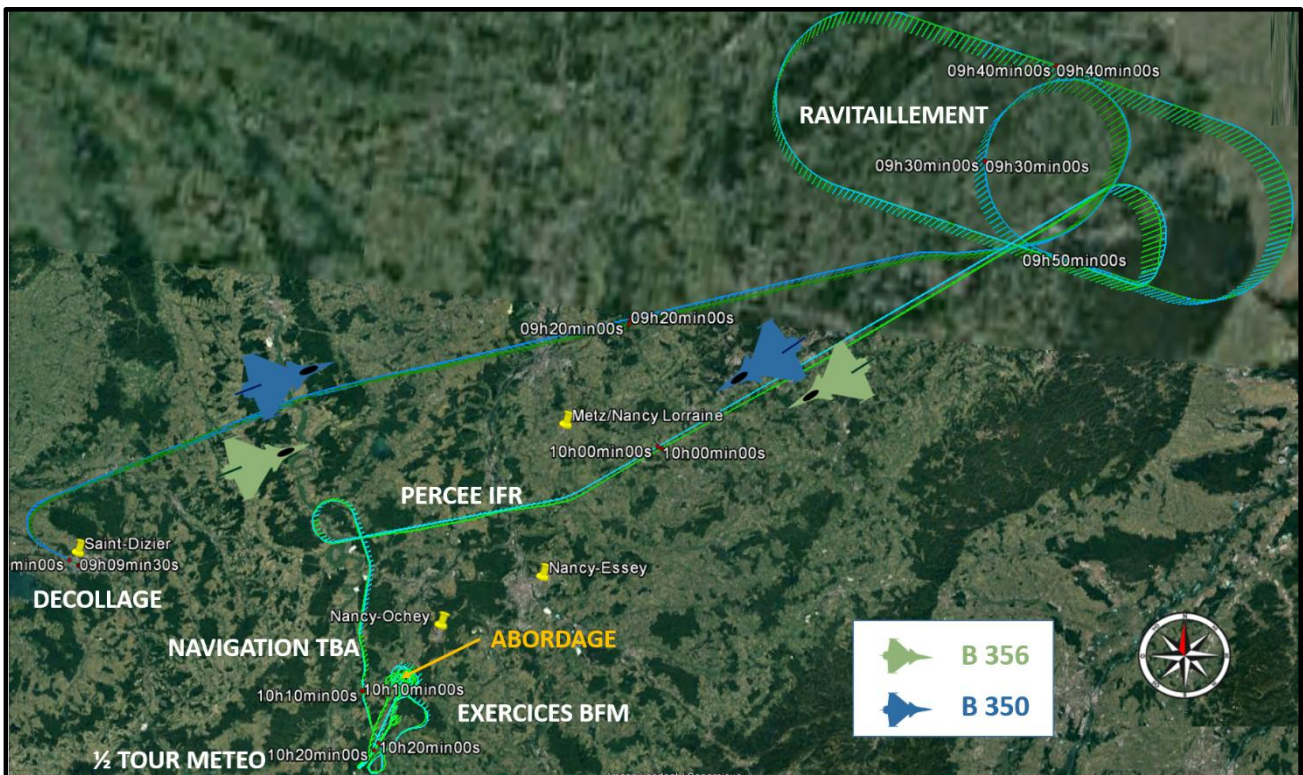


Figure 1 : reconstitution des trajectoires du vol des deux Rafale (heures en UTC)

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

La patrouille étant en formation, le Rafale B n° 356 de l'équipier à gauche et le Rafale B n°350 en leader à droite avec le pilote stagiaire aux commandes, la mise en place de type « butterfly set up »⁷ est exécutée et les deux Rafale ouvrent chacun leur trajectoire de 45° pour s'éloigner l'un de l'autre. À une distance d'environ 5 000 m, ils effectuent un virage pour se présenter en face à face à la même altitude ①. Les deux appareils se croisent ② et effectuent chacun une ressource sous fort facteur de charge pour se croiser à nouveau sur le dos en sommet d'une boucle ③. Lors de la descente en sortie de boucle, les deux appareils se retrouvent sur des trajectoires convergentes ④. Ils effectuent une manœuvre d'évitement d'urgence en voulant chacun laisser l'autre avion sur la gauche, mais elle ne permet toutefois pas d'éviter l'abordage qui se produit vers 10 000 ft. L'équipier prend conscience de la perte de contrôle de son appareil et de l'extinction de tous ses écrans, puis décide de s'éjecter. Il se retrouve sous son parachute qui finit accroché dans les arbres d'un bois

⁷ Figure de mise en place de l'exercice dont la forme des trajectoires fait penser à un papillon.

de la commune de Colombey-les-Belles. Il applique alors les procédures pour se séparer du parachute et rejoindre le sol où il appelle les secours avec son téléphone.
 Lors de l'abordage, le pilote stagiaire et le moniteur décèdent. Les débris des deux appareils partiellement en feu tombent dans les bois de la commune, quasiment à la verticale de la collision.

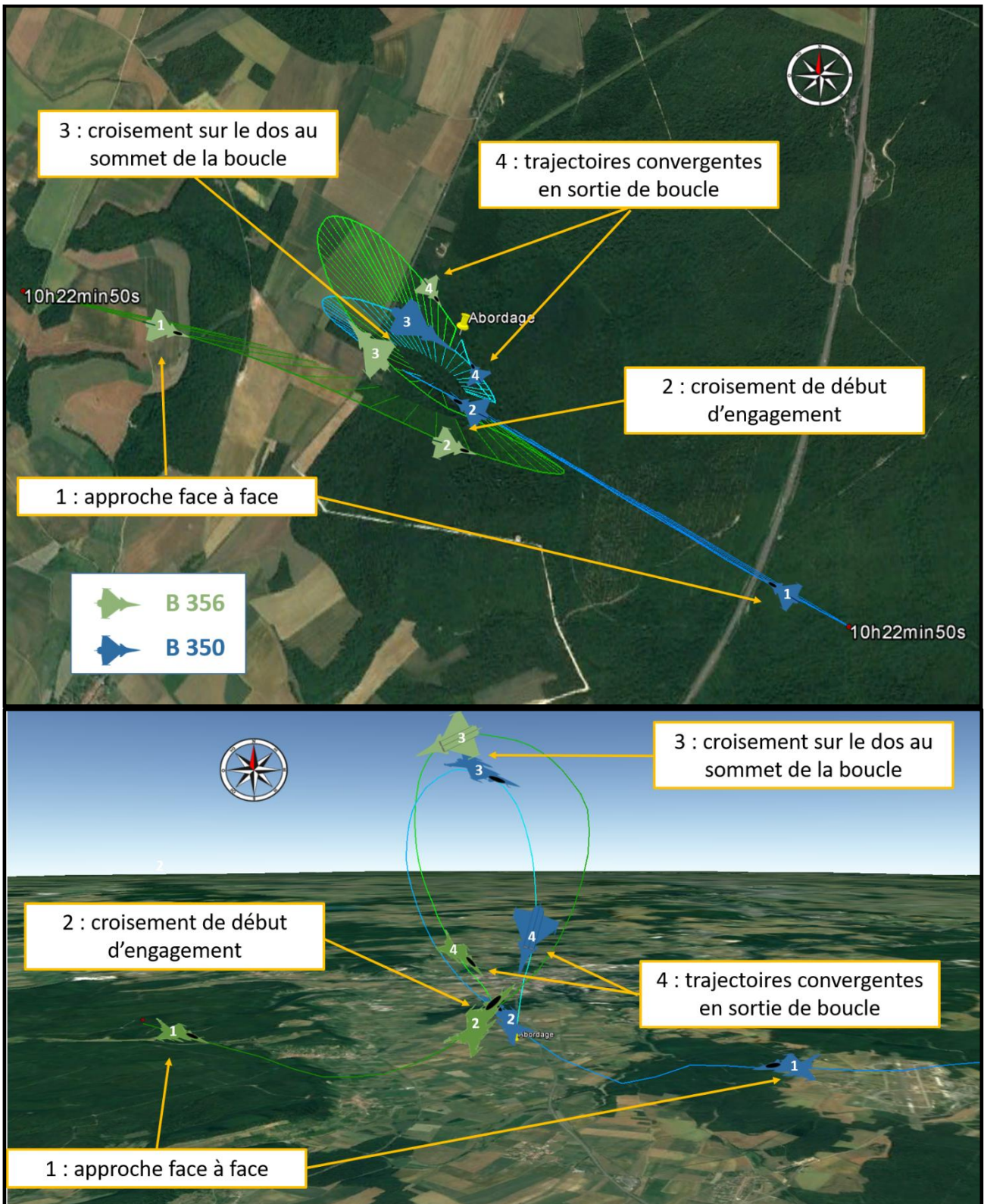


Figure 2 : représentations des trajectoires des deux Rafale dans la dernière minute (heures en UTC)

1.1.3. Localisation

- Lieu :
 - pays : France
 - département : Meurthe-et-Moselle (54)
 - commune : Colombey-les-Belles
 - coordonnées géographiques : N 48°30'06'' / E 005°53'51''
 - altitude du lieu de l'évènement : 10 000 ft
- Moment : matin
- Aéroport le plus proche au moment de l'évènement : Nancy-Ochey (LFSO) à 3 Nm

1.2. Dommages corporels

Le moniteur et le pilote stagiaire sont décédés.
L'équipier est légèrement blessé.

1.3. Dommages à l'aéronef

Les deux aéronefs sont détruits et ont partiellement brûlé.

1.4. Autres dommages

Les bois de la commune de Colombey-les-Belles où sont tombés les débris nécessitent une dépollution.

1.5. Renseignements sur l'équipage

1.5.1. Pilote stagiaire

- Âge : 29 ans
- Unité d'affectation : régiment de chasse 2/30 « Normandie-Niemen »
- Fonction dans l'unité : pilote stagiaire (à l'ETR)
- Formations :
 - qualification : moniteur PC-21 - pilote stagiaire Rafale
 - école de spécialisation : école de l'aviation de chasse de Cognac (2021)
- Heures de vol comme pilote :

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	sur tout type	dont Rafale	sur tout type	dont Rafale	sur tout type	dont Rafale
Total (h)	798	55	55	55	11	11

- Date du précédent vol : 13 août 2024

1.5.2. Moniteur/Chef de patrouille

- Âge : 36 ans
- Unité d'affectation : ETR 3/4 « Aquitaine »
- Fonction dans l'unité : moniteur, commandant d'escadrille
- Formations :
 - qualification : chef de patrouille
 - école de spécialisation : école de l'aviation de chasse de Tours (2014)
- Heures de vol comme pilote :

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	sur tout type	dont Rafale	sur tout type	dont Rafale	sur tout type	dont Rafale
Total (h)	2 518	1 775	129	129	11	11

- Date du précédent vol : 13 août 2024

1.5.3.Équipier

- Âge : 46 ans
- Unité d'affectation : centre air de planification et de conduite des opérations aériennes conventionnelles (CAPCO) Lyon
- Fonction dans l'unité : pilote « abonné »⁸ à l'ETR
- Formations :
 - qualification : chef de patrouille
 - école de spécialisation : école de l'aviation de chasse de Tours (2001)
- Heures de vol comme pilote :

	Total		Dans le semestre écoulé		Dans les 30 derniers jours	
	sur tout type	dont Rafale	sur tout type	dont Rafale	sur tout type	dont Rafale
Total (h)	3 610	1 527	12	12	0	0

- Date du précédent vol : 1^{er} juillet 2024

1.6. Renseignements sur l'aéronef

- Organisme : armée de l'Air et de l'Espace
- Commandement d'appartenance : commandement des forces stratégiques
- Aérodrome d'affectation : base aérienne 113 de Saint-Dizier
- Unité d'affectation : escadron de soutien technique et aéronautique 15/4 « Haute Marne » et mis pour emploi à l'escadron de transformation Rafale 3/4 « Aquitaine »
- Types d'aéronefs :

	Type-série	Numéro	Heures de vol totales	Heures de vol depuis dernier entretien
Cellule	Rafale B	350	1 693	8
Moteur droit	M88	WM000675	399	290
Moteur gauche	M88	WM000305	2 734	71

	Type-série	Numéro	Heures de vol totales	Heures de vol depuis dernier entretien
Cellule	Rafale B	356	1 667	7
Moteur droit	M88	WM000227	3 195	14
Moteur gauche	M88	WM000479	1 676	78

1.6.1.Maintenance et navigabilité

L'examen de la documentation technique témoigne d'un entretien conforme au programme de maintenance en vigueur. Les aéronefs respectent les règles de maintien de la navigabilité.

1.6.2.Performances

Les performances au moment de l'engagement de l'entraînement au combat rapproché à vue permettent le vol au facteur de charge maximum des avions.

1.6.3.Masse et centrage

Les masses au décollage sont similaires, aux environs de 16 500 kg. Les centrages sont dans les domaines de vol des aéronefs. (configuration A11⁹)

⁸ Personnel navigant affecté en dehors d'une unité navigante mais qui doit maintenir un socle d'activité minimale en vol. (Référence n°501590/ARM/EMAA/MGAA du 1er juillet 2020).

⁹ Configuration avec un bidon de carburant central et un missile d'exercice en bout d'aile droite pour le Rafale B n°350 et gauche pour le Rafale B n°356.

1.6.4. Carburant

- Type de carburant utilisé : F-34
- Quantités de carburant au décollage : 5 340 kg pour le Rafale B n°350 et 5 300 kg pour le Rafale B n°356
- Quantité de carburant au moment de l'évènement : 3 088 kg pour le Rafale B n°350 et 2560 kg pour le Rafale B n° 356

1.7. Conditions météorologiques

1.7.1. Prévisions

Les prévisions météorologiques font état d'une situation perturbée. De fréquentes averses et des passages nuageux sont prévus. La situation est dégradée en basse altitude avec le passage de fronts pluvieux entre Saint-Dizier et Nancy. Toutefois, les prévisions sont compatibles avec l'exécution du vol prévu.

1.7.2. Observations

Pendant la phase de navigation en basse altitude, la zone de Saint-Dizier est traversée par de fortes précipitations en direction du nord-est. Lors des exercices de BFM, la zone d'évolution est épargnée par les précipitations, mais elle est concernée par des couches nuageuses discontinues qui laissent des plages de ciel dégagé. L'atmosphère y est peu turbulente avec un vent du sud-ouest établi entre 20 et 30 kt sans cisaillement.

1.8. Aides à la navigation

Les deux Rafale sont équipés, entre autres, de deux centrales inertielles à gyrolasers intégrant une carte GPS qui transmettent les informations de localisation. Ils disposent également d'un radar avec un mode de suivi de terrain et une capacité de détection des masses nuageuses.

1.9. Télécommunications

Le Rafale B dispose d'un poste V/UHF, d'un poste UHF, de deux voies audio en liaison L16 et d'un système d'intercommunication de bord. Lors du vol de l'évènement, les deux avions communiquent sur une fréquence interne patrouille. Le responsable de la patrouille est en charge de la communication avec les services du contrôle aérien.

1.10. Renseignements sur l'aérodrome

Sans objet.

1.11. Enregistreurs de bord

Chaque Rafale est équipé des systèmes d'enregistrement de données suivants :

- un enregistreur de vidéo numérique (EVN), qui enregistre les conversations, les images filmées au travers du collimateur tête haute (CTH);
- un enregistreur statique de paramètres (ESPAR) ;
- une cassette A contenant les données de préparation et de restitution de la mission ;
- une cassette B contenant des données enregistrées pendant les vols pour la maintenance.

Les données des deux ESPAR sont exploitables. Les ESPAR sont conçus pour enregistrer les données par « paquet de données » toutes les 0,67 secondes. 0,26 seconde des dernières données mises en mémoire tampon avant enregistrement définitif dans les ESPAR a été récupérée. Il manque jusqu'à 0,41 seconde de données avant l'impact pour chaque avion.

Les cassettes A et B des deux aéronefs sont détruites et inexploitables.

Les données contenues dans l'EVN du Rafale B n°356 n'ont pas pu être récupérées. La récupération des données de l'EVN du Rafale B n°350 a nécessité une reconstruction des microcomposants endommagés.

1.12. Constatations sur les aéronefs et sur la zone de l'accident

1.12.1. Examen des aéronefs

Les deux aéronefs se sont disloqués lors de l'abordage et ont pris feu en vol.

La partie arrière du Rafale B n°350 du leader est retrouvée séparée du reste du cockpit. Elle a totalement brûlé. Le fuselage avant est incomplet au sol. La partie arrière droite de la cabine, avec le plan canard¹⁰ droit, ont été arrachés en vol et sont retrouvés près des débris de l'arceau de la verrière. Des débris de verrière sont situés à proximité, certains avec des morceaux de cordeau détonant¹¹ de fragilisation de verrière, non activés.

Le siège éjectable du moniteur est très détérioré et séparé de l'épave. Les sangles de son harnais sont libérées de la boucle de fermeture. Des débris du boîtier de tête du siège sont tombés séparément au sol. Il est constaté que la commande d'éjection n'a pas été mise en œuvre et qu'il n'y a pas eu de déclenchement de la chaîne pyrotechnique initiale d'éjection. Cependant, certains éléments pyrotechniques de la chaîne d'éjection se sont déclenchés lors de l'abordage. Le moniteur est retrouvé hors de son siège dans la forêt sans son parachute qui a dérivé d'environ 12 km au nord-est du site des épaves.

Le pilote stagiaire est resté sur son siège à l'avant de l'épave, son boîtier de tête est détruit et les suspentes de son parachute sont entremêlées dans les débris de l'avant du fuselage. Le reste de son parachute est localisé dans la forêt. Un calfeutrage en mousse, normalement situé dans le flanc des cockpits des Rafale, est imbriqué dans les cordages du haut de la coupole de ce parachute.

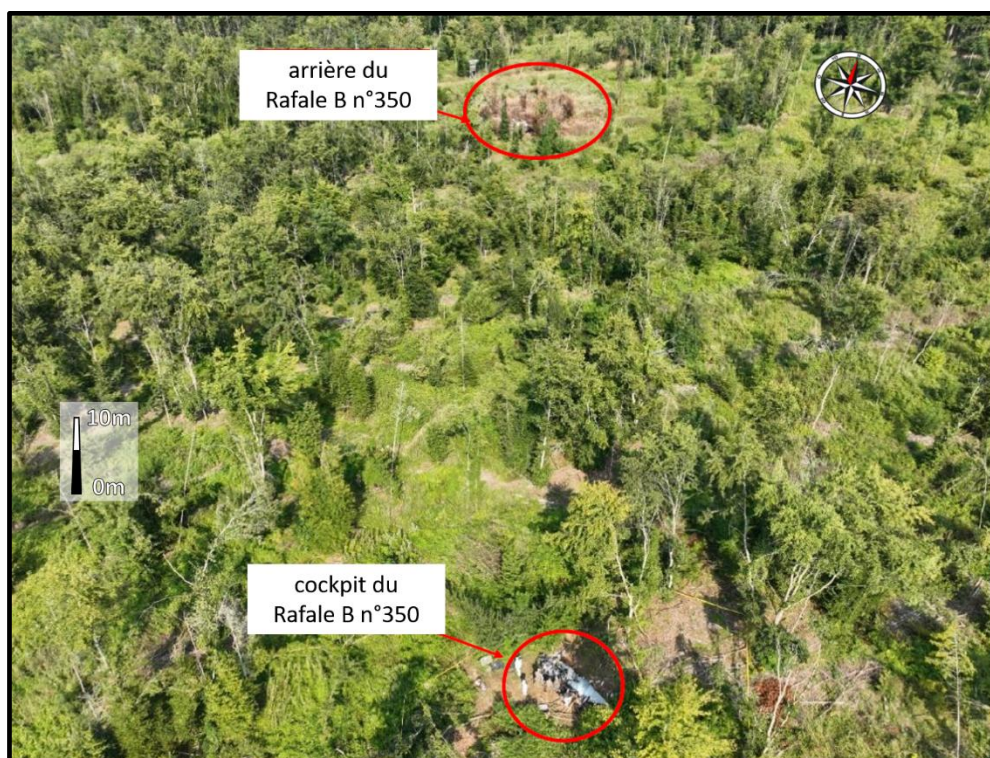


Figure 3 : épave du Rafale leader sur le site

L'épave du Rafale B n°356 de l'équipier présente d'importants dégâts localisés au niveau de la place arrière du cockpit. L'avant et l'arrière de l'appareil sont toutefois encore reliés par quelques câbles électriques. L'arrière de l'appareil a brûlé. La voilure droite est séparée du reste de l'épave et elle est tombée plus au nord dans le bois. Le siège éjectable de l'équipier est localisé dans le bois, son parachute est resté accroché aux arbres de la lisière nord du bois. Le siège éjectable de la place arrière, inoccupée, est retrouvé dans les bois avec les sangles de son harnais libérées de la boucle de fermeture.

¹⁰ Empennage monobloc situé en avant de l'aile.

¹¹ Ligne d'explosif permettant de fragiliser la verrière lors de l'éjection.

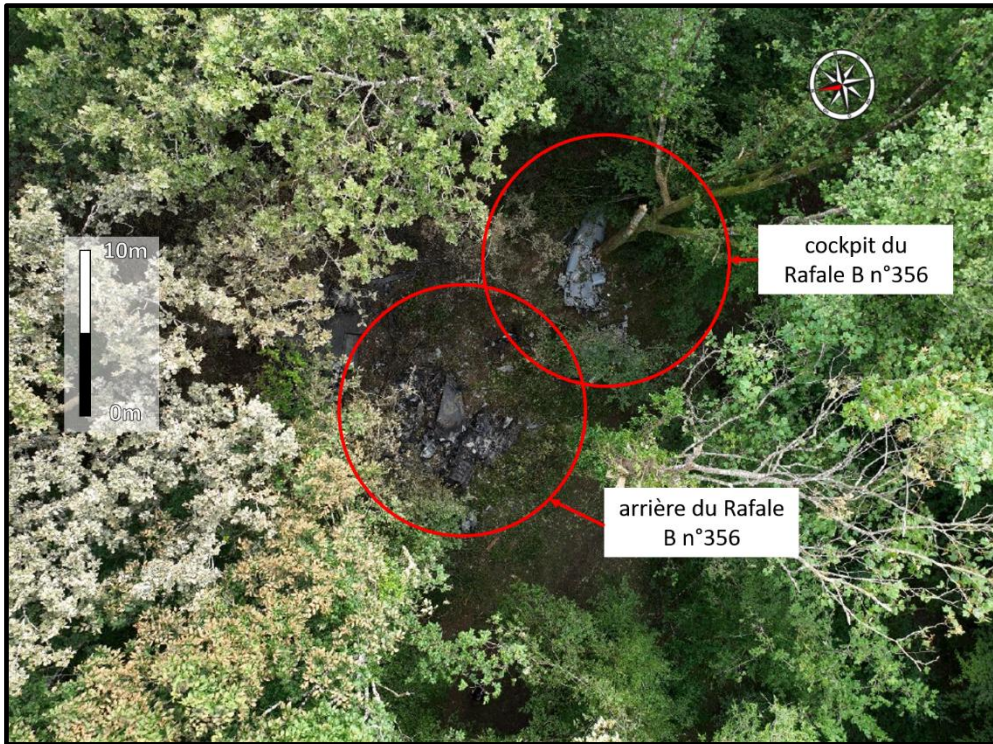


Figure 4 : épave du Rafale de l'équipier sur le site

Les parcelles des bois à la verticale de la collision sont jonchées d'une multitude de débris de petite ou moyenne taille appartenant aux deux appareils et qui n'ont pas brûlé. Les quatre moteurs sont retrouvés brûlés dans les épaves. Beaucoup de morceaux des deux appareils sont imbriqués les uns dans les autres, y compris dans les parties principales des épaves retrouvées au sol.

1.12.2. Cartographie du site de retombée des débris

Une cartographie de la position des éléments majeurs a été réalisée. Elle permet notamment de constater que les épaves des deux appareils (excepté le parachute du moniteur) sont tombées quasiment à la verticale de l'abordage et que le périmètre de dispersion des débris est relativement faible.

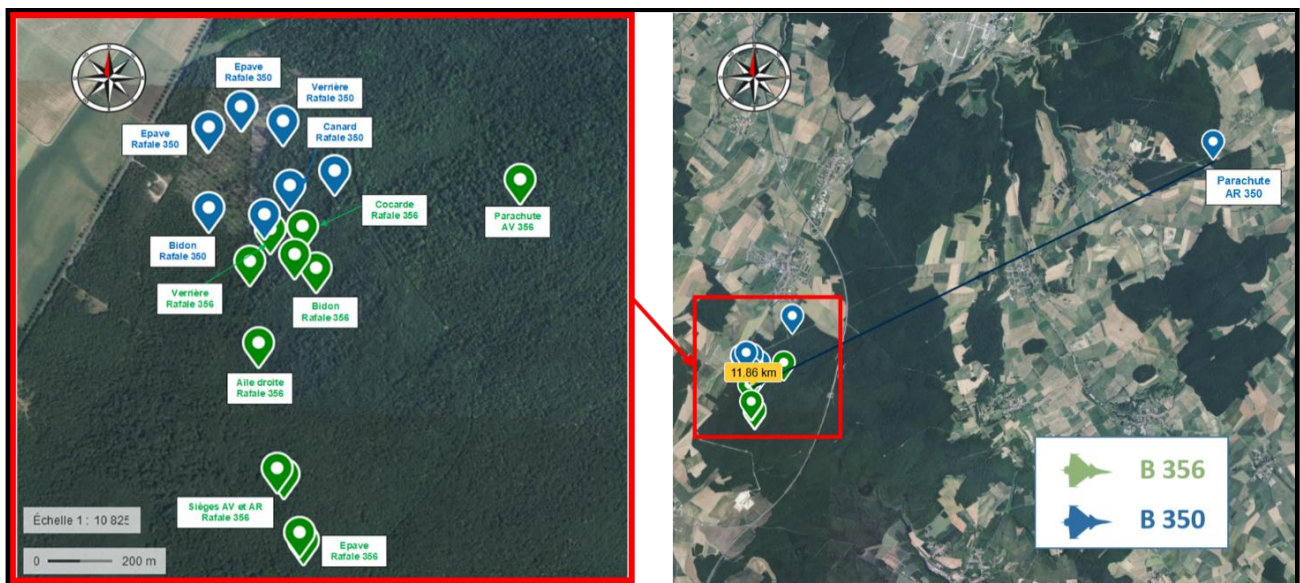


Figure 5 : cartographie du site de retombée des débris

1.13. Renseignements médicaux

1.13.1. Chef de patrouille/moniteur

- Dernier examen médical :
 - type : visite d’aptitude au centre d’expertise médicale du personnel navigant (CEMPN) du 12 août 2024
 - résultat : apte
- Examen médico-légal : autopsie
- Blessures : décès instantané consécutif à un polytraumatisme.

1.13.2. Pilote stagiaire

- Dernier examen médical :
 - type : visite au centre d’expertise médicale du personnel navigant du 22 mars 2024
 - résultat : apte
- Examen médico-légal : autopsie
- Blessures : décès instantané consécutif à un polytraumatisme.

1.13.3. Équipier

- Dernier examen médical :
 - type : visite au centre d’expertise médicale du personnel navigant du 19 septembre 2023
 - résultat : apte
- Examens biologiques : effectués et négatifs
- Blessures : multiples blessures légères

1.14. Incendie

Les parties arrière des deux avions avec leurs moteurs sont observées en feu après l’impact. L’incendie se maintient au sol sans se propager à la forêt. Des fumées sont constatées au sol malgré les conditions météorologiques pluvieuses au-dessus des bois jusqu’à l’intervention des pompiers.

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

1.15.1. Abandon de bord

La séquence d’éjection de l’équipier est initiée après l’abordage des deux Rafale.

La visière claire du casque du pilote est retrouvée en position baissée et elle est brisée sur toute sa partie droite. Le reste de la visière est criblé de projections de sang sur sa face intérieure. Lors du choc, la tête du pilote est venue percuter un élément de la cabine ce qui a brisé la visière claire mais le pilote est conscient après l’abordage et perçoit l’extinction de tous ses écrans ainsi que la sensation d’être en vrille. Il décide alors de s’éjecter. La séquence d’éjection se déroule nominalement et le pilote applique la procédure d’atterrissage dans les arbres, puis la libération de son harnais et de son paquetage pour atteindre le sol environ 6 mètres en dessous de lui après avoir pu attraper le tronc de l’arbre auquel il était suspendu. Il n’active pas sa balise de détresse mais utilise son téléphone portable pour contacter son escadron puis le centre national des opérations aériennes (CNOA). Suite à cela, il ne perçoit pas sur son téléphone la demande de géolocalisation émise par la Gendarmerie mais reçoit celle de l’ARCC¹² sans pouvoir la valider. Il est ensuite contacté par les pompiers et partage sa position GPS grâce à son téléphone portable. Il utilise sa balise de détresse en fonction radio pour tenter de contacter un Mirage 2000 venu observer la zone mais sans y parvenir, il tire également deux fusées de détresse.

Grâce à la transmission de sa position, les pompiers retrouvent le pilote éjecté et lui demandent de ne pas bouger. Ce dernier annonce qu’il va bien et qu’il peut marcher afin de ne pas rester sous la pluie en attendant l’arrivée des autres pompiers. Ils rejoignent alors en marchant les véhicules des pompiers stationnés sur un chemin. Le pilote éjecté bénéficie ensuite d’une prise en charge pré-hospitalière adaptée. Il est transporté vers le centre hospitalier le plus proche du lieu de l’accident, où subit des examens complémentaires permettant d’exclure des traumatismes physiques sévères. Toutefois, il sort de l’établissement trois heures

¹² *Aeronautical Rescue Coordination Center* — centre de coordination et de sauvetage aéronautique situé à Lyon.

après son accueil sans avoir bénéficié d'un premier soutien psychologique comme le prévoit la procédure dans les hôpitaux militaires.

Il n'y a pas eu de tentative d'éjection de l'équipage du Rafale leader.

1.15.2. Organisation des secours

À 12 h 26, la tour de contrôle de Nancy-Ochey informe l'ARCC de la perte simultanée de contact radio et radar avec les deux Rafale. Quelques minutes plus tard, le SDIS 54¹³ relaie à l'ARCC le témoignage du potentiel crash d'un Rafale, d'une éjection et de l'observation d'un parachute sur la commune de Colombey-les-Belles.

L'ARCC demande alors l'ouverture d'une opération SAR¹⁴ à la HADA¹⁵ et propose l'établissement d'un SATER C¹⁶ sur la zone probable d'éjection à la préfecture de la Meurthe-et-Moselle, puis l'établissement de phases SATER B¹⁷ aux préfectures des départements voisins des Vosges et de la Meuse.

En parallèle, l'ARCC engage l'hélicoptère de la section aérienne de la gendarmerie de Metz, deux hélicoptères de l'armée de l'Air et de l'Espace de Villacoublay et celui de la sécurité civile de Strasbourg. À 13 h 05, localisé par l'ARCC, le pilote éjecté indique un secteur potentiel de chute de l'autre aéronef avant d'être pris en charge par les secours terrestres et les informe n'avoir vu aucune éjection dans l'autre avion. À 15 h 15, les pompiers des Vosges retrouvent l'épave d'un premier Rafale dans le bois de Colombey-les-Belles. La phase de recherche de la deuxième épave est rendue difficile par de nombreuses informations contradictoires qui laissent un doute sur un éventuel autre site à identifier. L'analyse des données effectuée par l'ARCC et les nombreux débris retrouvés amènent l'équipe de l'ARCC à envisager le fait que les deux avions sont très certainement tombés à proximité l'un de l'autre. Un nouveau SATER C est alors proposé aux préfectures de la Meurthe-et-Moselle et des Vosges centré sur la forêt formée par le bois de Colombey-les-Belles, le Gros Bois et le bois de Selaincourt. À 18 h 49, la préfecture de la Meurthe-et-Moselle indique à l'ARCC qu'un corps a été retrouvé à Favières (54) à seulement 400 mètres du lieu de récupération du pilote éjecté.

Les recherches aériennes et terrestres sont alors poursuivies dans cette zone. À 21 h 31, le SDIS 88 indique à l'ARCC avoir retrouvé le fuselage du deuxième aéronef avec un corps à l'intérieur. Après confirmation des coordonnées, l'ARCC constate que les deux aéronefs ont chuté à 400 mètres l'un de l'autre. Les préfectures décident alors de la fin des différentes phases SATER. L'opération de recherche est suspendue pour la nuit et close le lendemain matin. La dernière épave a été découverte 8 h 58 min après l'alerte.

Aucun signal de détresse n'est parvenu à l'ARCC ni aux différents moyens de détection.

1.16. Essais et recherches

Les données des ESPAR sont analysées par RESEDA et Dassault Aviation.

La récupération des données contenues dans les EVN a été réalisée par Safran Data Systems, avec l'aide du BEA, de Thalès Services et le concours d'Orion.

L'analyse des débris des aéronefs est réalisée par DGA TA.

L'analyse des moteurs est confiée au service industriel de l'aéronautique (SIAé) de Bordeaux.

L'analyse des éléments de survie et d'éjection est réalisée par DGA EV.

L'analyse des carburants et fluides est effectuée par DGA EP.

L'autopsie des pilotes décédés est réalisée par l'IRCGN de Pontoise avec une analyse du médecin légiste du BEA.

1.17. Renseignements sur les organismes

L'escadron de transformation Rafale 3/4 « Aquitaine » est un escadron d'instruction dépendant organiquement de la brigade aérienne de l'aviation de chasse (BAAC) et basé à Saint-Dizier. Sa mission est de réaliser la qualification de type des pilotes de chasse sur Rafale. L'escadron dispose de Rafale B appartenant à la 4^{ème} escadre de chasse du commandement des forces aériennes stratégiques (CFAS). Les moniteurs proviennent de l'AAE ainsi que de la Marine nationale. La mission de l'escadron est de former les pilotes de l'armée de l'Air et de l'Espace, de la Marine nationale mais également des pilotes étrangers dans le cadre de

¹³ Service départemental d'incendie et de secours de Meurthe-et-Moselle.

¹⁴ *Search And Rescue* : opérations de recherche et de sauvetage.

¹⁵ Haute autorité de défense aérienne. Personne de permanence placée sous l'autorité du Premier ministre et chargée de la police du ciel et des opérations de recherche et sauvetage aériennes.

¹⁶ Plan de sauvetage aéroterrestre dans une zone définie.

¹⁷ Plan de sauvetage aéroterrestre en phase de montée en puissance (collecte d'indices).

la coopération internationale. Les moniteurs possèdent à minima la qualification de sous-chef de patrouille et sont issus d'unités opérationnelles.

1.18. Renseignements complémentaires

1.18.1. Combat aérien rapproché : *Basic Fighter Maneuvers* (BFM)

1.18.1.1. Principe

Les exercices de combat aérien rapproché à vue appelés *Basic Fighter Maneuvers* consistent à engager deux avions en combat à vue à courte distance. Les manœuvres et les tactiques employées durant ces exercices font partie du socle de base des compétences du pilote de chasse. Ce type d'exercice peut être mis en œuvre à l'initiative des équipages en vol.

La mise en place de type « *Butterfly Set Up* » est la plus utilisée dans les exercices de BFM. À partir d'une configuration de vol où les appareils sont en formation à la même altitude et la même vitesse, les avions s'écartent de 45° de cap chacun au commandement « *Turn away* ». Ils effectuent ensuite un virage coordonné les replaçant face à face au commandement « *Turn in* », avant de se croiser et d'être alors libres de leurs évolutions.

La bonne acquisition visuelle de chaque pilote doit être confirmée à la radio avant le croisement.

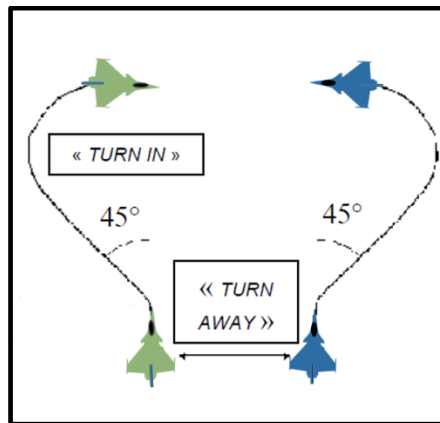


Figure 6 : description de la mise en place de type « *Butterfly Set-Up* »

Durant ces exercices, les pilotes recherchent une gestion optimale de leur énergie sous forme d'altitude ou de vitesse afin d'obtenir une fenêtre de tir sur l'adversaire.

1.18.1.2. Règles d'anti-abordage

L'application de procédures de sécurité permet de gérer les risques d'abordage entre les avions. Les exercices BFM sont réalisés dans un espace aérien ségrégué avec des conditions météorologiques favorables pour du combat à vue.

Pour gérer les risques d'abordage, le visuel entre les appareils doit être établi et les règles suivantes sont inscrites dans la documentation d'emploi¹⁸ :

- Une sphère de sécurité de 1 000 ft (300 m) de rayon est centrée sur chaque aéronef.
- Quand deux appareils sont en présentation frontale, l'évitement se fait préférentiellement par la droite (ou par la gauche si le croisement par la droite n'est pas possible) et au plus tard à une distance de 9 000 ft (2740 m), sans croiser la trajectoire de l'autre, celui qui a le nez le plus haut tente de passer au-dessus.

Les participants n'utilisent plus leur armement et manœuvrent afin de respecter la sphère de sécurité.

Les membres de l'OTAN utilisent des normes de séparation similaires dans les règles d'entraînement au combat aérien¹⁹.

En outre, des communications radio codifiées et prioritaires sont employées en cas de perte du visuel de l'autre avion ou pour partager des consignes concernant les trajectoires, notamment quand un conflit est détecté.

¹⁸ Répertoire d'emploi de l'aviation de chasse (REAC), chapitre 4.

¹⁹ ACO manual 75-2-1 « *fighting edge* » air-to-air training rules.

Le Rafale dispose d'une croix de dégagement²⁰. Elle n'est pas suffisamment précise pour gérer l'anti-abordage dans toutes les phases de combat aérien.

1.18.2. Principes généraux du fonctionnement des commandes de vol et du pilotage sur Rafale B

Le Rafale possède des commandes de vol électriques pilotées au travers de mini-manches. En Europe, le Rafale a été le précurseur de cette configuration dont une des particularités est de ne restituer aucun effort au pilote. Dans le cas du Rafale B, les actions d'un pilote sur les commandes n'engendrent aucune rétroaction sur le manche de l'autre pilote. La configuration du poste de pilotage comme « biplace en tandem » ne permet pas de percevoir visuellement ce que fait l'autre membre d'équipage sur les commandes.

Activation des commandes de vol du poste arrière

Le poste de pilotage arrière possède un sélecteur TWO/ISOL à deux positions :

- La position ISOL inhibe les commandes de vol du poste arrière. Cette position est indiquée dans le cockpit avant par l'allumage du voyant RR ISOL.
- La position TWO active les commandes de vol sur les deux postes de pilotage. Dans le cas où les deux pilotes agissent simultanément sur les commandes, les calculateurs prennent en compte les consignes des deux postes de pilotage et en font la sommation. Ce phénomène est appelé *Dual input*. La conception des commandes de vol entre les postes avant et arrière comporte des dispositifs de priorisation et des voyants d'indication.

Désignation du poste prioritaire

Le poste de pilotage avant possède un sélecteur SEL. PTY à deux positions, FT et RR, qui permet d'attribuer la priorité des actions sur les commandes, soit au poste avant (*front*), soit au poste arrière (*rear*).

Activation de la priorité

Pour activer cette priorité, le pilote du poste sélectionné doit engager la gâchette de priorité²¹ située sur son mini-manche. Cette activation inhibe alors les actions aux commandes de l'autre poste de pilotage.

Voyant d'indication de priorité

L'action sur la gâchette de priorité entraîne l'allumage d'un voyant PRIO, situé sous la casquette à gauche de chaque poste de pilotage, à l'avant et à l'arrière. L'enclenchement de la gâchette de priorité dans le poste non prioritaire n'a aucun effet.

Logique de sommation

Si la gâchette de priorité n'est pas actionnée dans le poste prioritaire, les ordres effectués sur les commandes par les deux membres d'équipage sont pris en compte par les calculateurs et sont sommés par le calculateur avant de donner les consignes de pilotage aux gouvernes. Par exemple, sans action sur la gâchette de priorité, une consigne simultanée de plein roulis à gauche d'un des pilotes et de plein roulis à droite de l'autre, aboutit à une demande de roulis nul vers les gouvernes.

Voyant d'indication de sommation

En cas de sommation, un voyant ambre Σ ²², situé sous la casquette à gauche de chaque poste de pilotage, s'allume à l'avant et à l'arrière afin de prévenir les deux membres d'équipage de cette situation. Pour provoquer l'allumage du voyant Σ , les commandes aux deux postes doivent être actionnées avec un débattement minimum de :

- 19,7 % de la butée élastique pour le mini-manche en profondeur ;
- 15 % de la butée mécanique pour le mini-manche en gauchissement ;
- 15,4 % de la butée mécanique pour les palonniers.

Les allumages des voyants PRIO et Σ ne sont pas enregistrés dans les données de vol du Rafale. Il est nécessaire d'analyser plusieurs paramètres enregistrés durant le vol pour retrouver les moments d'allumage des voyants PRIO ou Σ qui ne disposent pas d'un marquant dédié dans les données du Rafale.

²⁰ Symbole s'affichant dans le collimateur tête haute.

²¹ Dénommée « PM 13 » dans la documentation technique Rafale et située sur chaque mini-manche.

²² Sigma.

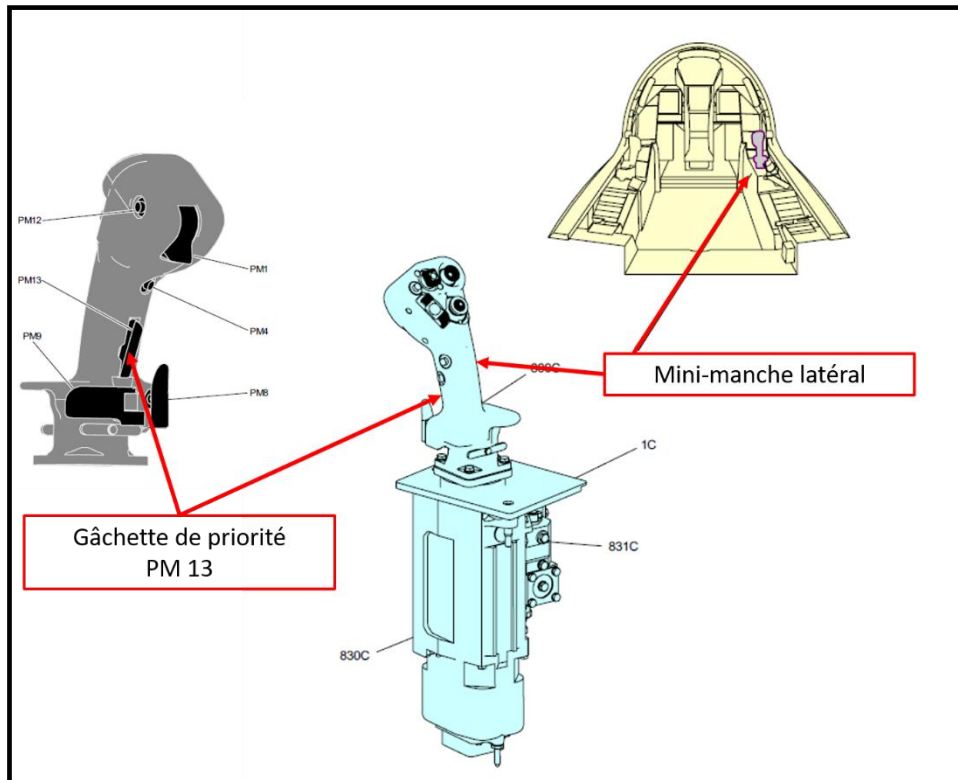


Figure 7 : mini-manche et gâchette de priorité « PM 13 »

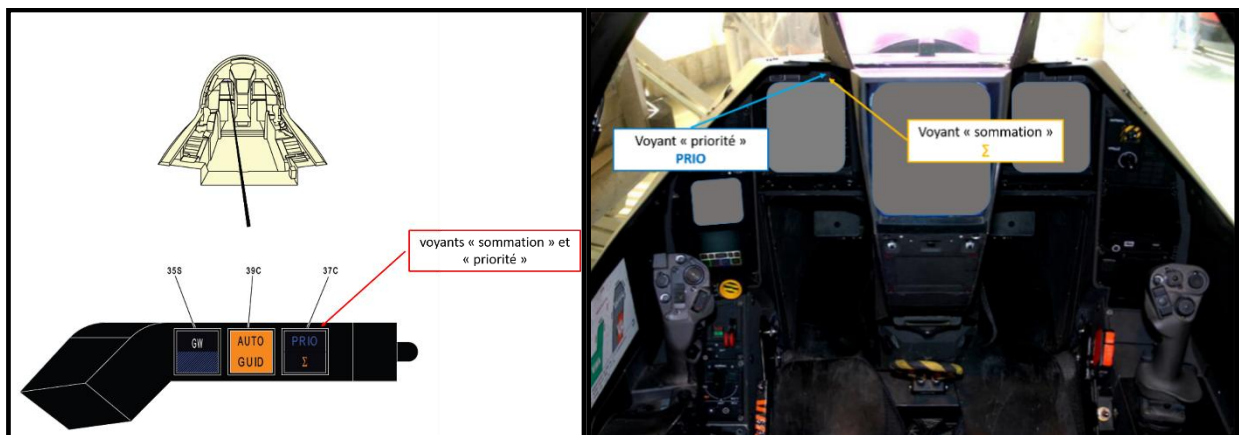


Figure 8 : localisation des voyants PRIO et Σ dans le cockpit

Le Rafale B est généralement armé en escadron opérationnel par un navigateur en place arrière et il est rarement prévu qu'il agisse sur les commandes. A contrario à l'ETR, les moniteurs en place arrière sont régulièrement amenés à agir sur les commandes au cours des vols d'instruction. Les Rafale B employés pour l'instruction sont les mêmes que ceux des escadrons opérationnels. Ils ont la même logique de commandes de vol.

1.18.3. Heure système à bord des Rafale

L'heure utilisée par le système de mission du Rafale et enregistrée dans les ESPAR peut provenir de trois sources :

- signal GPS ;
- liaison 16 ;
- heure rentrée manuellement par l'équipage.

La procédure de rentrée manuelle n'est pas utilisée à l'ETR. L'heure GPS est l'heure de référence dès que le signal GPS est capté.

2. ANALYSE

2.1. Expertises techniques

2.1.1. Analyse des données des enregistreurs de vol (ESPAR des deux Rafale et EVN du Rafale B n°350)

En cas de perte du signal GPS, une dérive de l'heure système peut se produire à bord des deux Rafale, notamment durant les évolutions en BFM. Elle est toutefois suffisamment faible (environ 30 millisecondes par 24 heures) pour ne pas devoir être prise en compte dans la datation des données enregistrées dans les ESPAR. La datation de l'enregistrement des données est donc considérée comme synchronisée entre les deux aéronefs.

L'ensemble des données du vol des deux Rafale a été récupéré dans les ESPAR et analysé jusqu'à 0,41 seconde (temps maximum manquant) avant l'impact, grâce à la récupération des mémoires tampon disponibles des ESPAR entre deux séquences d'enregistrement des données (toutes les 0,67 seconde).

Il existe un délai entre le moment où un paramètre est mesuré sur l'aéronef et celui où sa valeur est stockée dans la mémoire de l'enregistreur. Les paramètres de position de l'avion ont un temps de parcours d'environ 0,3 seconde plus long que les autres paramètres. Les données de position ont donc été recalées temporellement par Dassault Aviation sur le reste des autres données pour synchroniser l'ensemble des paramètres utiles à l'analyse.

L'EVN du Rafale B n°356 s'est révélé inexploitable suite au choc et à l'éjection.

Les données audio et vidéo de l'EVN du Rafale B n°350 ont pu être récupérées quasiment intégralement jusqu'à la fin des enregistrements.

2.1.1.1. Recherche de défaillances en vol des aéronefs

Aucune panne n'est relevée sur les aéronefs durant le vol. Les commandes de vol sont fonctionnelles ainsi que les moteurs qui délivrent une puissance cohérente avec les consignes de pilotage. Les enregistrements ne font remonter aucune défaillance des systèmes des avions.

Dans l'hypothèse d'une défaillance majeure intervenant dans le laps de temps entre la fin de l'enregistrement et l'abordage, celle-ci n'aurait pas eu d'influence car les deux appareils étaient déjà engagés à ce moment-là dans des trajectoires aboutissant à l'abordage.

L'analyse des données de vol n'indique aucune défaillance des aéronefs pouvant concourir à l'accident.

2.1.1.2. Analyse des comportements des avions lors de l'engagement BFM

La reconstitution des trajectoires indique que lors de l'engagement de l'exercice, le croisement en face-à-face initial s'effectue à 115 mètres de distance latérale avec un positionnement « droite-droite »²³. Chaque avion part en ressource pour effectuer une demi-boucle vers le haut. Au sommet, les deux appareils se croisent sur le dos avec un espacement latéral de 117 mètres (positionnement « droite-droite »), l'appareil de l'équipier se retrouvant en avance, légèrement plus haut, avec une vitesse plus élevée. Lors de ce croisement, l'équipier effectue une manœuvre de roulis à gauche et engage sa descente en changeant de plan d'évolution, alors que le leader poursuit sa descente dans le plan vertical initial de la boucle. Pendant sa descente, ce dernier applique du roulis à droite en direction de l'autre avion. Les deux appareils se retrouvent alors en ressource avec des trajectoires menant vers une zone de croisement incertain.

Dans les 3,5 dernières secondes avant la fin des enregistrements alors que les aéronefs sont toujours sur des trajectoires descendantes, chacun légèrement incliné à droite, et qu'ils sont espacés d'environ 500 m, les équipages ont des actions significatives aux commandes.

Alors que l'équipier termine sa boucle, les pilotes du B n°350 agissent franchement aux commandes : le moniteur intervient avec une action à gauche alors que le stagiaire poursuit son action à droite. L'équipier relâche sa cadence en tangage puis effectue une brève mise en roulis à gauche avant de s'incliner franchement à droite.

Dans la dernière seconde, les deux avions sont en roulis à droite avec des ordres à cabrer. Au moment de l'abordage, les deux Rafale ont une attitude « nez vers le bas » et sont inclinés en roulis à droite.

²³ Chaque aéronef vire à droite et laisse l'autre avion sur sa gauche.

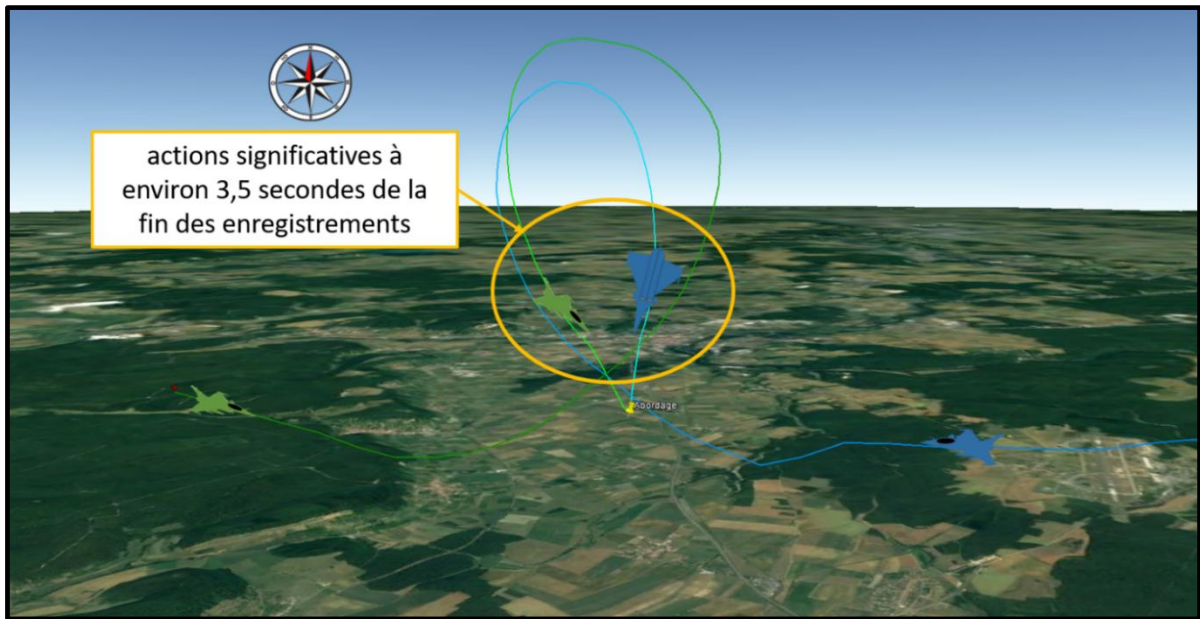


Figure 10 : positionnement au moment de la conflictualité des trajectoires

Bien qu'en phase de descente, les deux appareils restent constamment à grandes incidences²⁴ du fait des fortes actions à cabrer des pilotes. Ils conservent donc de faibles vitesses qui les rendent moins manœuvrants. En effet, malgré le dépassement de butée élastique à cabrer des pilotes sur les mini-manches, les appareils n'enregistrent qu'un très faible facteur de charge (entre 1 et 2 g). Dans cette configuration, les ordres pris en compte par les commandes de vol ont donc un effet relativement faible et lent sur les trajectoires des aéronefs.

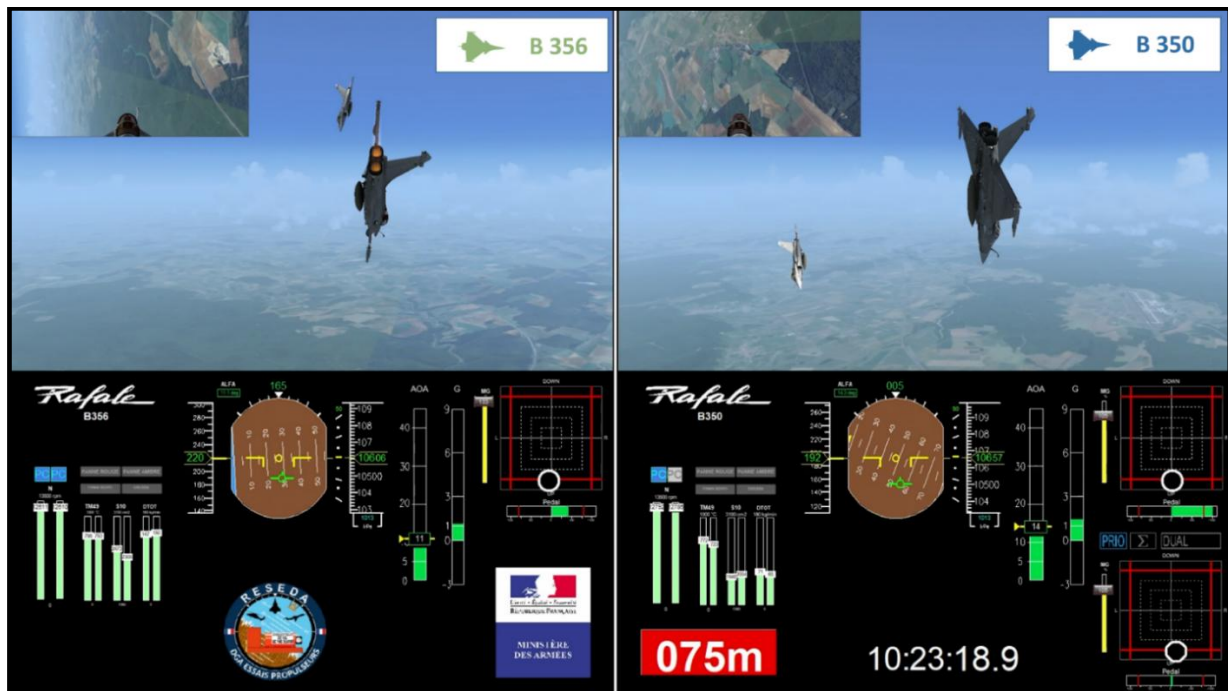


Figure 11 : manœuvres d'évitement à la fin des enregistrements (heures en UTC)

En fin de boucle, les trajectoires s'orientent vers une zone de croisement incertain. Dans les 3,5 dernières secondes avant la fin des enregistrements, des actions significatives des trois pilotes sont relevées dans les données de vol. Les appareils évoluent alors avec des vitesses « faibles » et à grandes incidences ce qui les rend moins manœuvrants. Les trajectoires deviennent convergentes.

²⁴ Angle entre la vitesse d'écoulement de l'air en amont de l'aile et sa corde (droite reliant le point avant et le point arrière du profil de l'aile).

2.1.2. Recherche des conditions au moment de l'abordage

Les dernières données de vol enregistrées permettent de connaître les attitudes et caps des deux aéronefs. L'angle d'incidence (AoA) est aussi relevé et permet d'extrapoler les trajectoires des deux aéronefs après l'arrêt des enregistrements. Les derniers caps, attitudes, vitesses, AoA et altitudes enregistrés des appareils sont les suivants :

Rafale B n°356	Rafale B n°350
Cap : 166°	Cap : 010°
AoA : 18°	AoA : 21°
Roulis : 93° à droite	Roulis : 66° à droite
Tangage : -27° (par rapport à l'horizontale)	Tangage : -49° (par rapport à l'horizontale)
IAS ²⁵ : 205 kt	IAS : 193 Kt
Altitude : 10 580 ft	Altitude : 10 740 ft

Tableau 1 : dernières données de vol enregistrées des deux Rafale

Les dernières actions enregistrées aux commandes montrent que les deux appareils ont à ce moment des consignes de roulis nulles et que seules des actions en profondeur à plein cabrer sont ordonnées sur les deux appareils. Il est donc possible de considérer que, dans les derniers instants non enregistrés du vol (il manque jusqu'à 0.41 seconde entre le dernier paquet de données enregistré et l'abordage), le roulis des appareils n'évolue pas par rapport aux dernières attitudes connues.

L'étude des débris des aéronefs permet de localiser sur chaque Rafale la zone de choc principale. Ceci permet de pallier l'absence de données sur les derniers mètres parcourus par les deux aéronefs avant l'impact et confirme la validité de l'extrapolation des trajectoires finales. Une analyse spectrométrique de la peinture a été effectuée permettant de relier les éléments à chaque appareil grâce aux vieillissements différents des peintures des deux avions, notamment pour les deux bidons de carburant ventraux. Leurs déformations, avant d'être séparés en vol des aéronefs lors de l'abordage, localise les points de choc²⁶. L'analyse de la partie avant du Rafale B n°356 montre que l'essentiel des dégâts observés sur cette partie provient de l'impact au sol, les dégâts en vol se localisant principalement au centre de l'avion. L'analyse des dégâts sur le Rafale B n°350 localise le point de choc proche du siège arrière.



Figure 12 : dégâts constatés sur les bidons de carburant ventraux

La mise en corrélation des attitudes des avions permet de reconstituer l'abordage plus précisément.

²⁵ *Indicated Air-Speed* : vitesse « air » indiquée de l'appareil.

²⁶ Le point de choc est la localisation du premier point de contact avec l'autre appareil.

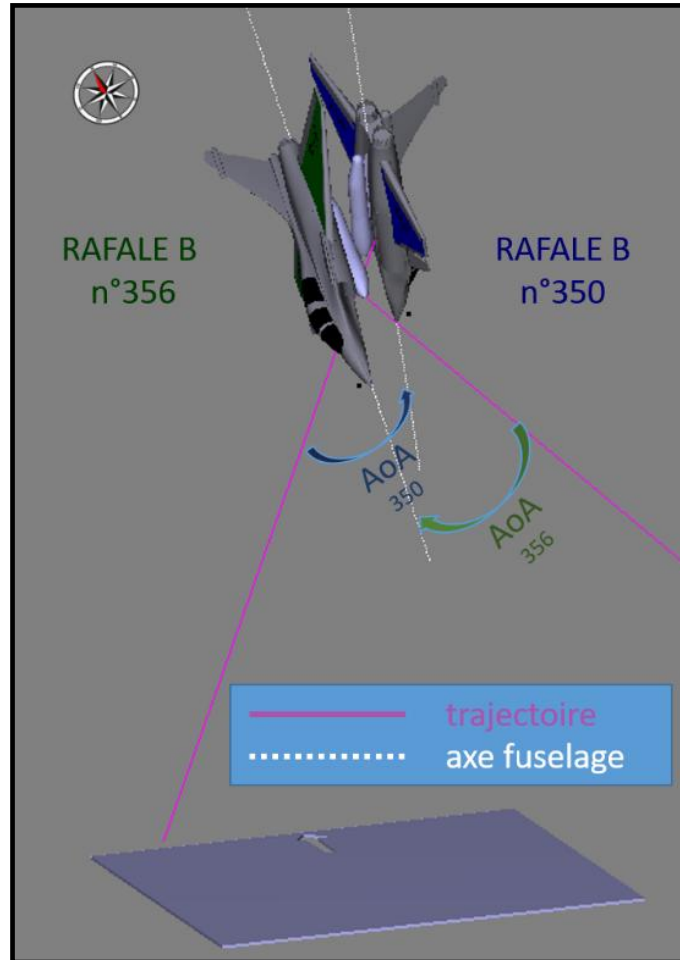


Figure 13 : positionnement 3D des Rafale au moment de l'abordage

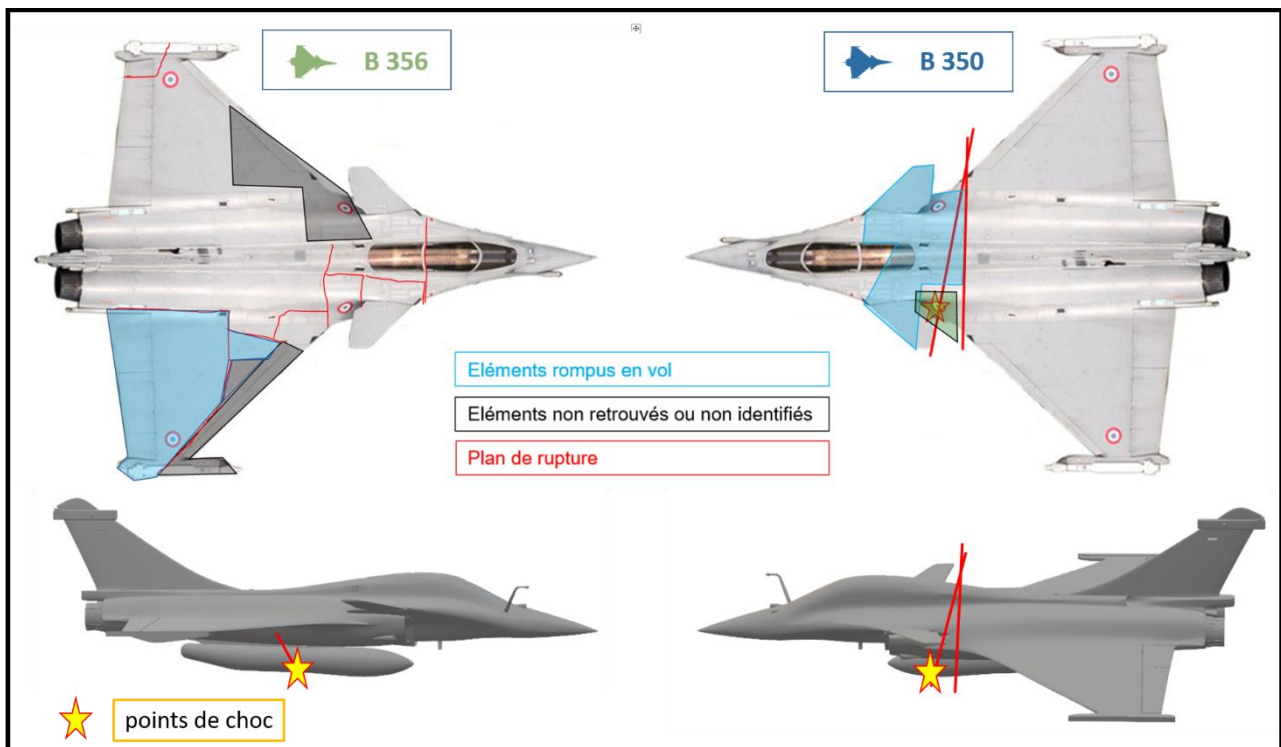


Figure 14 : reconstitution des endommagements sur les appareils

Les données recueillies dans les ESPAR comportent des imprécisions (précision GPS, âge des données de localisation (+0.3 seconde par rapport aux autres données), etc.). Toutefois, la dernière vitesse de

rapprochement enregistrée entre les deux avions, assez stable (et en légère augmentation) dans les deux dernières secondes, est de 163 kt soit 302 km/h. La distance entre les deux avions lors du dernier point d'enregistrement est donc au maximum de 35 mètres (en utilisant le temps maximum théoriquement manquant de 0,41 seconde et la dernière vitesse de rapprochement). Grâce aux points de choc déterminés lors des expertises, un travail de synchronisation des trajectoires a été effectué par DGA EP/RESEDA avec une extrapolation linéaire sur les derniers instants manquants ; la distance ainsi trouvée est alors ramenée à 11,5 mètres. Le recalage des données effectué par Dassault Aviation permet une reconstitution des trajectoires estimées. La distance alors calculée entre les appareils à la fin des enregistrements est de 7 mètres. La prolongation de ces trajectoires montre que les deux avions s'abordent ventre à ventre. Les deux postes de pilotage du Rafale B n°350 sont percutés par des éléments (notamment moteur droit et aile droite) du Rafale B n°356. Ce choc entraîne le décès des deux membres d'équipage du Rafale B n° 350. Le cockpit du Rafale B n°356 n'est pas percuté par des éléments de l'autre Rafale.

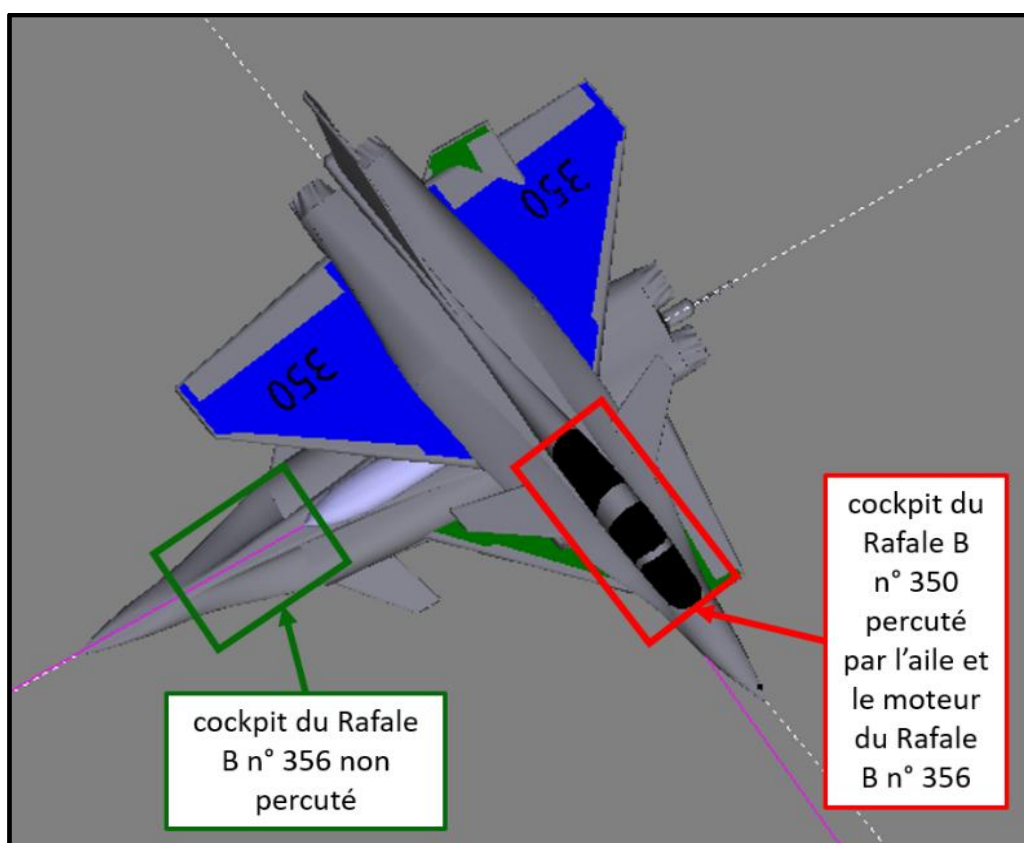


Figure 15 : évaluation des éléments (moteur et aile du Rafale B n° 356) percutant le cockpit du rafale B n°350

Les deux avions se percutent « ventre à ventre », les points de choc étant situés à proximité de la place arrière pour le leader et au centre de l'avion pour l'équipier.

2.1.3. Expertise de l'éjection de l'équipier

L'analyse des endommagements sur le casque de l'équipier et une reconstitution avec un pilote de taille similaire permettent de comprendre qu'avant l'éjection la tête du pilote est venue violemment heurter le haut du cadre entourant le CTH, provoquant ainsi le bris de sa visière claire et des blessures au visage. Grâce au casque, le pilote reste conscient et perçoit l'extinction de ses cadrans et la perte de contrôle de son appareil avant de décider de s'éjecter. De mémoire, il pense voler au moment de l'abordage avec la visière teintée également baissée. Toutefois, cette dernière est retrouvée intacte dans le casque en position rentrée, ce qui laisse une incertitude sur le fait qu'elle ait pu se rentrer sous le choc ou qu'elle était déjà rentrée.

Les éléments recueillis concernant l'éjection de l'équipier montrent que la séquence est nominale et dans le domaine d'utilisation du siège éjectable MK 16F. Le pilote actionne la poignée aux environs de 6 000 ft soit 4 000 ft en dessous de l'altitude de l'abordage, ce qui représente un délai de 10 secondes maximum entre l'abordage et le début de l'éjection.



Figure 16 : reconstitution du choc sur le casque de l'équipier

Le casque protège l'équipier d'une perte de connaissance. L'analyse de son éjection permet d'estimer qu'elle a lieu aux environs de 6 000 ft et au maximum dans les 10 secondes après l'abordage.

2.1.4. Expertise des sièges des deux Rafale

Les deux sièges des places arrière des Rafale ont été retrouvés séparés des épaves. La rupture de tous leurs tubes de guidage d'éjection, ainsi que leur localisation au sol, montrent qu'ils ont été arrachés en vol lors de l'abordage. Ils présentent tous les deux des similitudes sur leurs harnais et sur les boucles de fermeture qui ont toutes les deux libéré les attaches des harnais.

L'analyse interne des boucles de fermeture ne montre aucune rupture ou endommagement. Ces boucles ne peuvent être ouvertes normalement que par une action volontaire, en appuyant dans un premier temps fortement sur des clenches de verrouillage de la rotation de la boucle, puis en mettant cette boucle en rotation, ce qui libère alors les attaches de harnais. Les deux boucles sont retrouvées en positions fermées.

Or, sur chaque siège arrière, les attaches métalliques des harnais gauches ont subi un vrillage et les harnais se sont libérés. Les attaches métalliques des sangles droites paraissent intactes.

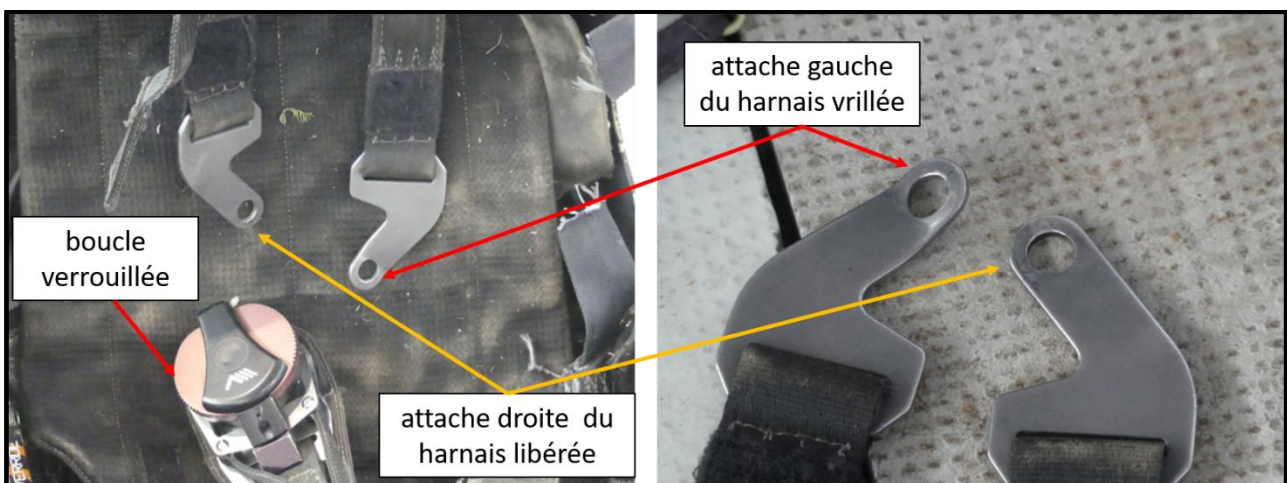


Figure 17 : harnais et boucle du siège arrière de l'équipier

DGA TA a réalisé des expertises en soumettant un harnais à des efforts similaires à ceux ayant produit la déformation des attaches métalliques. Cette expertise montre que la déformation de l'attache métallique entraîne un léger écartement des plateaux de la boucle. Cet écartement, associé aux conditions réelles du choc dynamique subit par la boucle, est susceptible de libérer les harnais.

Lors de la collision, le siège arrière du leader est non seulement arraché du plancher de l'aéronef avec un sectionnement de la base de ses tubes de guidage d'éjection, mais il présente également une très forte

déformation latérale entraînant la libération mécanique de la poignée de séparation manuelle (MANUAL OVERRIDE) de son loquet, celui-ci étant normalement commandé par la pyrotechnie d'éjection. Cette poignée est ensuite mécaniquement tordue et relevée dans le choc (pas d'activation de la pyrotechnie de libération du loquet), ce qui explique le déclenchement de la pyrotechnie de libération du parachute situé dans le boîtier de tête. Le parachute et le harnais sont ensuite emportés dans le vent, entraînant la séparation du moniteur de son siège et de son harnais. Le parachute avec les sangles du harnais sont retrouvés à 12 km du lieu de l'abordage en vol. La poignée d'éjection n'a pas été tirée et la chaîne pyrotechnique d'initiation de l'éjection n'a pas été déclenchée.

Le siège de la place avant du leader est retrouvé dans l'avant du cockpit. Sa poignée d'éjection n'a pas été activée et la chaîne pyrotechnique d'éjection n'a pas été initiée.

Le siège avant de l'équipier est retrouvé dans la forêt, détruit par la chute au sol. La chaîne pyrotechnique et les éléments du siège montrent une séquence d'éjection conforme.

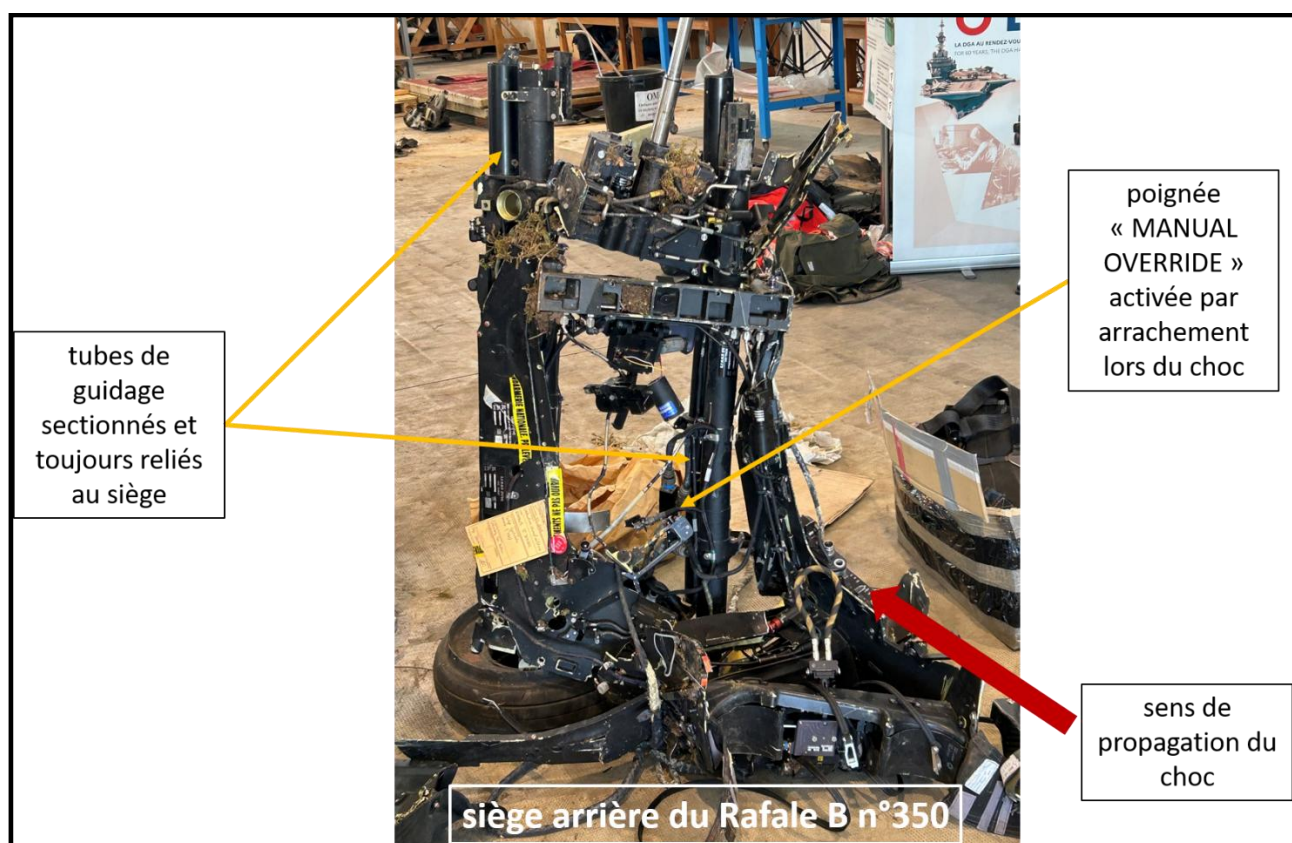


Figure 18 : siège arrière du Rafale leader

Lors de l'abordage, le siège arrière du Rafale leader est arraché et les sangles de son harnais se libèrent sous le choc, désolidarisant le moniteur de son siège et de son parachute. Il n'y a pas de tentative d'éjection de l'équipage du Rafale leader.

2.1.5. Analyse des mises en œuvre des signaux de détresse

En cas d'éjection, le transpondeur du Rafale émet un signal de détresse automatique. Aucun signal de détresse n'est émis ni depuis le Rafale B n°350 ni depuis le Rafale B n°356. Les connexions vers les deux transpondeurs sont rompues durant l'abordage et il n'y a pas de tentative d'éjection pour le Rafale leader. L'éjection de l'équipier a lieu après le choc et la dislocation des connexions.

Du fait des destructions subies par les avions lors de l'abordage, aucun signal de détresse ne peut être émis par les systèmes embarqués.

2.1.6. Analyse des actions simultanées aux commandes

2.1.6.1. Test des commandes au sol à bord du Rafale B n°350 avant le décollage

Comme le prévoient les procédures, l'équipage du Rafale B n°350 effectue avant de rouler les tests au sol concernant la vérification du fonctionnement de la gâchette de priorité et l'allumage des voyants PRIO et Σ . Les données exploitées montrent que ce test est conforme. Les données montrent également que le sélecteur d'activation des commandes des postes de pilotage est sur la position TWO et que le sélecteur de priorité SEL.PTY est sur la position RR.

Les deux postes de pilotage ont leurs commandes activées pendant le vol et la priorité est sélectionnée sur le poste de pilotage arrière. Les voyants PRIO et Σ fonctionnent normalement.

2.1.6.2. Enclenchement de la gâchette de priorité par le moniteur au cours de la mission

Après le demi-tour réalisé pour des raisons météorologiques, le moniteur reprend seul les commandes pendant environ 11 minutes. La gâchette de priorité est alors très régulièrement enclenchée avec la prise en main du mini-manche par le moniteur. Le voyant priorité s'éteint toutefois à plusieurs reprises montrant que l'engagement de la gâchette de priorité n'est pas maintenu en continu lorsqu'il pilote. L'analyse montre notamment que la gâchette se désenclenche régulièrement et brièvement lorsque le moniteur diminue son action à cabrer ou ordonne une action à piquer.

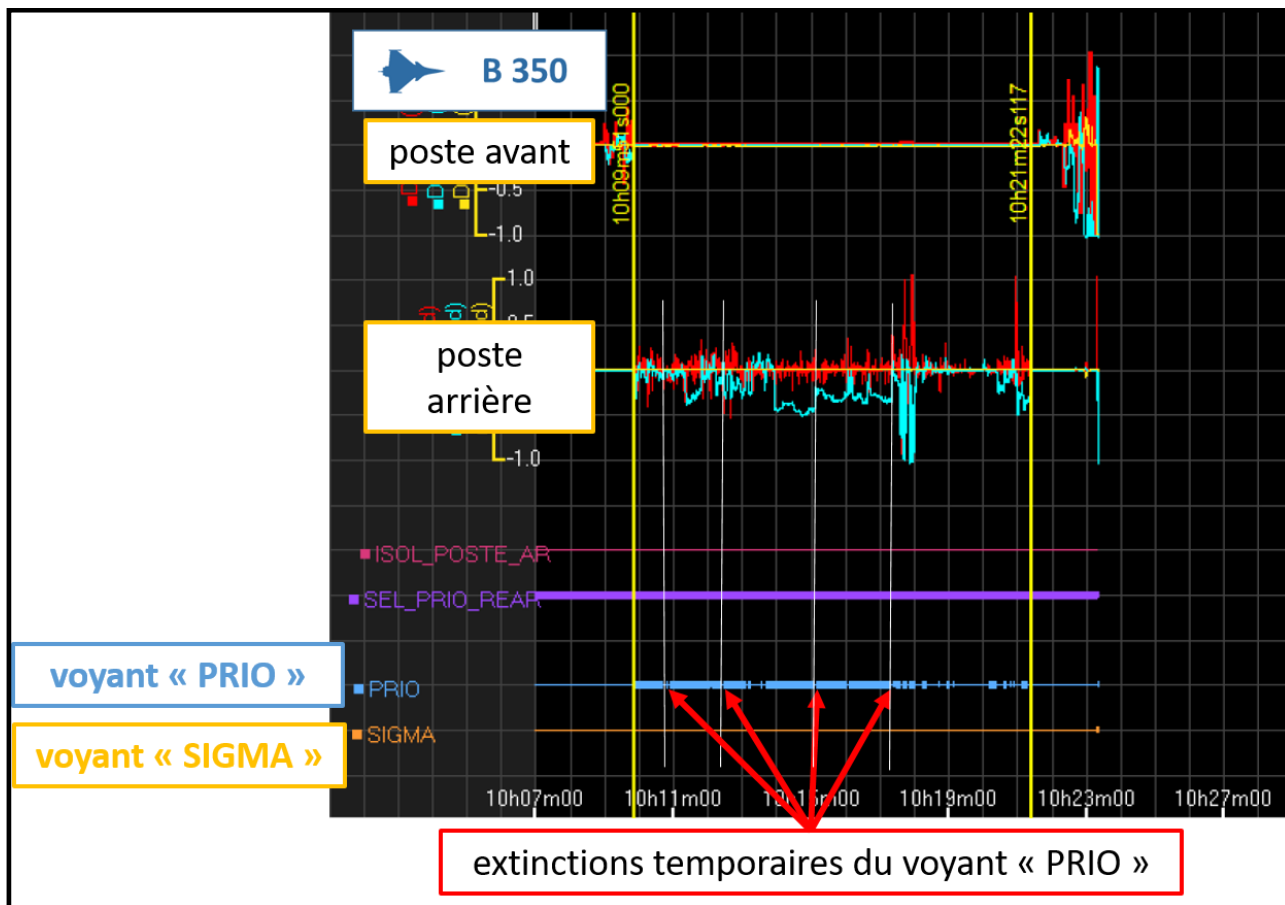


Figure 19 : exemples d'extinctions temporaires du voyant PRIO lors du pilotage du moniteur (heures en UTC)

Lorsque le moniteur a les commandes, sa préhension du mini-manche n'enclenche pas en permanence la gâchette de priorité.

2.1.6.3. Phases de sommation des commandes (ou *Dual Input*)

L'analyse des données de l'ESPAR du leader fait ressortir cinq phases de vol durant lesquelles les commandes du poste arrière du moniteur sont actionnées simultanément à celles du poste avant du pilote stagiaire sans engagement de la gâchette de priorité. Dans ces conditions, les calculateurs font la somme des ordres avant et arrière et y ajoutent les lois de pilotage du Rafale. Lors de ces phases, en raison du seuil d'allumage du voyant Σ , les temps d'allumage du voyant sont plus courts que les temps durant lesquels le moniteur et le pilote stagiaire agissent simultanément sur les commandes sans engagement de la gâchette de priorité. Parfois, lors de phases de pilotage nécessitant peu d'amplitude aux commandes, les déplacements des deux mini-manches restent insuffisants pour déclencher l'allumage du voyant Σ .

La première phase de sommation des commandes (après le test des priorités à la mise en route) se produit à 11 h 08 lors de l'alignement sur la piste pendant environ 6 secondes. Le moniteur et le pilote stagiaire ont des ordres opposés significatifs aux palonniers sans que la gâchette de priorité ne soit engagée. Le voyant Σ s'allume à trois reprises. Pendant cette phase, le moniteur indique au stagiaire de ne pas s'aligner au centre de la piste car les deux Rafale doivent décoller en patrouille.

La seconde phase de sommation des commandes se produit à 11 h 44 et dure environ 1 minute au cours d'une phase de vol à haute altitude avec de très faibles variations d'attitude du Rafale lors du ravitaillement en vol. Pendant le ravitaillement, deux transferts des commandes sont réalisés conformément à la procédure. Alors que le stagiaire est aux commandes, le moniteur continue à agir sur le mini-manche pour l'aider tout en lui prodiguant des conseils. L'allumage du voyant PRIO indique que le moniteur engage la gâchette de priorité. Ses actions au mini-manche arrière sont de faible amplitude et donc peu perceptibles par le pilote stagiaire. Ce dernier continue régulièrement durant ce laps temps à piloter malgré l'intervention du moniteur. Le voyant PRIO ne s'allume pas en permanence, ce qui montre que les ordres reçus par les calculateurs sont alors sommés par moment. Il est peu probable que le pilote stagiaire et le moniteur perçoivent les statuts des voyants PRIO et Σ en étant concentrés sur la perche de ravitaillement.

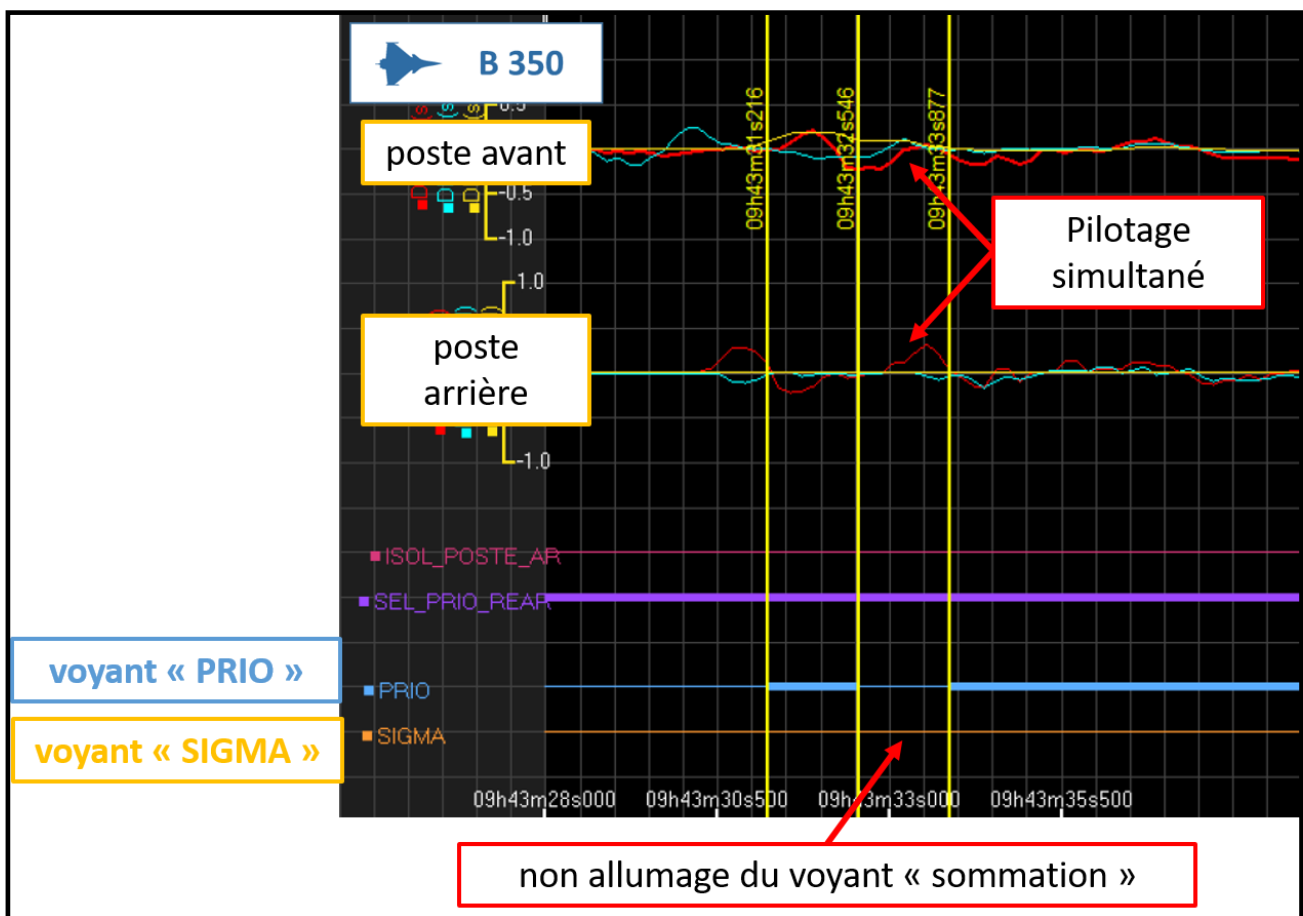


Figure 20 : exemple de pilotage simultané sans allumage continu des voyants Σ et PRIO (heures en UTC)

Une troisième phase de sommation des commandes intervient à 11 h 51 pendant 1,5 seconde avec une action franche et courte sur le mini-manche arrière par le moniteur pour adapter la trajectoire de l'aéronef. Le moniteur en informe le stagiaire tout en agissant sur le mini-manche.

Une quatrième phase de sommation des commandes intervient à 12 h 22 et 55 secondes, de manière brève et avec un très faible déplacement du mini-manche arrière. Il est probable que cette sommation soit créée par un mouvement bref et involontaire du moniteur sur le mini-manche arrière, induit par le facteur de charge lors du départ en boucle dans l'engagement en BFM. Cette sommation n'est pas significative. Elle montre toutefois que le moniteur garde la main à proximité immédiate du mini-manche et qu'il est en mesure d'intervenir comme le demande son rôle à bord.

Une cinquième phase de sommation se produit à 12 h 23 min, 15 secondes et 8 dixièmes, soit environ 3,5 secondes avant l'arrêt des enregistrements de l'ESPAR résultant de l'abordage. Durant environ 1,2 seconde, les deux pilotes affichent des ordres différents aux commandes. Notamment, le pilote stagiaire met progressivement du roulis à droite jusqu'en butée du mini-manche, alors que le moniteur met du roulis à gauche également jusqu'en butée du mini-manche. Les calculateurs intègrent alors une demande de roulis nul. Il n'y a pas de communication des intentions au sein de l'équipage. La perception de la situation n'est pas partagée.

Au cours du vol, il est constaté cinq phases de vol, dont quatre significatives, durant lesquelles un phénomène de *Dual Input* se produit, la dernière ayant lieu environ 3,5 secondes avant la fin des enregistrements. Lors de l'exercice de BFM, le moniteur est prêt à intervenir sur les commandes. Il communique avec le pilote stagiaire lorsqu'il intervient sur les commandes à l'exception de la dernière intervention.

2.1.6.4. Étude des données de 15 vols réalisés à l'ETR avec moniteur

Après l'évènement, il a été demandé à l'ETR, sans informer du but de cette demande et sans en avertir préalablement les équipages, de fournir les données de 15 vols d'instruction types. L'analyse de ces 15 vols réalisée avec Dassault Aviation révèle que 12 d'entre eux font l'objet de *Dual Input*, et que certains de ces vols en comportent de multiples. Après étude de ces phases de *Dual Input*, il est noté qu'ils se produisent majoritairement dans trois types de situations :

- Une aide au pilote stagiaire où les manœuvres au mini-manche sont de faible amplitude (ex : percée IFR, ravitaillement,...). Dans ces phases nécessitant des corrections fines, l'enclenchement de la gâchette de priorité pourrait engendrer des à-coups inopportuns pour les évolutions de l'appareil.
- Une reprise des commandes franche du moniteur pour mettre fin à un exercice ou changer de phase de vol.
- La correction d'une erreur du pilote stagiaire pouvant engager la sécurité.

Sur les vols analysés, dans ces situations le dialogue standardisé de passation de commandes n'est pas utilisé, probablement à cause de la rapidité des événements et des spécificités des missions d'instruction. Certaines actions aux commandes peuvent être accompagnées de conseil au pilote stagiaire, d'avertissement de sécurité, ou d'information de la fin de l'exercice. Il est très probable, notamment dans les cas d'aide au pilotage quand les actions du moniteur sont de faibles amplitudes, que les pilotes stagiaires n'aient pas ou peu conscience de l'intervention aux commandes des moniteurs. Il a été constaté lors de l'enquête que les pilotes peuvent prendre conscience d'une intervention sur les commandes dans l'autre poste de pilotage, non pas via l'allumage du voyant Σ , mais via les changements d'attitude vifs de l'aéronef. Toutefois, il a également été relevé que des interventions très faibles, ou allant dans le même sens que les interventions aux commandes de l'autre poste de pilotage, peuvent au contraire facilement ne pas être perçues.

L'étude des données de 15 vols à l'ETR montre que 12 d'entre eux font l'objet de situations de *Dual Input*. Certaines sont facilement perceptibles par les stagiaires avec le dialogue au sein de l'équipage ou compte tenu de la réactivité de l'aéronef, alors que d'autres leur sont très difficilement perceptibles.

2.1.7. Analyse des conversations et des données enregistrées par le contrôle aérien

Les conversations avec l'approche de Nancy sont effectuées par le chef de patrouille depuis le Rafale leader. La voix du moniteur est calme, posée et professionnelle.

Les enregistrements des trajectoires radar confirment les phases d'entraînement au tir canon des deux appareils et leur rassemblement en patrouille avant d'entamer une phase de combat rapproché. Durant cet exercice de combat rapproché, le faible taux de rafraîchissement des informations radar du contrôle et les changements rapides d'attitudes des deux appareils altèrent la fluidité de l'affichage des données radar. La perte totale des informations de vol sur le radar inquiète le contrôleur à poste qui donne l'alerte. L'information de la présence d'un parachute ouvert arrive ensuite rapidement à la tour de contrôle.

Les conversations avec le contrôle aérien montrent une attitude calme et professionnelle du chef de patrouille. Les trajectoires enregistrées confirment les phases d'entraînement aux passes de tir canon, puis l'engagement en combat rapproché à vue, sans toutefois pouvoir décrire précisément les évolutions des deux aéronefs. La perte complète des deux échos radar alerte le contrôle sur l'accident.

2.1.8. Expérience et entraînement des pilotes

2.1.8.1. Expérience et entraînement du moniteur chef de patrouille

Le moniteur est un pilote Rafale expérimenté et affecté à l'ETR depuis 2 années, son activité aérienne est régulière en qualité de moniteur. Ses compétences et son attitude en vol sont reconnues et appréciées. Commandant d'escadrille, il planifie et ordonne les missions et, en outre, suit attentivement la progression de chaque stagiaire. Il est également le pilote référent²⁷ du pilote stagiaire. Ses décisions de chef de patrouille sont partagées avec l'équipier et cohérentes, notamment la décision de procéder à un exercice d'opportunité en BFM en s'adaptant aux conditions météorologiques rencontrées. Durant le vol, il communique clairement sur la désignation du pilote ayant les commandes au sein de l'appareil et gère de manière pédagogique les conseils qu'il donne au stagiaire. Il le soulage aux moments où la charge de travail du pilote stagiaire est forte afin qu'il puisse se concentrer sur les objectifs particuliers de formation du vol. Compte tenu des conditions météorologiques, il adapte les exercices de la mission.

Lors de son parcours aéronautique, le moniteur a été impliqué dans un abordage entre deux Rafale lors d'une démonstration aérienne. Aucun élément ne permet d'établir un lien possible entre les deux abordages qui sont réalisés dans des conditions très différentes.

Le moniteur chef de patrouille est expérimenté et entraîné. Durant le vol, ses échanges traduisent un comportement pédagogique adapté vis-à-vis du pilote stagiaire. Il n'existe pas de lien entre cet évènement et l'abordage qu'il a connu précédemment.

2.1.8.2. Coursus du pilote stagiaire

Après sa formation de pilote de chasse sur PC-21, le pilote stagiaire est affecté à l'école de l'aviation de chasse en tant que moniteur sur cet appareil pendant deux ans. Fin 2023, il est affecté en escadron de chasse opérationnel sur Rafale et rejoint l'ETR afin d'y réaliser sa transformation sur cet aéronef. Celle-ci comporte près de 90 missions au simulateur et en vol. La transformation est répartie en deux phases appelées 1A et 1B. La phase 1A vise à acquérir les bases de pilotage d'un Rafale et les principes du combat à vue et des interceptions. Elle comporte 64 missions. Le pilote stagiaire a terminé cette phase à l'exception des trois derniers vols de ravitaillement (TRV3, 4 et 5). Il a ainsi terminé ses vols de BFM, lors desquels il a éprouvé des difficultés et où il lui a été demandé de montrer plus de combativité. Lors de ce module, qui comporte huit missions, il a effectué trois vols de révision et passé deux tests supplémentaires pour le valider. Il a également validé la phase de combat en tant qu'équipier (ACM²⁸), qui comporte six missions. Il a obtenu de bons résultats mais a éprouvé, au cours de l'une de ces missions, des difficultés à lire les trajectoires.

²⁷ En charge de l'accompagnement individuel de la progression d'un stagiaire.

²⁸ *Air Combat Maneuvring* – Combat à vue à deux contre un.

La phase 1B permet de découvrir les bases du tir air-air et air-sol et d'initier les pilotes à des missions tactiques en tant qu'équipier. Elle comporte 23 missions où il est possible d'ajouter des exercices complémentaires à l'initiative du responsable de mission. Le pilote stagiaire est à plus de la moitié de cette phase en ayant réalisé 13 missions. Sa progression est dans les normes.

Le pilote stagiaire a exercé deux ans en qualité de moniteur sur PC-21 à l'issue de l'obtention de son brevet de pilote de chasse. Il est en fin de transformation sur Rafale à l'ETR. Sa progression est dans les normes. Après avoir rencontré certaines difficultés, il a validé les deux modules de combat à vue.

2.1.8.3. Expérience et entraînement de l'équipier

L'équipier est affecté hors unité navigante depuis un an et demi. Il effectue, comme c'est le cas le jour de l'évènement, des vols dans le cadre de la formation des pilotes Rafale à l'ETR en tant qu'abonné, ce qui a réduit sa fréquence de vol et son entraînement récent. Précédemment affecté comme cadre et moniteur à l'ETR, il connaît parfaitement l'unité qu'il a commandée, la pédagogie et les exercices en vol qui y sont réalisés. Il est reconnu comme étant un pilote et un moniteur sur Rafale chevronné.

La restitution qu'il fait des phases du vol de l'évènement, ainsi que du déroulement de son éjection et de son sauvetage, est particulièrement précise et correspond aux faits récoltés par ailleurs dans le cadre de l'enquête. Il décrit notamment précisément sa perception des dernières secondes du vol avant l'abordage.

Sa réaction aux commandes, suite à sa perception du risque lié aux trajectoires conflictuelles, intervient dans la même seconde que les actions de l'équipage de l'autre Rafale. Bien qu'ayant subi un facteur de charge important au cours de la boucle, ses facultés de perception et de décision sont cohérentes avec celles de l'équipage de l'autre Rafale.

L'équipier est particulièrement expérimenté vis-à-vis des vols de formation Rafale de l'ETR. Sa cadence de vol et donc son entraînement récent sont plus faibles depuis un an, sans que cela n'ait d'influence sur ses décisions et actions.

2.1.9. Étude des éléments contributifs à la fatigue physique

Les jours précédant l'évènement, les trois pilotes n'ont pas eu une activité susceptible d'engendrer de la fatigue et leurs cycles de sommeil récents n'ont pas été perturbés.

La mission programmée ne comporte pas de prévision de fort facteur de charge répété. La phase programmée la plus sujette aux facteurs de charge est la phase d'attaque au sol rajoutée lors du briefing, mais elle doit être courte et non répétitive.

Lors de la réalisation de la mission, les facteurs de charge rencontrés sont faibles. Les premiers facteurs de charge significatifs débutent pour l'équipier lors des exercices de tir canon, sans toutefois atteindre des valeurs importantes. Le cumul des facteurs de charge restant faible, le vol n'est donc pas générateur de fatigue physique pour les équipages des deux aéronefs qui ont un entraînement régulier et une accoutumance aux facteurs de charge. Ensuite, lors de l'engagement en BFM, l'équipage du Rafale B n°350 subit un facteur de charge de 7,5 g, ce qui reste habituel pour ce type de manœuvre. L'équipier subit un facteur de charge important jusqu'à pic de 9.9 g lors du départ en boucle, mais qui dure peu de temps

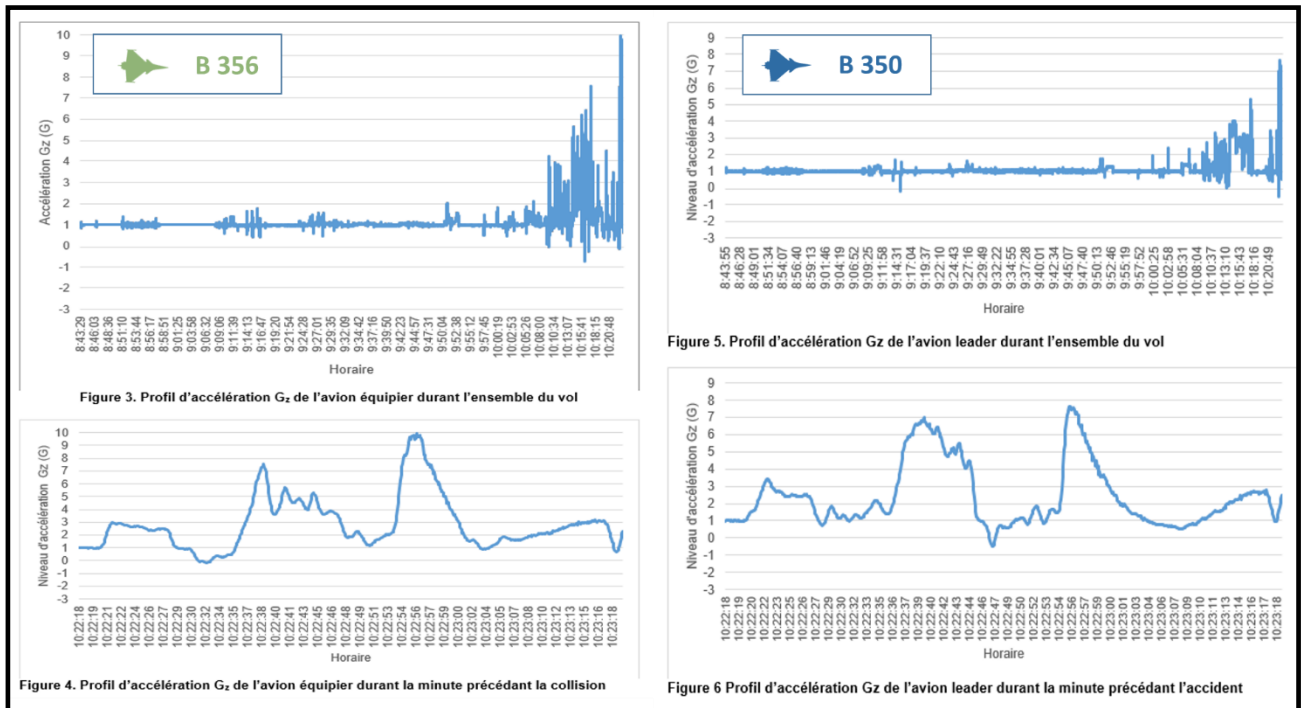


Figure 21 : facteurs de charge des deux avions lors du vol de l'évènement (heures en UTC)

Le vol n'est pas générateur de fatigue physique pour les équipages des deux aéronefs qui ont un entraînement régulier.

2.1.10. Analyse de la visibilité inter-avions

Les conditions météorologiques à l'altitude des évolutions en BFM des deux Rafale ne comportent pas de nébulosité ni de phénomène pouvant réduire la visibilité. Le positionnement du soleil n'engendre pas de gêne particulière dans la phase de gestion des trajectoires avant collision. Les couches nuageuses présentes au-delà de leur zone d'évolution ont plutôt tendance à améliorer la visibilité des avions sur un fond blanc.

Si la visibilité vers l'avant du moniteur en place arrière est restreinte, le positionnement relatif des appareils lors des trajectoires de sortie de boucle offre toutefois la possibilité au moniteur d'un très bon secteur de visibilité sur l'autre Rafale. Dans cette phase, le faible facteur de charge rencontré permet au pilote d'effectuer aisément des mouvements de tête pour s'adapter au masque de l'arceau de verrière et du boîtier de tête du siège avant.

Après le croisement au sommet de la boucle et avant de converger à nouveau l'un vers l'autre, les deux appareils se sont éloignés au maximum de 700 mètres. Le témoignage de l'équipier indique qu'il voit clairement l'autre avion dans toute cette phase de sortie de boucle. Lors de la séquence de BFM, les distances entre les avions les maintiennent dans un espace visuel favorable à la perception physiologique humaine, notamment en terme de perspective aérienne.

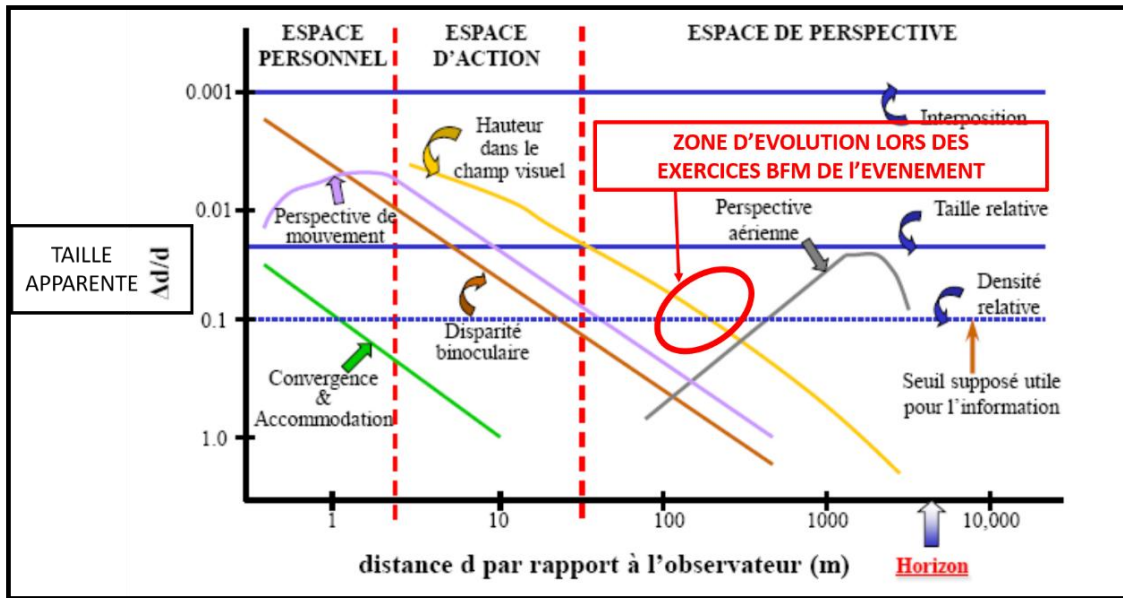


Figure 22 : capacité de perception visuelle de l'humain²⁹

Dans la phase durant laquelle peut se gérer la séparation des trajectoires, aucune difficulté d'intervisibilité entre les deux avions n'est relevée.

En revanche, lors du déclenchement de l'évitement d'urgence, les manœuvres en roulis et tangage des deux avions les placent dans une position relative « ventre-à-ventre », ce qui retire à chacun des trois pilotes toute possibilité de voir l'autre aéronef.

L'hypothèse d'une difficulté d'intervisibilité des deux Rafale est écartée durant la phase de gestion des trajectoires en sortie de boucles. Par la suite, une fois la manœuvre d'évitement d'urgence initiée par les deux aéronefs, il est impossible aux équipages de percevoir l'autre avion durant les derniers instants avant l'abordage.

²⁹ Monot, A. (2004). Traitement de l'information spatiale et temporelle. Cours pour le diplôme universitaire Sciences de la vision. Année 2024-2005.

2.2. Séquence de l'évènement

La séquence de l'évènement est déterminée comme suit :

- 07 h 30 : arrivée des équipages à l'escadron.
- Environ 8 h : briefing du stagiaire pilote et de mission.
- 10 h 43 : mise en route de l'équipier.
- 10 h 44 : mise en route du Rafale leader.
- 10 h 47 : tests des priorités de commandes après démarrage du Rafale leader.
- 11 h 08 : ordres inverses et sommation des commandes aux palonniers lors de l'alignement du Rafale B n°350 sur la piste, allumage du voyant Σ .
- 11 h 10 : décollage de la patrouille.
- 11 h 30 : début des exercices de ravitaillement du pilote stagiaire et de l'équipier en Allemagne.
- 11 h 40 : fin du ravitaillement de l'équipier.
- 11 h 44 : sommation des commandes lors de l'exercice de ravitaillement en vol du Rafale B n°350. Allumage non permanent du voyant PRIO, pas d'allumage du voyant Σ .
- 11 h 50 : fin de l'exercice de ravitaillement du Rafale leader.
- 11 h 51 : prise de commande franche et courte en roulis du moniteur sans engagement de la gâchette de priorité, allumage du voyant Σ , fin de l'exercice de ravitaillement en vol du Rafale leader.
- 11 h 57 : descente de la patrouille en retour vers la France.
- 12 h 02 : début de percée IFR avec Nancy (initialement prévue à Luxeuil où les conditions météorologiques ne sont pas favorables).
- entre 12 h 12 et 12 h 14 : rejointe du cheminement en très basse altitude vers Saint-Dizier puis décision de demi-tour à cause de la météo et remontée dans les zones de Nancy.
- entre 12 h 14 et 12 h 17 : exercices de tir canon au profit de l'équipier.
- 12 h 17 à 12 h 22 : rassemblement en formation. Le moniteur confie le « *tactical lead*³⁰ » de l'exercice de BFM au pilote stagiaire qui effectue la check-list avant BFM.
- 12 h 22 : début de présentation de type « *Butterfly* ».
- 12 h 22 min 35 s : virage pour le « face-à-face ».
- 12 h 22 min 54 s : croisement et départ en boucle, action parasite sur le mini-manche arrière sous facteur de charge.
- 12 h 23 min 01s : annonce tactique « *Flares*³¹ » par l'équipier.
- 12 h 23 min 05 s : le Rafale de l'équipier est sur la tranche au sommet de sa boucle et débute un changement de plan d'évolution avant de redescendre.
- 12 h 23 min 07 s : les deux Rafale se croisent en haut de boucle. La distance les séparant est de 117 m. Le pilote stagiaire effectue une légère mise en roulis du Rafale leader ; deux alertes « *Too slow*³² » sont émises par le système de vol du Rafale leader.
- 12 h 23 min 08 s : le pilote stagiaire met du roulis à droite dans sa phase de redescente pour orienter la trajectoire de son appareil dans le même plan de combat que l'autre Rafale.
- 12 h 23 min 12 s : le pilote stagiaire met du roulis à gauche pour arrêter le taux de roulis : le moniteur fait remarquer au pilote stagiaire son retard tactique.
- 12 h 23 min 13 s : le pilote stagiaire maintient plein cabrer avec un léger roulis à droite, les trajectoires des deux appareils rendent le croisement incertain.
- 12 h 23 min 15 s 8 d : le pilote stagiaire donne un ordre allant jusqu'au plein roulis à droite tout en maintenant le cabrer, le moniteur commence à agir sur les commandes avec un léger roulis à gauche sans que la gâchette de priorité ne soit engagée.
- 12 h 23 min 16 s 2 d : le moniteur met rapidement le mini-manche en butée de roulis à gauche. La gâchette de priorité n'est pas engagée, les calculateurs intègrent une demande de roulis nul. Allumage du voyant Σ .
- 12 h 23 min 16 s 7d : l'équipier relâche son action à cabrer.
- 12 h 23 min 16 s 8 d : l'équipier imprime du roulis à gauche.

³⁰ Direction du déroulement de l'exercice de BFM.

³¹ Annonce simulant le déclenchement des leurres anti-missiles.

³² Alerte indiquant que l'appareil vole trop lentement.

- 12 h 23 min 17 s 0 d : le moniteur replace le mini-manche au neutre, le pilote stagiaire relâche fortement son roulis à droite après avoir annoncé « *flares* ».
- 12 h 23 min 17s 1 d : l'équipier imprime un ordre de plein roulis à droite.
- 12 h 23 min 17s 2 d : le pilote stagiaire imprime un fort ordre à piquer jusqu'au maximum.
- 12 h 23 min 17 s 3 d : l'équipier imprime un fort ordre à piquer jusqu'au maximum. Il poursuit son ordre à plein roulis à droite.
- 12 h 23 min 17 s 5 d : le pilote stagiaire imprime un ordre à plein roulis à droite et un ordre maximum au palonnier à droite tout en continuant à piquer.
- 12 h 23 min 17 s 9 d : le moniteur donne un ordre de plein roulis à droite, en enclenchant la gâchette de priorité.
- 12 h 23 min 18 s 0 d : le pilote stagiaire positionne son roulis au neutre et passe plein cabrer.
- 12 h 23 min 18 s 2 d : l'équipier arrête son ordre à piquer.
- 12 h 23 min 18 s 3 d : le moniteur passe au plein cabrer avec le voyant PRIO allumé. Les deux appareils sont fortement inclinés sur la droite avec chacun un ordre à plein cabrer.
- 12 h 23 min 18 s 7 d : l'équipier annonce « à droite » à la radio.
- 12 h 23 min 19 s 3 d : fin d'enregistrement des données.
- 12 h 23 min et environ 30 s : éjection de l'équipier.
- 12 h 27 : arrivée au sol du pilote éjecté.

Focus sur la séquence du croisement au sommet de la boucle jusqu'à l'abordage :

Au sommet de la boucle, lors du croisement sur le dos des deux appareils, l'équipier change de plan de combat par du roulis à gauche avant d'engager sa descente.

Les deux appareils étant ensuite en descente, le Rafale leader referme sa trajectoire en direction de l'autre appareil avec une action de roulis à droite du stagiaire, qu'il arrête ensuite par un déplacement à gauche du mini-manche.

Les trajectoires sont désormais dirigées vers une zone de croisement incertain en fin de descente.

Dans le Rafale leader, le moniteur met légèrement du roulis à gauche tandis que le pilote stagiaire imprime un roulis franc à droite. Le moniteur passe alors le mini-manche en butée de roulis à gauche sans activation de la gâchette de priorité. Un *Dual Input* se produit pendant 1,2 seconde, dont 0,8 seconde avec des intentions de roulis maximum inverses et la poursuite de l'action à cabrer en place avant, ce qui modifie la trajectoire de l'aéronef vers la droite du fait de son inclinaison.

Dans l'autre Rafale, l'équipier applique d'abord brièvement du roulis à gauche, puis passe en butée de roulis à droite, ce qui engage l'appareil dans une tentative d'évitement par la droite.

Après une période de relâchement des commandes de 0,9 seconde du moniteur, pendant laquelle le pilote stagiaire imprime une action à piquer avec du roulis à droite, le moniteur positionne finalement le mini-manche en butée de roulis à droite avec engagement de la gâchette de priorité.

Les trajectoires sont alors toujours convergentes suite à ces manœuvres.

Lors de l'arrêt des enregistrements, les appareils sont fortement inclinés à droite, les mini-manches des trois pilotes étant en butée à cabrer, sans roulis.

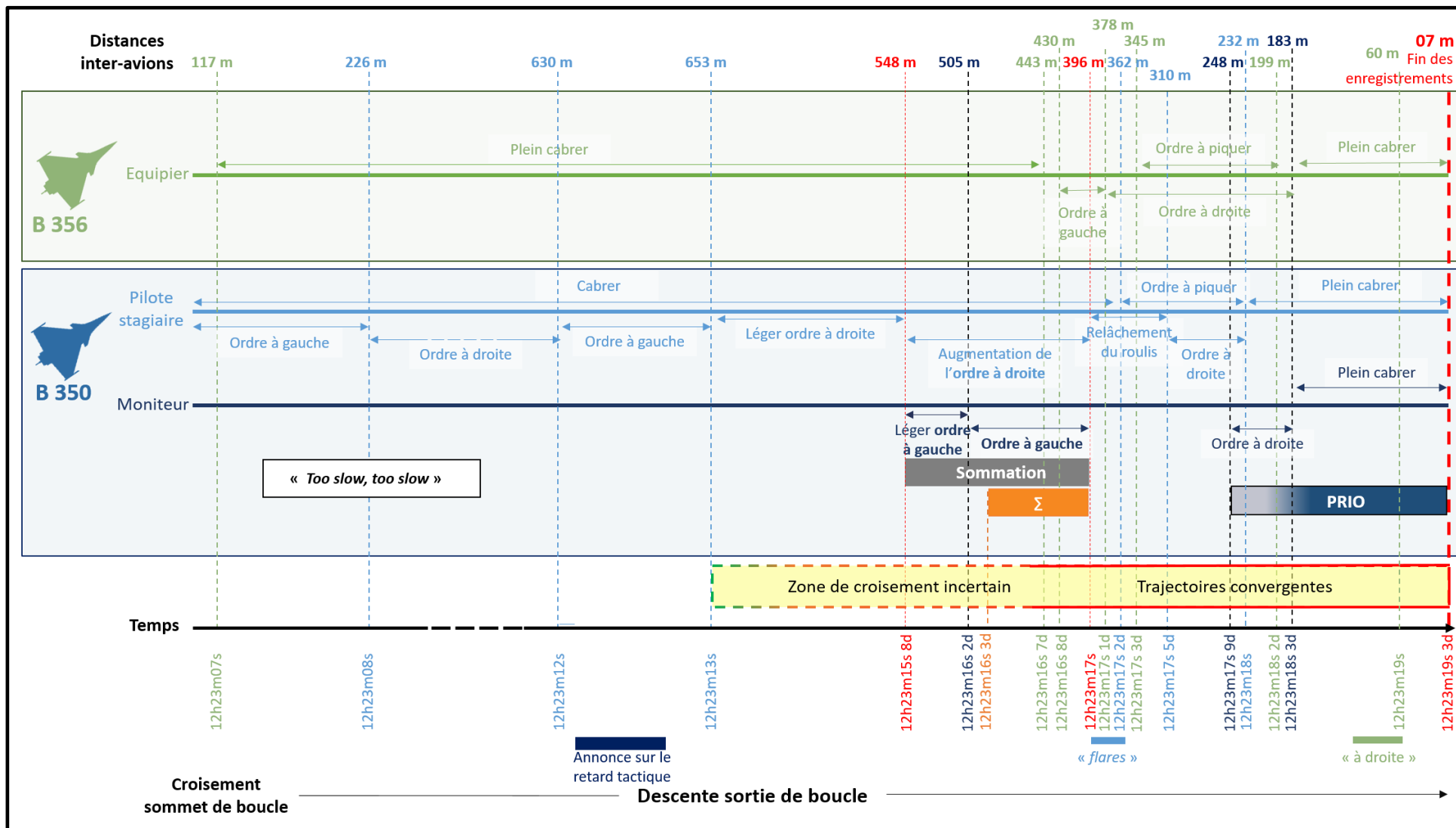


Figure 23 : représentation de la séquence des événements de l'abordage

2.3. Recherche des causes de l'évènement

2.3.1. Actions de pilotage avant la détection des trajectoires conflictuelles

2.3.1.1. Ascendant tactique de l'équipier

L'équipier arrive au croisement en face-à-face au début de l'engagement avec une vitesse de 445 kt, supérieure de presque 90 kt par rapport à celle de l'autre Rafale. Cette vitesse est cohérente avec un début d'engagement en BFM et se situe au milieu de la plage d'efficacité optimale de manœuvre de l'avion.

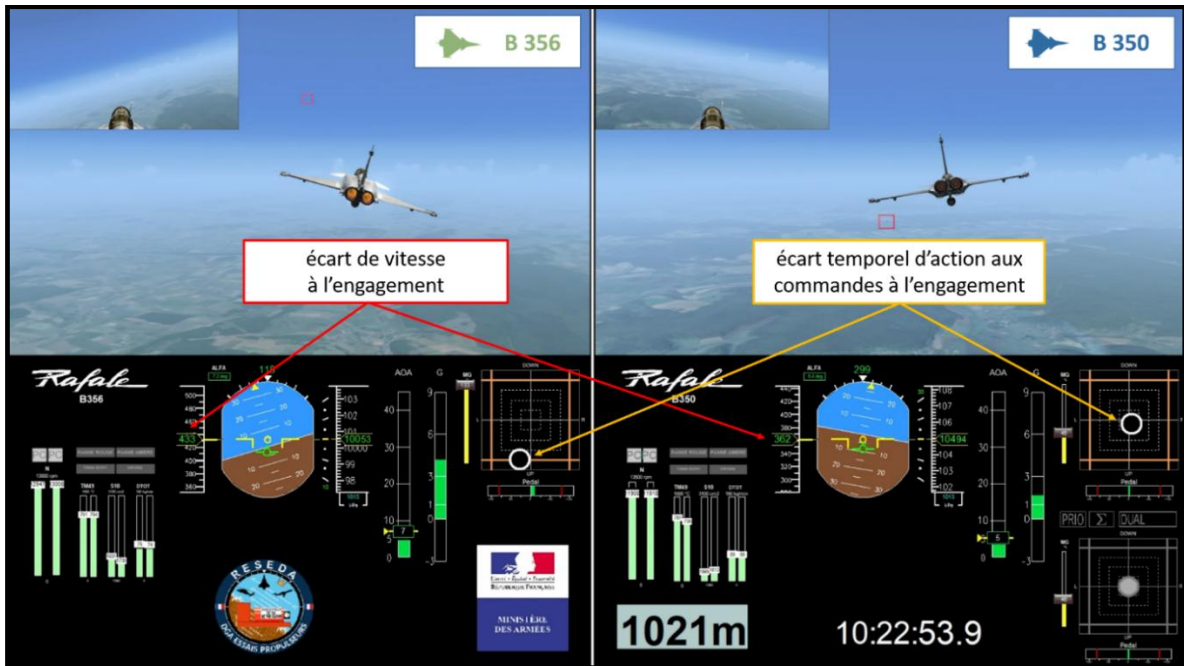


Figure 24 : ascendant tactique de l'équipier (Rafale B n°356) à l'engagement (heure en UTC)

Lors du croisement, l'équipier effectue juste avant l'autre avion une ressource sous fort facteur de charge (jusqu'à un pic de 9,9 g) qui le place, au croisement sur le dos du sommet de la boucle avec un avantage de trajectoire et d'altitude sur le leader. Au sommet de la boucle, il incline son appareil de 90° à gauche afin de changer franchement son plan d'évolution. Ce changement tactique est très efficace et peu visible du Rafale leader car il s'effectue dans son angle mort arrière.

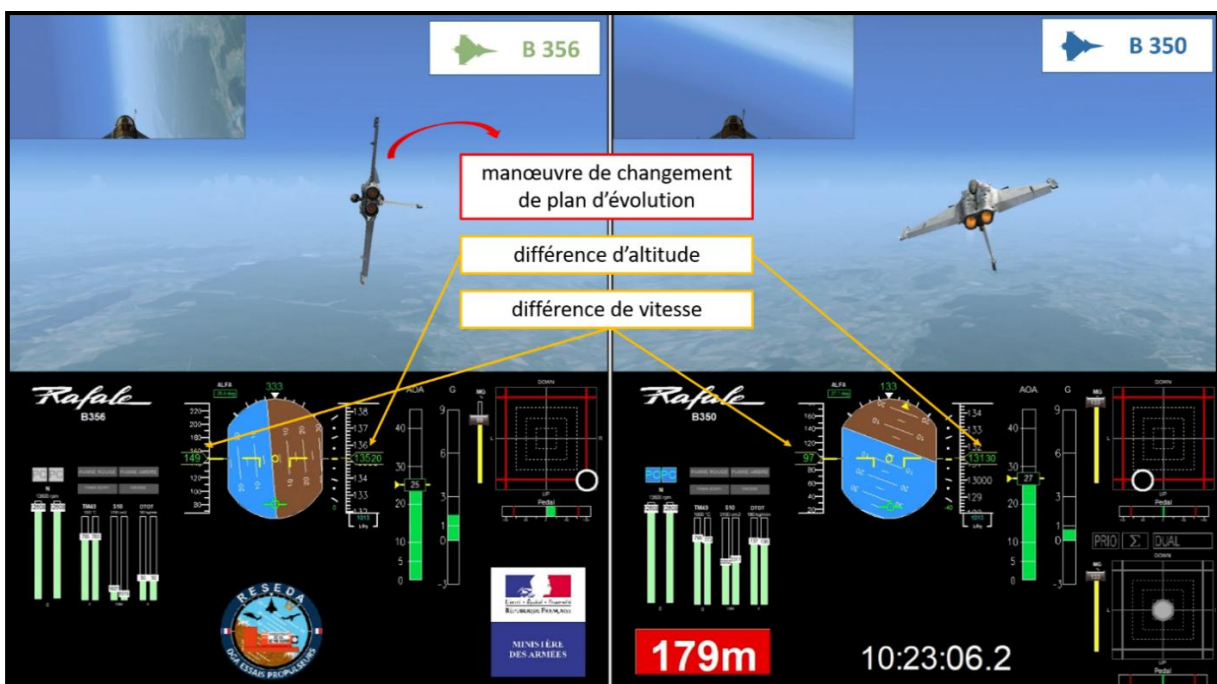


Figure 25 : ascendant tactique du Rafale B n°356 au sommet de la boucle (heure en UTC)

Tactiquement, l'équipier obtient un ascendant sur l'autre Rafale par ses manœuvres qui sont plus dynamiques. Il dispose de plus d'altitude et de vitesse au sommet de la boucle que son adversaire.

La trajectoire de l'équipier montre des initiatives et un ascendant tactique sur l'autre appareil dès l'engagement de l'exercice. Au sommet de la boucle, il effectue un changement de plan d'évolution efficace tactiquement et difficile à percevoir rapidement par l'équipage du Rafale leader.

2.3.1.2. Retard tactique du Rafale leader

Le pilote stagiaire est aux commandes du Rafale leader dès le début de l'exercice de combat rapproché. À l'engagement, il effectue une ressource à 7,5 g avec une vitesse de départ plus faible que celle de son vis-à-vis. Au sommet de la boucle, qui se situe 300 ft plus bas que son adversaire, sa vitesse est inférieure à la vitesse minimale. Il accuse un retard de deux secondes. Après avoir croisé l'autre appareil sur le dos, il poursuit sa boucle avec un léger changement de plan d'évolution. Passant 40° de tangage vers le bas, il inverse son roulis franchement vers la droite. Il poursuit son action en roulis à droite durant la descente jusqu'à avoir dépassé la verticale en descente. Cette manœuvre en roulis à la verticale descendante change très rapidement son plan d'évolution et ramène sa trajectoire en direction de l'autre appareil. En situation d'instruction, le pilote stagiaire, qui s'est retrouvé rapidement en position tactique défavorable, cherche par cette manœuvre à réduire son désavantage. En sortie de boucle, sa manœuvre en roulis est très efficace en terme de changement de plan de combat mais elle oriente la trajectoire de son appareil vers celle de l'autre Rafale, générant une zone d'incertitude sur le croisement des deux avions.

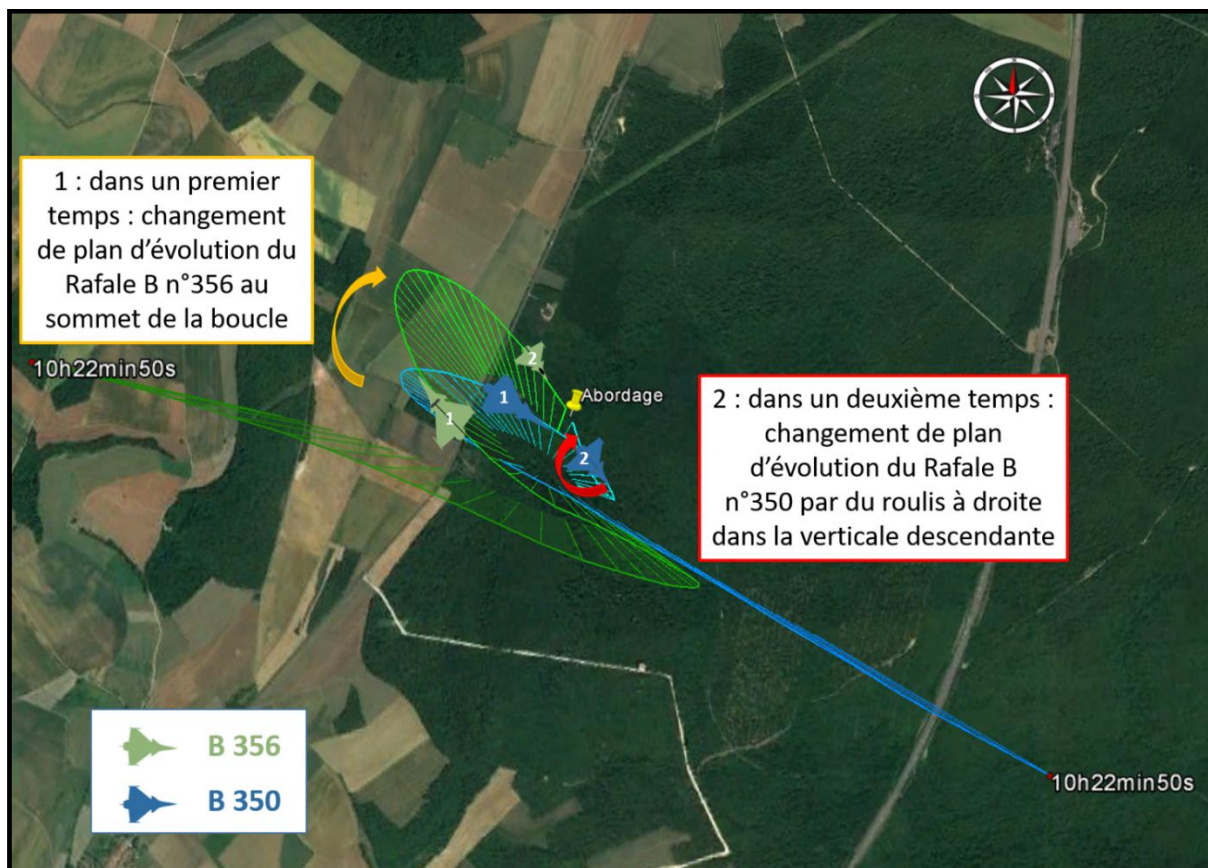


Figure 26 : moments des changements de plans d'évolutions - Rafale B N°350 revenant vers son adversaire (heures en UTC)

Les évolutions du Rafale leader montrent que le pilote stagiaire aux commandes se retrouve dès l'engagement dans une situation tactique défavorable. Conformément aux enseignements tactiques, il cherche à réduire son retard en refermant ses trajectoires en direction de l'autre appareil. Cette manœuvre oriente toutefois son appareil vers une zone de croisement incertain avec l'équipier.

2.3.1.3. Gestion de la distance minimale de séparation

Certaines phases des manœuvres de BFM sont connues des pilotes pour présenter un risque d'abordage. L'évaluation des distances de séparation précisées dans les règles d'emploi est subjective dans certaines configurations entre les avions. En outre, le radar ne permet pas de mesurer l'espacement latéral au moment du croisement. Dans les faits, le Rafale ne dispose pas d'une indication de distance latérale mesurable pour gérer l'anti-abordage en BFM, ce qui rend les espacements difficilement évaluables et applicables. En revanche, chaque pilote se construit avec l'expérience une notion de « *Time to Collision* », référence qui permet d'anticiper les trajectoires pour gérer l'anti-abordage.

Un dialogue radio inter-aéronefs est engagé lorsqu'un pilote estime qu'il ne pourra pas maintenir une trajectoire sécurisée, conduisant à un rapprochement potentiellement dangereux. Dans les autres cas, il n'y a pas de communication entre les aéronefs précisant par exemple le côté du croisement.

L'enquête a analysé un panel de vols Rafale à l'ETR comprenant des exercices de BFM. La distance de séparation y est parfois inférieure à 1 000 ft.

Pour les croisements à haute vitesse, la gestion de la séparation est essentiellement assurée en décalant les trajectoires sans croiser celle de l'autre appareil. Les pilotes s'aident du vecteur vitesse et du positionnement de l'autre avion affiché par le système de mission. La particularité du combat rapproché en Rafale aboutit à ce que les appareils évoluent très régulièrement à basse vitesse avec des rayons de virage très faibles. Dans ces configurations, les appareils tournoient l'un autour de l'autre à des distances parfois inférieures à 1 000 ft, sans que cela ne représente en soi un risque non maîtrisé d'abordage au regard du placement des aéronefs, de leur trajectoire non convergente et du niveau de compétence des équipages.

Au débriefing, la distance entre les aéronefs n'est pas systématiquement affichée par les équipages sur le système de restitution. Cette distance est mesurée lorsque les équipages ont eu le sentiment qu'un croisement trop proche a eu lieu pendant le vol, avec des trajectoires qu'ils estiment non sécurisées. Elle est alors affichée avec une précision de 0,1 Nm³³ et repose sur les données de positionnement de chaque avion qui comportent des biais lors de fortes évolutions.

Parmi les règles d'anti-abordage, les pilotes ont ainsi le sentiment de ne pas pouvoir toujours respecter l'espacement minimal entre les appareils prescrit par l'AAE. Non mesurable et sans être strictement applicable, cette notion de séparation reste néanmoins un des paramètres utiles pour l'apprentissage de l'anti-abordage dans le but de poser une référence commune et des limites dans l'esprit des pilotes afin, par exemple, de contrecarrer de trop grandes prises de risques.

Parmi les règles d'anti-abordage, l'espacement de 1 000 ft prescrit par l'AAE n'est pas toujours respecté. À la date de l'accident, il n'existe pas de système permettant aux équipages d'évaluer et de respecter strictement cette distance, ce qui affaiblit son application stricte. Les équipages gèrent l'anti-abordage en écartant leurs trajectoires pour ne pas aboutir à une situation conflictuelle dangereuse.

2.3.2. Détection de trajectoires conflictuelles et actions d'évitement

2.3.2.1. Difficultés de la tentative d'évitement pour les deux appareils

Lors d'une telle phase de vol à faible vitesse et grande incidence, la trajectoire des aéronefs à aile « delta » est très éloignée de l'axe longitudinal du fuselage (que l'on a tendance à prendre en référence pour la trajectoire). En effet cette trajectoire correspond à une droite passant par le centre de gravité de l'aéronef et décalée dans le plan médian de l'avion de l'angle d'incidence (AoA) par rapport à l'axe du fuselage. À grande incidence, il existe alors une différence de presque 30° entre l'axe du fuselage et la trajectoire de l'avion, ce qui rend la trajectoire future difficile à visualiser. Lors de la tentative d'évitement, chacun des deux Rafale ayant un fort angle d'incidence, la trajectoire relative des aéronefs est difficile à visualiser précisément pour les pilotes qui doivent évaluer non seulement l'angle entre leur trajectoire et l'axe de leur fuselage, mais aussi celui de l'autre appareil.

³³ Cette précision est de 0,01 Nm avec la version actuelle du système.

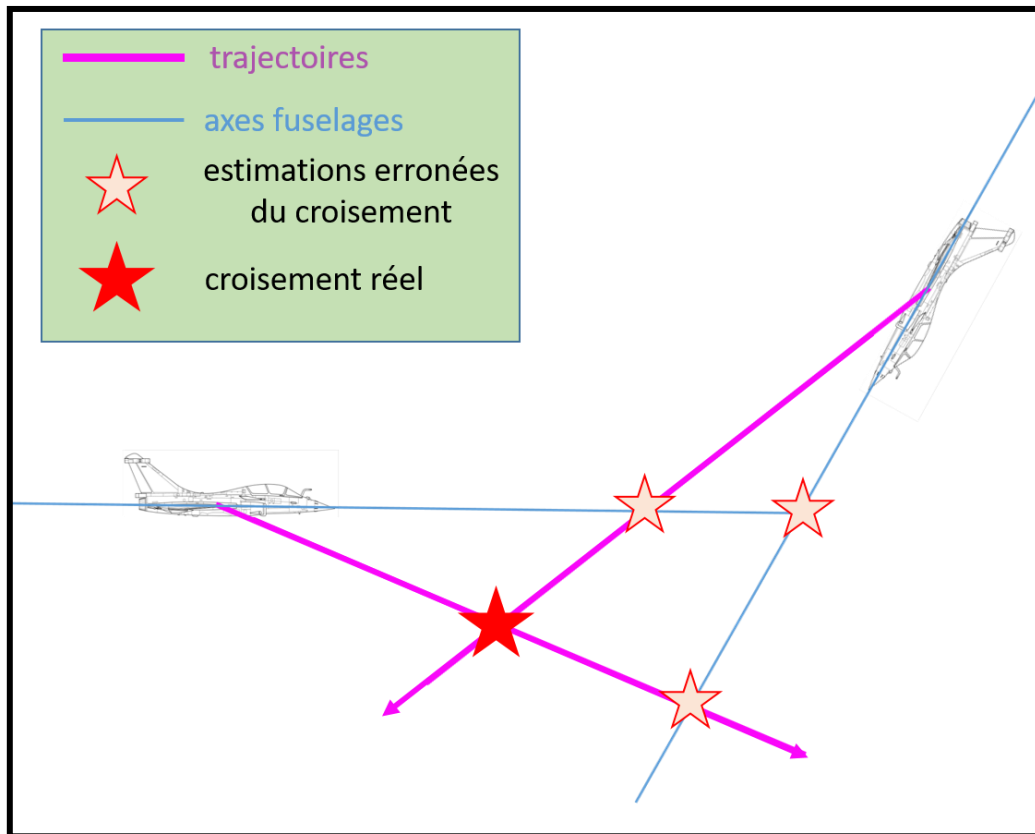


Figure 27 : exemples de difficulté d'appréciation des trajectoires à haute incidence

Dans la fin de descente de la boucle, les deux équipages perçoivent que les trajectoires sont conflictuelles. La convention retenue en cas de risque d'abordage est d'effectuer un évitement par la droite, sauf si cette manœuvre implique le croisement des trajectoires.

Dans cette situation conflictuelle, le choix du pilote stagiaire, qui applique à nouveau du roulis à droite après avoir orienté son appareil en direction de l'autre Rafale, est d'effectuer une séparation des trajectoires par la droite. Ce choix peut s'expliquer, soit par une perception que les trajectoires amènent à un croisement par la droite, soit par une application de la convention consistant à privilégier un évitement par la droite en cas de présentation frontale. Toutefois, les réactions de l'équipier et du moniteur, tous deux plus expérimentés, sont dans un premier temps opposées à celle du pilote stagiaire, ce qui montre qu'ils évaluent initialement tous les deux qu'un croisement par la gauche est à privilégier car plus sécurisé.

Lors des actions initiées par les pilotes pour s'éviter, les deux Rafale sont à faible vitesse (environ 210 kt pour l'équipier et 190 kt pour le leader) et ont une grande incidence (AOA de 28° pour l'équipier et de 21° pour le leader). Ainsi, dans cette phase de vol, les appareils sont moins manœuvrants en raison de la faiblesse des forces aérodynamiques, des écoulements d'air turbulents sur les gouvernes et des protections des calculateurs qui restreignent l'autorité des pilotes sur les commandes de vol afin d'éviter le décrochage³⁴. Conformément à l'instruction prodiguée dans ce cas, les pilotes cherchent à diminuer l'angle d'incidence en poussant le manche à piquer (« rendre la main ») pour augmenter leur autorité aux commandes. Durant la tentative d'évitement, les pilotes aux commandes effectuent cette manœuvre à piquer simultanément.

La trajectoire relative des aéronefs sous très forte incidence est difficile à évaluer, ce qui rend délicat l'anticipation de la zone conflictuelle. Au cours de la tentative d'évitement, le pilote stagiaire imprime du roulis à droite pour séparer les trajectoires alors que l'équipier comme le moniteur évaluent initialement qu'un croisement par la gauche est à privilégier. La réduction de la manœuvrabilité à basse vitesse et très forte incidence complexifie la réalisation de l'évitement.

³⁴ Perte de portance brutale liée au décollement turbulent des filets d'air sur l'extrados (partie supérieure) d'une aile au-dessus d'une certaine incidence de vol (proche d'un angle de 30° pour une aile Delta comme sur le Rafale).

2.3.2.2. Expérience et entraînement du pilote stagiaire

Le moniteur confie au pilote stagiaire le « *tactical lead* » de l'exercice de BFM, ce qui montre qu'il a une certaine confiance dans son niveau. Il le motive avant d'engager l'exercice et lui laisse la gestion tactique du combat sans intervenir sur la conduite de la manœuvre.

Lors des phases d'apprentissage en BFM à l'ETR, le pilote stagiaire a rencontré des problèmes de gestion de l'énergie et de positionnement relatif 3D. Il lui a également été demandé d'être plus combatif dans ses phases d'apprentissage. Il est donc probable que le pilote stagiaire accentue ses efforts pour améliorer ce point lors des exercices de combat, ce qui peut expliquer une recherche de trajectoires plus offensives en BFM. Il est possible que la manœuvre l'amenant à refermer sa trajectoire en direction de son adversaire pendant la phase de descente traduise la prise en compte des remarques qui lui ont été formulées durant sa formation. Il est possible également qu'il soit influencé par le commentaire du moniteur, après le sommet de la boucle, lui signifiant qu'il est en retard tactiquement à ce stade de l'exercice.

Durant deux ans en tant que moniteur sur PC-21, il a accumulé une expérience conséquente dans les exercices de BFM sur PC-21. Il s'est donc construit une base de données mentale durcie des repères de distances et des vitesses de rapprochement (combinaison appelée perception du *Time to Collision*) propres au PC-21.

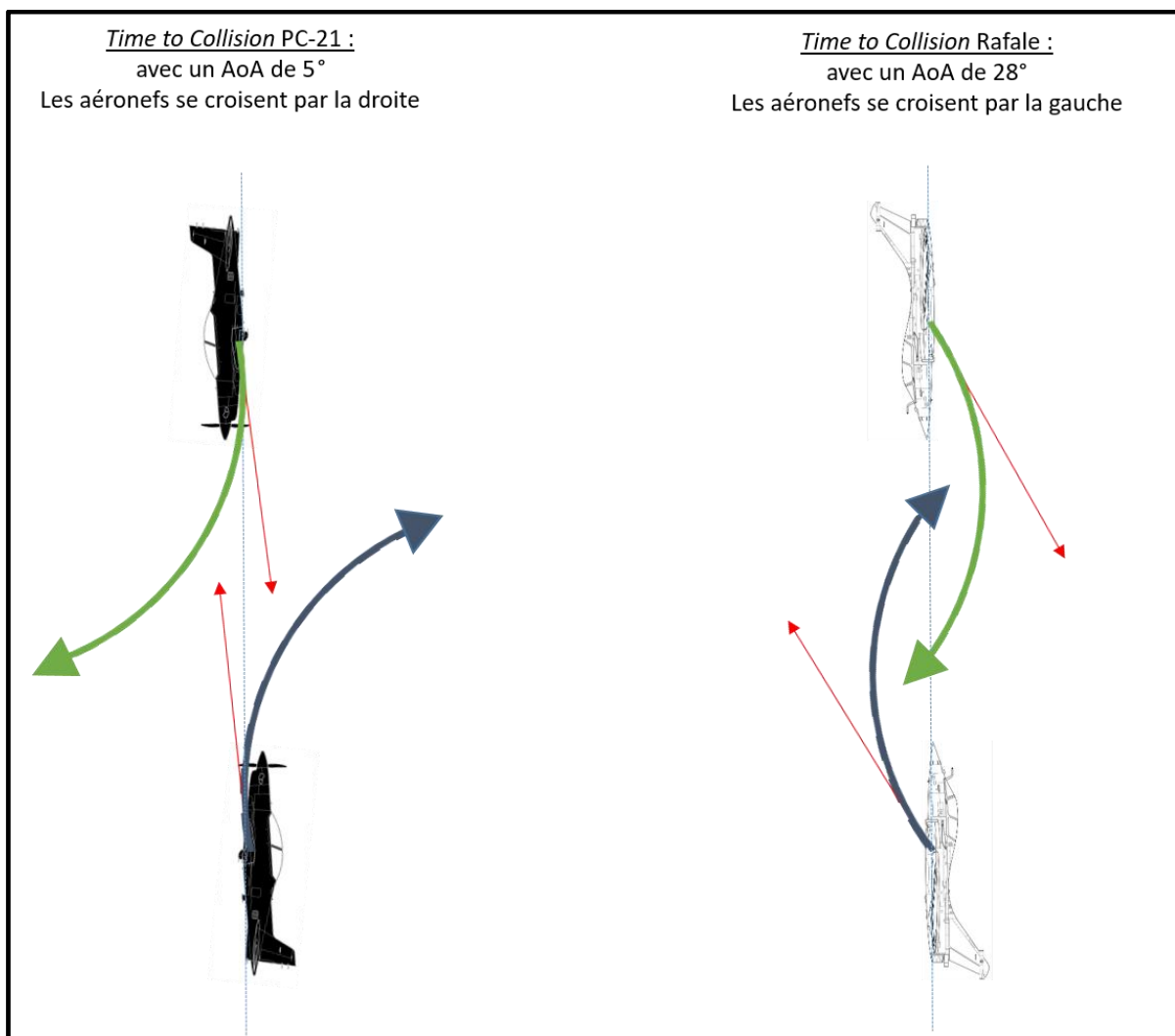


Figure 28 : schématisation des trajectoires montrant les différences de *Time to Collision* à acquérir en fonction des avions (vitesses de vol identiques)

En arrivant sur Rafale à l'ETR, ses références de *Time to Collision* sont donc plus solidement ancrées sur celles des vols en PC-21 que celles d'un stagiaire arrivant à l'ETR directement après sa formation initiale. Il est donc probable que le pilote stagiaire ait été influencé dans le choix de ses trajectoires par des habitudes acquises lors de son expérience précédente sur un autre type d'aéronef avec des vitesses relatives et une enveloppe de vol propres, contribuant à élaborer une référence différente du *Time to Collision* sur Rafale.

Le pilote stagiaire a rencontré dans sa progression des difficultés, notamment lors des vols BFM. Lors de l'exercice il est possible qu'il recherche des trajectoires de combat offensives afin de démontrer sa progression tactique.

Lors de son parcours de moniteur à Cognac, il a acquis une estimation du *Time to Collision* ancrée sur des références des vols sur PC-21 qui est différente de celle sur Rafale.

2.3.2.3. Dual input ou sommation des commandes à bord du Rafale leader avant l'abordage

À 12 h 23 min 15 s 8 d, l'analyse des données montre que le moniteur a la main sur le mini-manche, il commence à corriger la trajectoire en ordonnant un léger roulis à gauche. Les deux avions sont alors éloignés d'environ 550 m en rapprochement avec une vitesse relative en augmentation à ce moment-là. De manière quasi-simultanée, le pilote stagiaire affiche un ordre en roulis en butée à droite et le moniteur un ordre en roulis en butée à gauche, mais sans que la gâchette de priorité ne soit enclenchée. Cette volonté de changement de trajectoire est contrecarrée pendant 1,2 seconde par la sommation des ordres de commandes qui va jusqu'à annuler les demandes d'actions en roulis de l'appareil. Pendant ce laps de temps, la trajectoire du Rafale leader n'est plus maîtrisée.



Figure 29 : représentation du Dual Input à bord du Rafale B n° 350 environ 3 secondes avant l'abordage (heure en UTC)

Probablement suite à son incompréhension vis-à-vis de la réaction qu'il attendait de l'avion³⁵, notamment l'absence de départ en roulis à gauche qu'il ordonne, le moniteur arrête pendant 0,9 seconde ses actions au mini-manche, ce qui met fin au Dual Input. Presque simultanément, le pilote stagiaire rend la main en affichant plein piqué, probablement par incompréhension des réactions en roulis de l'avion et pour retrouver de l'efficacité aux commandes ou séparer les trajectoires dans le plan vertical. Il ordonne ensuite à nouveau du roulis à droite. Durant cette phase, il peut être difficile pour les deux pilotes de faire la différence entre leurs actions simultanées aux commandes et l'intervention des calculateurs à faible vitesse et forte incidence pour préserver l'enveloppe de vol du Rafale.

Le moniteur engage ensuite du roulis à droite jusqu'en butée, puis cabre au maximum en actionnant la gâchette de priorité³⁶ pour réaliser un évitement d'urgence par la droite.

Ainsi, la reprise effective des commandes du moniteur est retardée de 2,1 secondes. Les deux Rafale sont séparés de moins de 250 m lorsqu'un évitement, opposé à son plan d'action initial, est finalement clairement engagé par le moniteur en enclenchant la gâchette de priorité. Le Rafale leader reçoit finalement un ordre en roulis à droite l'inclinant à 66° en roulis puis un ordre à cabrer au maximum (dépassement des butées élastiques) mais dont les effets restent peu efficaces à faible vitesse jusqu'à l'abordage.

Il n'y a pas de communication relative à la gestion des trajectoires ou à l'annonce d'une reprise des commandes entre les deux pilotes durant ces instants. La rapidité des événements et les difficultés de compréhension des trajectoires par les deux pilotes peuvent expliquer cette absence de communication dans cette situation d'urgence. Ceci ne permet pas de partager les intentions au sein de l'équipage.

³⁵ Dans cette phase de vol, un ordre de roulis en butée devrait provoquer un taux de roulis d'environ 70° par seconde de l'avion, alors que pendant le Dual Input, le roulis résiduel de l'avion est de l'ordre de 2° par seconde.

³⁶ Le voyant PRIO commence à flasher avant de s'allumer fixe.

Après la phase de *Dual Input*, le pilote stagiaire annonce « *flares* », ce qui montre qu'il a encore des considérations tactiques à ce moment-là.

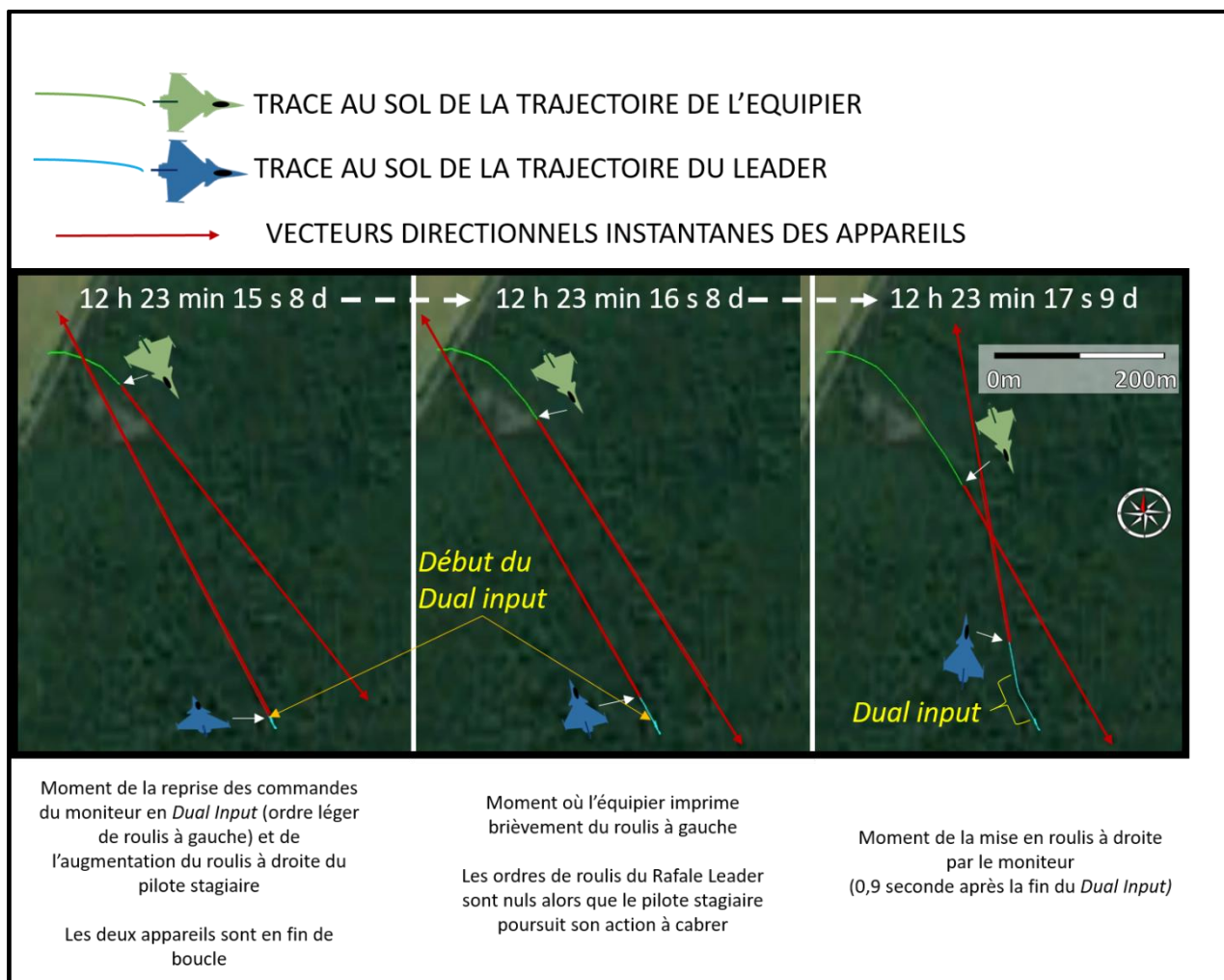


Figure 30 : représentation de la projection des trajectoires au sol des deux Rafale

Environ 3,5 secondes avant l'abordage, le moniteur débute une action en roulis à gauche pour corriger la trajectoire choisie par le stagiaire mais sans prendre la priorité de pilotage. Cela génère pendant 1,2 seconde un *Dual Input* allant jusqu'à annuler les ordres opposés des deux pilotes en roulis. Il faut ensuite 0,9 seconde au moniteur pour retrouver la maîtrise des commandes. Ainsi, le plan d'action initial du moniteur est contrarié. Il engage une manœuvre d'évitement par la droite 2,1 secondes après sa correction initiale. Il n'y a pas de communication au sein de l'équipage durant ces instants d'urgence, ce qui ne leur permet pas de partager leurs intentions.

2.3.2.4. Surprise du moniteur

Le rythme annuel de vol du moniteur est soutenu. La semaine de l'évènement est consécutive à trois semaines de permissions et il a réalisé trois vols dans la journée précédant l'évènement. Lors de la mission, le moniteur chef de patrouille assume les fonctions de commandant de bord, de leader pour son équipier et de formateur pour le pilote stagiaire.

La mission programmée correspond à un stade avancé de la formation du pilote stagiaire et l'équipier est particulièrement aguerri aux vols de formation de l'ETR. Les conditions étant remplies pour effectuer les exercices exigeants attendus à ce moment de la progression du pilote stagiaire, le moniteur est sollicité par la conduite d'une mission assez dense, qui est sujette à plusieurs aléas climatiques et des contraintes temporelles. Même si les tâches qui lui incombent sont classiques, prises une à une, leur accumulation et les besoins de réorientation des exercices en cours de mission induisent toutefois une charge de travail importante pour le moniteur chef de patrouille pouvant provoquer une certaine fatigue cognitive.

La reconfiguration de la mission pour effectuer un entraînement BFM change significativement la charge de travail du moniteur chef de patrouille, ainsi que la nature de son implication. En effet, une fois la confirmation de l'activité validée avec l'équipier, l'exercice concentre la charge de travail essentiellement sur le pilote stagiaire qui a reçu la direction de la séquence et l'équipier. Le moniteur chef de patrouille se retrouve en supervision d'un exercice considéré comme une brique de savoir-faire de base du pilote de chasse et pour lequel il a confiance en son stagiaire.

Après avoir été très actif pendant les phases de reconfiguration successives de la mission, le moniteur prend du recul sur la conduite de l'aéronef et de la mission lors de l'exercice de BFM en retrouvant une position de supervision. Il est alors placé dans une situation propice à un effet de surprise face à une situation inattendue, comme lors de la manœuvre d'évitement du stagiaire par la droite.

La confiance élevée du moniteur dans les compétences de son équipier, ainsi que le stade avancé de formation de l'élève favorisent la planification d'une mission assez dense.

L'implication du moniteur change de nature au cours du vol, après avoir été actif pendant les phases de reconfiguration successives, il supervise l'exercice de BFM. Ce changement est propice à un effet de surprise.

2.3.2.5. Conscience de la situation par l'équipier

L'équipier perçoit un conflit des trajectoires des deux appareils lors de la sortie de la boucle. Environ 9 dixièmes de seconde après la correction initiale par le moniteur dans l'autre Rafale, il relâche son action à cabrer et initie brièvement un début d'action en roulis à gauche, puis très rapidement, met du roulis à droite au maximum. En effet, la trajectoire inattendue du Rafale leader, en roulis à droite, surprend l'équipier qui doit alors modifier sa stratégie d'évitement. Il effectue une forte action à piquer, certainement dans le but de retrouver de l'efficacité aux commandes à basse vitesse et de séparer les trajectoires des deux avions.

Le délai qui en résulte, ainsi qu'une action simultanée à piquer des deux appareils, ne permettent pas de séparer efficacement les trajectoires. Engagé au final dans une tentative d'évitement par la droite, l'équipier annonce « à droite » à la radio pour se coordonner avec l'autre appareil. Il demande un ordre à cabrer maximum (dépassement de la butée élastique) à son appareil, mais ne dispose alors plus de marge de manœuvre.

L'équipier est surpris par la trajectoire du Rafale leader qui perturbe sa stratégie d'évitement. De plus, les actions à piquer simultanées des deux appareils les maintiennent sur des trajectoires convergentes. Deux secondes environ avant l'abordage, l'équipier est engagé dans une tentative d'évitement par la droite et termine en cabrant au maximum son appareil.

2.3.3. Ergonomie

2.3.3.1. Ergonomie des informations de sommation et de priorité

Hors vols de formation des pilotes Rafale à l'ETR, le besoin d'information sur la sommation des commandes est rare car la fonction de navigateur en place arrière ne nécessite généralement pas d'intervention aux commandes et les vols à deux pilotes ne font généralement pas l'objet de reprise de commandes. Le voyant Σ ne présente alors pas d'intérêt majeur.

En formation à l'ETR, l'information de sommation des commandes prend son sens car les vols sont effectués avec deux pilotes.

L'analyse de 15 vols à l'ETR montre que les voyants Σ et PRIO ne sont souvent pas perçus par les équipages. L'ergonomie de ces voyants n'aide pas les équipages à prendre conscience de leurs actions simultanées sur les commandes. Elle ne contribue pas efficacement à ce que les moniteurs se rendent compte d'un défaut d'engagement de la gâchette de priorité de leur part et pour les stagiaires de l'intervention sur les commandes du moniteur.

Lors de la phase de BFM, quand le moniteur intervient pour changer la trajectoire du pilote stagiaire, il n'engage pas la gâchette de priorité dans un premier temps. Très probablement, il ne perçoit pas l'allumage du voyant Σ indiquant des ordres de pilotage dans le poste avant qui contrarient ses actions.

L'ergonomie de l'alerte de *Dual Input* dans les appareils civils comporte l'allumage d'un voyant pour chaque pilote, ainsi qu'une alerte sonore (et parfois un dispositif de retour haptique³⁷ avec une mise en vibration des manches de pilotage). Son but est d'alerter immédiatement que les membres d'équipage pilotent en *Dual input*.



Figure 31 : visualisation des voyants Σ et PRIO

L'ergonomie des voyants de sommation et de priorité sur Rafale biplace rend l'information difficilement perceptible pendant les vols d'instruction au combat durant lesquels le regard des pilotes est majoritairement dirigé vers l'extérieur.

Ces voyants ne contribuent pas à alerter les pilotes du Rafale leader d'un phénomène de *Dual Input* lors de la tentative de séparation des trajectoires.

2.3.3.2. Ergonomie de la gâchette de priorité

La gâchette de priorité est située sur la partie avant basse du mini-manche. Elle est facilement accessible en tenant ce mini-manche à pleine main, avec une préemption de tous les doigts (position que l'on appellera « conventionnelle » dans ce rapport). Elle fonctionne en bouton poussoir à ressort, se désenclenchant dès la fin de la pression des doigts.



Figure 32 : pré-positionnement conventionnel de la main et gâchette de priorité sur le mini-manche

³⁷ Utilisant le sens du toucher.

Le mini-manche étant très sensible, le pilote qui n'est pas aux commandes peut provoquer des mouvements parasites lors des phases de vol sous facteur de charge. Le fait de pré-positionner la main autour du manche, mais sans le toucher, permet d'éviter ces actions parasites.

Il apparaît que dans certains cas, même avec la main positionnée de manière conventionnelle sur le mini-manche, la gâchette peut être insuffisamment pressée par les pilotes pour prendre la priorité sans qu'ils n'en prennent conscience. Avec un pré-positionnement conventionnel de la main autour du mini-manche, dans le cas d'une reprise de commandes urgente avec de grandes amplitudes en tangage vers l'avant ou l'arrière, ainsi qu'en roulis à droite, la préhension naturelle de la main sur le manche facilite l'engagement de la gâchette de priorité. En revanche, il est possible d'imprimer au mini-manche de très fortes amplitudes de roulis à gauche par une simple pression latérale de la paume de la main sans agripper le mini-manche. Dans ce cas, la gâchette de priorité n'est pas actionnée.

Il est possible de saisir le mini-manche de manière conventionnelle sans toutefois engager la gâchette de priorité. Par ailleurs, une action en roulis à gauche est moins favorable à l'engagement de la gâchette de priorité qu'une action en roulis à droite.

2.3.4. Gestion du risque lié au *Dual Input*

2.3.4.1. Perception par les équipages du risque lié au *Dual Input*

L'enquête met en évidence que les pilotes Rafale connaissent le phénomène de *Dual Input*, et notamment l'interdiction en cas d'urgence de reprendre les commandes sans engager la gâchette de priorité conformément à la documentation en vigueur³⁸. Les moniteurs questionnés à l'ETR estiment que ce phénomène est très rare en instruction, voire qu'il est difficile de reprendre en main le mini-manche sans presser naturellement la gâchette de priorité et donc pensent ne pas effectuer de sommation des commandes. Or, sur les 15 vols à l'ETR étudiés par le BEA-É, 12 faisaient l'objet de situations de *Dual Input*. Ce phénomène est donc plus fréquent que ce dont ils ont conscience.

Certaines configurations de pilotage entraînent une perception évidente du *Dual Input* sans avoir besoin de se référer au voyant Σ , alors que d'autres masquent facilement le *Dual Input*. Il est très probable que cela crée chez les moniteurs Rafale un sentiment erroné de maîtrise du *Dual Input* qui, s'ajoutant à la perception difficile du voyant Σ , leur fait sous-estimer son importance.

Au moment de l'accident, la communauté Rafale n'a pas conscience de l'occurrence élevée des évènements de sommation des commandes se produisant lors des vols d'instruction. Il est très probable que les pilotes Rafale aient un sentiment de maîtrise du phénomène de *Dual Input* les amenant à sous-estimer le risque associé et l'importance du voyant Σ .

2.3.4.2. Formation des moniteurs Rafale

Les moniteurs Rafale sélectionnés pour servir à l'ETR sont expérimentés, à la fois sur Rafale et sur le plan de la pédagogie de formation. Ils ont servi en escadron de chasse Rafale et y ont effectué des phases d'instruction. Toutefois, l'instruction en escadron opérationnel est réalisée essentiellement, soit au sol (cours, briefings, simulateurs), soit dans des appareils distincts en vol. Les vols en équipage à deux se faisant majoritairement avec un pilote et un navigateur et rarement avec deux pilotes, la probabilité d'occurrence de sommation des commandes est donc très faible. Les pilotes Rafale de la Marine nationale volent quant à eux sur Rafale monoplace.

Lors de leur propre parcours de formation, ces pilotes ont suivi une formation initiale réalisée sur des appareils à commandes de vol mécaniquement liées entre les postes de pilotage (planeurs, Cirrus SR 22, Pilatus PC-21, T45 Goshawk, etc.). Seul leur passage comme pilote stagiaire à l'ETR peut les avoir confrontés au *Dual Input*, mais ils n'y sont pas sensibilisés de manière systématique. En effet, la priorité étant alors sélectionnée pour le poste arrière du moniteur, les stagiaires ne sont que peu concernés par la gestion des commandes entre les deux postes. Enfin, leur perception des interventions des moniteurs sur les commandes sans engagement de

³⁸ *Rafale Basic User Manual* : manuel d'utilisation du Rafale.

la gâchette de priorité étant soit évidente, soit difficilement détectable, ils ne prennent pas conscience des cas marginaux.

Avant leur arrivée à l'ETR, les moniteurs Rafale ne sont donc que très peu confrontés ou sensibilisés au *Dual Input*, seule la phase de leur transformation comme moniteur à l'ETR peut les y préparer. Le principe de fonctionnement des commandes par priorité ou sommation est abordé au sol. L'un des quatre vols de transformation comporte un item à ce sujet sans mettre en exergue les risques liés au *Dual Input*.

Les pilotes de Rafale sont rarement exposés au phénomène de sommation des commandes durant l'instruction qu'ils ont suivie, comme durant leur affectation en escadron opérationnel. La transformation pour devenir moniteur à l'ETR aborde peu les risques liés au *Dual Input*.

2.3.4.3. Suivi du phénomène de *Dual Input* pour la flotte Rafale

Les données récupérées et restituées pour le débriefing après les vols des Rafale ne contiennent pas d'information sur l'allumage du voyant Σ . Il est nécessaire d'effectuer la comparaison de plusieurs paramètres liés aux commandes de vol pour reconstruire les cas d'allumages de ce voyant.

Le système de restitution de mission après vol permet un rejeu performant des vols Rafale, notamment pour les vols de l'ETR qui font l'objet d'un débriefing pédagogique. Ce rejeu permet notamment de construire une frise temporelle faisant ressortir des actions tactiques clés se produisant pendant le vol. Les phases de sommation des commandes n'apparaissent pas sur cette frise.

Il n'est pas demandé aujourd'hui aux équipages Rafale de rendre compte systématiquement après les vols des phases de sommation des commandes qui se sont produites, ni d'en faire une analyse de sécurité. Le recensement des cas de *Dual Input* n'existe pas au sein de l'armée de l'Air et de l'Espace sur la flotte Rafale. Ce sujet est très peu traité par la chaîne sécurité des vols. Seule la documentation trace l'interdiction en cas d'urgence de reprendre les commandes sans engager la gâchette de priorité.

Dans le transport aérien civil, le *Dual Input* fait l'objet d'actions préventives et correctives des exploitants et des organismes de sécurité des vols lorsqu'il se produit car il est considéré comme générateur de risques.

Les occurrences de *Dual Input* ne sont pas restituées par le système et ne font donc pas l'objet d'un suivi systématique sur la flotte Rafale.

2.4. Eléments non liés à l'évènement mais ayant trait à la sécurité

Sans objet.

PAS DE TEXTE

3. CONCLUSION

L'évènement est un abordage entre deux Rafale dans une phase de vol de combat rapproché à vue. #MAC³⁹

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

Le 14 août 2024, au retour d'une phase d'instruction au ravitaillement en vol au-dessus de l'Allemagne, une patrouille de deux Rafale biplace de l'ETR, l'un avec un pilote stagiaire et son moniteur et l'autre avec un seul pilote à bord, effectue une percée aux instruments dans les zones de Nancy afin de réaliser l'exercice d'attaque air-sol planifié en basse altitude puis de revenir vers la base de Saint-Dizier. Rencontrant des conditions météorologiques défavorables et disposant d'une autonomie en carburant suffisante, la patrouille fait demi-tour et remonte dans les zones de Nancy où elle demande un espace aérien ségrégué en moyenne altitude pour effectuer des passes de tir canon air-air simulées au profit de l'équipier. À l'issue, la patrouille réalise un entraînement d'opportunité au combat rapproché à vue (*Basic Fighter Maneuvers*). Lors de l'engagement, les deux Rafale se croisent face à face et partent en boucle dans le plan vertical. Après s'être croisés sur le dos au sommet de la boucle, les deux appareils se retrouvent dans des trajectoires conflictuelles lors de la phase de descente. Durant les 3,5 dernières secondes enregistrées, alors que les trajectoires sont convergentes et que les aéronefs sont à faible vitesse et haute incidence, un *Dual Input* au sein du Rafale leader engendre une trajectoire non maîtrisée pendant 1,2 secondes. Le moniteur parvient ensuite à engager une manœuvre d'évitement 0,9 seconde après. Dans l'urgence, il n'y a pas de communication au sein de l'équipage permettant de partager leurs intentions. La trajectoire inattendue du Rafale leader provoque un effet de surprise pour l'équipier dans sa propre manœuvre d'évitement d'urgence. Les deux Rafale se percutent « ventre à ventre ».

L'équipier s'éjecte après l'abordage, le moniteur et le pilote stagiaire décèdent dans l'abordage sans s'éjecter. Les deux aéronefs sont détruits.

3.2. Causes de l'évènement

L'abordage entre les deux aéronefs peut s'expliquer par une perception non partagée de la situation :

- La manœuvre du pilote stagiaire qui cherche à réduire son désavantage tactique en refermant sa trajectoire en direction de l'autre appareil, ce qui l'oriente vers une zone de croisement incertain.
- Le choix par le pilote stagiaire d'une trajectoire de croisement par la droite qui peut s'expliquer par sa difficulté à actualiser ses références de *Time to Collision* acquises et consolidées sur PC-21.
- La tentative par le moniteur de corriger la trajectoire sous forte contrainte temporelle, sans engager la gâchette de priorité alors que le pilote stagiaire continue d'agir sur les commandes. Ce *Dual input* d'1,2 seconde va jusqu'à annuler les actions opposées en roulis rendant inefficaces leurs manœuvres d'évitement et provoquant une perte temporaire de maîtrise de la trajectoire.
- Une probable incompréhension passagère de la réaction de l'avion qui en découle au sein de l'équipage, pendant 0,9 seconde, avant la reprise effective des commandes par le moniteur.
- La surprise de l'équipier qui perturbe son anticipation de la trajectoire du leader et en conséquence sa propre manœuvre d'évitement.

Un certain nombre de causes concourent à l'évènement :

- Les difficultés d'évaluation des trajectoires relatives des aéronefs sous très forte incidence, ce qui rend délicat l'anticipation de la zone conflictuelle.
- L'ergonomie des voyants de sommation et de priorité sur Rafale biplace qui rend l'information difficilement perceptible notamment pendant un vol d'entraînement au combat aérien rapproché à vue.
- Un sentiment de maîtrise du phénomène de *Dual Input* amenant à sous-estimer le risque associé et l'importance du voyant de sommation.
- Une formation des moniteurs à l'ETR qui aborde peu les risques liés au *Dual Input*.
- La difficulté de mise en œuvre des consignes d'anti-abordage en entraînement au combat aérien rapproché à vue.

³⁹ MAC : *collisions between aircraft while both aircraft are airborne*, abordage en vol, selon la taxonomie du système de déclaration des données sur les accidents et incidents aériens de l'organisation de l'aviation civile internationale (OACI).

PAS DE TEXTE

4. RECOMMANDATIONS DE SÉCURITÉ

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

4.1.1. Ergonomie de l'indication de sommation des commandes

Le voyant Σ de sommation des commandes sur Rafale est difficilement perceptible notamment en entraînement au combat rapproché à vue. Dans une phase de vol à faible manœuvrabilité, il n'a pas permis à l'équipage de prendre conscience rapidement qu'il perdait la maîtrise de la trajectoire en effectuant un *Dual Input* lors de la phase d'évitement.

Les procédures verbales de passation des commandes entre les pilotes, si elles constituent des fondamentaux à conserver dans l'absolu, ne sont pas suffisantes sous fortes contraintes temporelles.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'autorité technique DGA, en relation avec l'armée de l'Air et de l'Espace et Dassault Aviation, d'étudier une modification de l'ergonomie de l'information de sommation des commandes pour améliorer sa perception.

R1 – [A-2024-19-A] Destinataire : DGA

4.1.2. Gestion organisationnelle du risque lié au *Dual Input*

Les données de vol accessibles par l'exploitant ne permettent pas d'identifier directement les cas d'allumage du voyant Σ et de l'exploiter en débriefing. Ceci favorise la faible gestion organisationnelle des risques liés à la sommation des commandes sur la flotte Rafale B et l'absence de perception des nombreux cas de *Dual Input* en formation à l'ETR. Au moment de l'évènement, la gestion du risque lié à la sommation des commandes se limite à une mention d'interdiction en cas d'urgence dans la documentation. Le cursus de formation des moniteurs à l'ETR aborde peu les risques liés au *Dual Input*.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'autorité technique DGA, en lien avec l'armée de l'Air et de l'Espace, d'ajouter un marqueur de l'information de sommation des commandes dans les données disponibles après les vols pour mesurer les occurrences de *Dual Input* sur la flotte Rafale B.

R2 – [A-2024-19-A] Destinataire : DGA

à l'armée de l'Air et de l'Espace, de mettre en œuvre une politique de gestion du risque liée au *Dual Input*, incluant notamment une plus grande attention lors de la formation des équipages et en s'appuyant sur le traitement des évènements de sommation des commandes sur Rafale B.

R3 – [A-2024-19-A] Destinataire : CEMAEE

4.1.3. Gestion de l'anti-abordage

Il est probable que le parcours du pilote stagiaire sur PC-21, à l'issue de sa formation initiale, lui ait donné des références de *Time to Collision* consolidées sur PC-21 et très différentes sur Rafale, en particulier lors des exercices de BFM à basse vitesse. Les difficultés d'évaluation des trajectoires relatives des aéronefs sous très forte incidence rendent délicate l'anticipation de la zone conflictuelle.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'armée de l'Air et de l'Espace, d'étudier un renforcement du processus d'acquisition des références de *Time to Collision* dans la transformation sur avion de combat en particulier des pilotes ayant suivi un parcours long sur un autre appareil.

R4 – [A-2024-19-A] Destinataire : CEMAEE

L'enquête montre que la séparation minimale de 1 000 ft entre aéronefs prévue dans les règles d'emploi n'est pas précisément évaluable par les pilotes Rafale effectuant des exercices de BFM. Les performances et capacités de manœuvre du Rafale peuvent dans certaines phases du combat amener les aéronefs à passer sous cette distance tout en adoptant des trajectoires sécurisées. Ces points affaiblissent l'applicabilité de la règle.

L'ETR, suite à l'évènement, a mis en place une procédure de croisement étagé de 1 000 ft avant les exercices de BFM pour faire visualiser aux pilotes l'espacement correspondant à la bulle de sécurité. La notion d'espacement minimal ne permet pas de garantir à elle seule la sécurisation des trajectoires. Il est nécessaire de s'appuyer plus en détail sur des procédures utilisant le placement du vecteur vitesse, la description des phases de combat à risques, l'utilisation éventuelle du système d'armes ou les choix de trajectoires passant systématiquement en aval de l'autre appareil dans les cas de doute vis-à-vis de l'abordage.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'armée de l'Air et de l'Espace en relation avec la Marine nationale, de poursuivre les réflexions sur la gestion de l'anti-abordage en combat à vue pour l'adapter aux spécificités des évolutions en vol des appareils.

R5 – [A-2024-19-A] Destinataire : CEMAAE

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

4.2.1. Enregistreur de vol

Les données audio ne sont pas enregistrées dans les ESPAR. Les travaux d'analyse de l'enquête ont été complexifiés par les difficultés et les délais liés à la récupération partielle des données des EVN qui ne sont pas résistants aux chocs et aux incendies. L'enregistrement des données audio est prévu dans le nouvel enregistreur de vol (DFDR-V2)⁴⁰ du Rafale, ce qui bénéficiera aux analyses de sécurité aérienne.

En conséquence, le BEA-É recommande :

à l'autorité technique DGA, d'étudier le retrofit de la flotte Rafale avec le nouvel enregistreur de vol.

R6 – [A-2024-19-A] Destinataire : DGA

⁴⁰ Digital Flight Data recorder.