



Incident grave survenu à l'Airbus A320
immatriculé **9H-EMU** exploité par Airhub Airlines
le lundi 23 mai 2022
à l'approche de l'aéroport Paris-Charles de Gaulle (95)

Les enquêtes de sécurité

Le BEA est l'autorité française d'enquêtes de sécurité de l'aviation civile. Ses enquêtes ont pour unique objectif l'amélioration de la sécurité aérienne et ne visent nullement la détermination des fautes ou responsabilités.

Les enquêtes du BEA sont indépendantes, distinctes et sans préjudice de toute action judiciaire ou administrative visant à déterminer des fautes ou des responsabilités.

Synopsis

Heure	Vers 11 h 40 ¹
Exploitant	Airhub Airlines (exploitant maltais) ²
Nature du vol	Transport commercial de passagers, vol régulier
Personnes à bord	Commandant de bord (PF), Copilote (PM), 4 membres d'équipage de cabine, 172 passagers
Conséquence et dommage	Aucun

Transmission d'un calage altimétrique (QNH) erroné par le service de contrôle, quasi-collision avec le sol lors d'une procédure d'approche satellitaire avec guidage vertical barométrique

L'équipage de l'Airbus A320 immatriculé 9H-EMU réalisait le vol régulier NSZ4311 entre les aéroports de Stockholm Arlanda (Suède) et Paris-Charles de Gaulle (CDG, France). L'ILS de la piste 27R de CDG était en travaux, l'équipage a donc réalisé une approche satellitaire avec guidage vertical barométrique RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV.

Lors de l'approche, sous une averse de pluie qui dégradait fortement la visibilité, l'équipage a reçu du service de contrôle une valeur de calage altimétrique (QNH) erronée de 10 hPa (1 011 hPa au lieu de 1 001).

Une erreur de calage altimétrique engendre une différence entre l'altitude réelle de l'avion et l'altitude affichée. Pour les approches avec guidage vertical barométrique, le plan de descente et le guidage vertical associé sont ainsi affectés. En utilisant une valeur de QNH supérieure de 10 hPa à sa valeur réelle, l'approche a été conduite sur un plan de descente parallèle à celui publié, décalé vers le bas d'environ 280 ft (85 m).

La conception des procédures IFR repose sur des opérations normales et ne prend donc pas en compte une erreur de calage altimétrique. Les procédures opérationnelles des équipages et celles des contrôleurs aériens n'ont pas permis de prévenir l'usage d'un calage altimétrique erroné. De plus, ni les instruments de l'avion ni les outils du contrôleur aérien n'étaient prévus pour détecter ce type d'erreur.

À faible hauteur, une alerte sol de proximité avec le relief (MSAW) s'est déclenchée dans la tour de contrôle. Plusieurs secondes plus tard, le contrôleur a informé l'équipage de la situation en utilisant une phraséologie incorrecte et inadaptée. L'équipage n'a pas entendu cette annonce et a continué la descente.

Après avoir atteint l'altitude indiquée correspondant aux minima retenus, l'équipage a remis les gaz car il n'avait pas acquis les références visuelles permettant de poursuivre l'atterrissage. Au cours de la manœuvre, la hauteur radio-altimètre minimale enregistrée et corrigée était de 6 ft, soit environ 2 m, alors que l'avion était à environ 0,9 NM du seuil de piste, en dehors des limites

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

² L'avion est exploité sous un contrat de location avec équipage (contrat couramment appelé affrètement ACMI) entre Norwegian Air Sweden (affréteur) et Airhub Airlines (fréteur).

de CDG. Conformément aux spécifications du système, aucune alerte bord de proximité avec le sol (TAWS) n'a été déclenchée. L'équipage a indiqué dans son témoignage ne pas avoir eu conscience de ce rapprochement avec le sol.

La deuxième approche a également été réalisée avec le même QNH erroné. Cette fois-ci, l'équipage a acquis le contact visuel avec le sol, à plus de 600 ft de hauteur. Le PF a corrigé la trajectoire et a atterri sans autre incident.

Le BEA a émis douze recommandations de sécurité, six recommandations de sécurité émises dans le [rapport préliminaire](#) du 11 juillet 2022, et six recommandations de sécurité supplémentaires dans le présent rapport. Ces dernières concernent notamment :

- la réévaluation globale du risque de collision avec le sol et des mesures de mitigation associées en lien avec la menace d'un calage altimétrique erroné pour les procédures d'approche baro-VNAV ;
- le maintien du niveau de sécurité des opérations d'approche en Europe à l'horizon 2030 en lien avec le [règlement d'exécution \(UE\) 2018/1048 de la Commission du 18 juillet 2018 fixant des exigences pour l'utilisation de l'espace aérien et des procédures d'exploitation concernant la navigation fondée sur les performances](#), dit « IR-PBN » ;
- les systèmes sol de détection d'une erreur de calage altimétrique ;
- les systèmes bord d'avertissement et d'alarme d'impact (TAWS) ;
- la formation des contrôleurs aériens en réaction à une alerte MSAW ;
- le système de gestion de la sécurité de la DSNA.

Table des matières

Les enquêtes de sécurité	2
Synopsis	3
Table des matières.....	5
Glossaire	7
Organisation de l'enquête	14
1 RENSEIGNEMENTS DE BASE	16
1.1 Déroulement du vol	16
1.2 Tués et blessés	21
1.3 Dommages à l'aéronef	21
1.4 Autres dommages	21
1.5 Renseignements sur le personnel	21
1.6 Renseignements sur l'aéronef	36
1.7 Renseignements météorologiques.....	55
1.8 Aides à la navigation	58
1.9 Télécommunications	73
1.10 Renseignements sur l'aérodrome et la navigation aérienne	75
1.11 Enregistreurs de vol	88
1.12 Renseignements sur l'épave et sur l'impact	88
1.13 Renseignements médicaux et pathologiques.....	88
1.14 Incendie	88
1.15 Questions relatives à la survie des occupants.....	88
1.16 Essais et recherches	88
1.17 Renseignements sur les organismes et la gestion.....	89
1.18 Renseignements supplémentaires	108
1.19 Techniques d'enquête utiles ou efficaces	120
2 ANALYSE	121
2.1 Introduction	121
2.2 Communication et insertion de l'information de CALAGE ALTIMÉTRIQUE	122
2.3 Conscience de la situation de l'équipage	125
2.4 Analyse de l'activité des contrôleurs aériens.....	127
2.5 Système sol d'alerte de proximité du relief (msaw).....	129
2.6 Système bord d'avertisseur de proximité du sol (taws)	132
2.7 Systèmes sol et bord détectant une erreur de calage altimétrique.....	133
2.8 Prise en compte insuffisante de la menace d'un calage altimétrique erroné pour les approches satellitaires avec guidage vertical barométrique.....	133
2.9 Évaluation des impacts sur la sécurité liés aux changements induits par le règlement IR-PBN.....	135
3 CONCLUSIONS	137
3.1 Faits établis par l'enquête.....	137
3.2 Facteurs contributifs	140
3.3 Enseignements de sécurité	141

4	MESURES DE SÉCURITÉ PRISES DEPUIS L'INCIDENT GRAVE	143
4.1	Airhub airlines	143
4.2	DSNA	143
4.3	Airbus	144
4.4	DSAC.....	145
4.5	Autres mesures prises par différentes organisations.....	145
5	RECOMMANDATIONS DE SÉCURITÉ	147
5.1	Recommandations de sécurité du rapport préliminaire	147
5.2	Nouvelles recommandations de sécurité	148

Glossaire

Abréviations	Version Anglaise	Version Française
AAL	Above Aerodrome Level	Au-dessus du niveau de l'aérodrome
ABAS	Aircraft-Based Augmentation System	Système de renforcement embarqué
ACARS	Aircraft Communication Addressing and Reporting System	Système embarqué de communications d'adressage et de compte rendu
ACCREP	Accredited Representative	Représentant accrédité
ACO	Auto-callouts	Annonces automatiques sonores
ADI	Aerodrome Control Instrument	Contrôle d'aérodrome aux instruments
ADIRU	Air Data Inertial Reference Unit	
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance – Broadcast	Surveillance dépendante automatique en mode diffusion
AESA (EASA)	European Union Aviation Safety Agency	Agence de l'Union européenne pour la sécurité aérienne
AIP	Aeronautical Information Publication	Publication d'information aéronautique
ALTSM	Altimeter setting monitor	
AMC	Acceptable Means of Compliance	Moyens acceptables de mise en conformité
APCH	Approach	Approche
APM	Approach Path Monitor	Surveillance de trajectoire d'approche
APS	Approach Control Surveillance	Contrôle d'approche de surveillance
APV	Approach Procedure with Vertical guidance	Procédures d'approche avec guidage vertical
ATC	Air Traffic Control	Contrôle de la circulation aérienne
ATIS	Automatic Terminal Information Service	Service automatique d'information de région terminale
ATM	Air Traffic Management	Gestion du trafic aérien
ATPL	Airlines Transport Pilot Licence	Licence de Pilote de ligne
BAAI	Bureau of Air Accident Investigation	Autorité d'enquête de sécurité de Malte
Baro-VNAV	Barometric Vertical Navigation	Navigation verticale barométrique

Abréviations	Version Anglaise	Version Française
BEA		Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la sécurité de l'aviation civile
BKN	Broken	Nuages morcelés
BOREAL		Balisage opérationnel avec retour d'état et d'alarme
BPS	Barometric Pressure Setting	Réglage de la pression barométrique
CAM-BTA	Corrected Altitude Monitor Below Transition Altitude	
Cb		Cumulonimbus
CBT	Computer Based Training	Formation assistée par ordinateur
CDB		Commandant de bord
CDFA	Continuous Descent Final Approach	Approche finale à descente continue
CDG		Charles de Gaulle
CE (EC)	European Commission	Commission européenne
CEAC (ECAC)	European Civil Aviation Conference	Conférence Européenne de l'Aviation Civile
CFIT	Controlled Flight Into Terrain	Vol contrôlé dans le relief
CLS		Commission locale de sécurité
Contrôleur Ass LOC (TWR)		Assistant-contrôleur tour
Contrôleur INI		Contrôleur d'approche initiale
Contrôleur ITM		Contrôleur d'approche intermédiaire
Contrôleur LOC (TWR)		Contrôleur tour
CPL	Commercial Pilot Licence	Licence de pilote commercial
CRM	Crew Ressource Management	Gestion des ressources de l'équipage
CVR	Cockpit Voice Recorder	Enregistreur phonique
CVS	Combined Vision System	Système de vision combinée
DA/H	Decision Altitude/Height	Altitude/Hauteur de décision
DAP	Downlink Aircraft Parameters	Paramètres de l'avion en liaison descendante
DAR	Direct Access Recorder	Enregistreur de maintenance
D-ATIS	Data link-Automatic Terminal Information Service	Service automatique d'information de région terminale par liaisons de données
DECOR		Données environnement contrôle pour Paris-Orly et CDG

Abréviations	Version Anglaise	Version Française
DGAC		Direction Générale de l'Aviation Civile
DME	Distance Measuring Equipment	Radio-transpondeur de mesure de distance
DSAC		Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile
DSNA		Direction des Services de la Navigation Aérienne
DSNA/DO		Direction des Opérations
DSNA/DSEC		Direction de la Sécurité
DSNA/DTI		Direction de la Technique et de l'Innovation
EFB	Electronic Flight Bag	Système de documentation électronique
EFIS	Electronic Flight Instruments System	Système d'instruments de vol électroniques
EFVS	Enhanced Flight Vision System	Système de vision de vol amélioré
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service	Système européen de navigation par recouvrement géostationnaire
EGPWS	Enhanced Ground Proximity Warning System	Système d'alerte de proximité du sol amélioré
EHS	Enhanced Surveillance Mode S	Surveillance renforcée mode S
EIS	Electronic Instruments System	Système d'instruments électroniques
ENAC		École Nationale de l'Aviation Civile
EPAS	European Plan for Aviation Safety	Programme européen pour la sécurité de l'Aviation civile
ETSO	European Technical Standards Order	Arrêté sur les normes techniques européennes
FAA	Federal Aviation Administration	Autorité des États-Unis en charge de l'Aviation civile
FAF	Final Approach Fix	Repère d'approche finale
FCOM	Flight Crew Operating Manual	Manuel d'exploitation du personnel navigant
FCU	Flight Control Unit	Bandeau de contrôle du vol
FD	Flight Director	Directeur de vol
FDM	Flight Data Monitoring	Analyse de vol
FDP	Final Descent Point	Point de descente finale
FDR	Flight Data Recorder	Enregistreur de paramètres
FH		Facteurs humains
FL	Flight Level	Niveau de vol

Abréviations	Version Anglaise	Version Française
FLS	FMS Landing System	Système de gestion de l'atterrissage FMS
FLS	FMS Landing System	Système de gestion de l'atterrissage FMS
FLTA	Forward Looking Terrain Avoidance	Évitement du relief explorant vers l'avant
FMA	Flight Modes Annunciator	Annonceur de mode
FMGS	Flight Management and Guidance System	Système de gestion et de guidage du vol
FMS	Flight Management System	Système de gestion du vol
FNE		Fiche de Notification des Événements
FPA	Flight Path Angle	Angle de la trajectoire de vol
FSAU		Formation aux situations anormales et d'urgences
FSTD	Flight Simulation Training Device	Simulateur de vol
FWC	Flight Warning Computer	Calculateur d'alerte de vol
GBAS	Ground-Based Augmentation System	Système de renforcement au sol
GLS	GBAS Landing System	Système d'atterrissage GBAS
GM	Guidance Material	Document d'orientation
GMS	Ground Movement Surveillance	Surveillance des mouvements au sol
GNSS	Global Navigation Satellite System	Système mondial de navigation par satellite
GPS	Global Positioning System	Système de positionnement par satellite
HBN		Hauteur de la base des nuages
IAF	Initial Approach Fix	Repère d'approche initiale
IAS	Indicated Air Speed	Vitesse indiquée
IATA	International Air Transport Association	Association internationale du transport aérien
ICNA		Ingénieur contrôleur de la navigation aérienne
IFR	Instrument Flight Rules	Règles de vol aux instruments
ILS	Instrument Landing System	Système d'atterrissage aux instruments
IMC	Instrument Meteorological Conditions	Conditions météorologiques de vol aux instruments
IRBA		Institut de Recherche Biomédicale des Armées
ISIS	Integrated Standby Instrument System	Système intégré d'instruments de secours

Abréviations	Version Anglaise	Version Française
ITES		Instance de Traitement des Événements Significatifs
LC	Line Check	Contrôle en ligne
LNAV	Lateral Navigation	Mode de guidage latéral
LOC	Localizer	
LOSA	Line Operations Safety Audit	Audits de sécurité des opérations en ligne
LPC	Licence Proficiency Check	Contrôle de compétence sur les licences
LPV	Localizer Performance with Vertical guidance	
LVP	Low Visibility Procedure	Procédure de faible visibilité
Manex		Manuel d'exploitation
MAPt	Missed Approach Point	Point d'approche interrompue
MDA/H	Minimum Descent Altitude/Height	Altitude/Hauteur minimale de descente
MEL	Minimum Equipment List	Liste minimale d'équipement
METAR	Meteorological Aerodrome Report	Message d'observation météorologique régulière d'aérodrome
MLS	Microwave Landing System	Système d'atterrissage hyperfréquences
MMR	Multi Mode Receiver	Récepteur multimode
MOPS	Minimum Operational Performance Standard	Spécifications de performances opérationnelles minimales
MSAW	Minimum Safe Altitude Warning	Alerte sol de proximité du relief
NALS	No Approach Lighting System	Pas de système de balisage d'approche
ND	Navigation Display	Écran de navigation
NDB	Non-Directional Beacons	Radio-phare non directionnel
NES		Notification d'Événement Significatif
NOTAM	NOtice To AirMen	Avis aux navigants aériens
NOZ	Normal Operating Zone	Zone d'évolution normale
NPA	Non-Precision Approach	Approche de non-précision
NPA	Notice of Proposed Amendment	Avis de proposition de modification
NTSB	National Transportation Safety Board	Autorité d'enquête de sécurité des États-Unis
NTZ	Non-Transgression Zone	Zone de non-transgression
OACI (ICAO)	International Civil Aviation Organization	Organisation de l'Aviation Civile Internationale

Abréviations	Version Anglaise	Version Française
OCH	Obstacle Clearance Height	Hauteur de franchissement des obstacles
OJTI	On the Job Training Instructor	Instructeur de formation en entreprise
OPC	Operator Proficiency Check	Contrôle hors ligne
PA	Precision Approach	Approche de précision
AP	AutoPilot	Pilote automatique
PANS-ATM	Procedures for Air Navigation Services - Air Traffic Management	Procédures pour les services de navigation aérienne - Gestion du trafic aérien
PANS-OPS	Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations	Procédures pour les services de navigation aérienne - Exploitation des aéronefs
PAPI	Precision Approach Path Indicator	Indicateur de pente d'approche
PBN	Performance Based Navigation	Navigation basée sur la performance
PC		Premier contrôleur
PCU (UCS)	Unit Competence Scheme	Plan de Compétence en Unité
PDA	Premature Descent Alert	Alerte de descente prématurée
PdD	Descent Path	Plan de Descente
PF	Pilot Flying	Pilote aux commandes
PFD	Primary Flight Display	Écran de vol primaire
PFU (UTP)	Unit Training Plan	Plan de Formation en Unité
PM	Pilot Monitoring	Pilote surveillant
PPS (SPP)	Standard Practices and Procedures	Pratiques et procédures standards
QT (TR)	Type Rating	Qualification de type
RA	Radio Altimeter	Radio-altimètre
RAD	Aerodrome Radar Control	Contrôle radar d'aérodrome
RNAV	Area Navigation	Navigation de surface
RNP	Required Navigation Performance	Performance de navigation requise
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics	Commission technique des radiocommunications pour l'aéronautique
RVR	Runway Visual Range	Portée visuelle de piste
RVSM	Reduced Vertical Separation Minimum	Minimum de séparation verticale réduit
SADE		Stage d'adaptation à l'exploitant
SBAS	Satellite-Based Augmentation System	Système de renforcement satellitaire

Abréviations	Version Anglaise	Version Française
SCT	Scattered	Nuages épars
SD	System Display	Écran des systèmes
SCT	Scattered	Nuages épars
SD	System Display	Écran des systèmes
SDF	Sted Down Fix	Repère de descente
SHRA	Shower Rain	Averse de pluie
SIA		Service de l'information aéronautique
SIL	Service Information Letter	Lettre d'information de service
SLS	SBAS Landing System	Système d'atterrissage SBAS
SOP	Standard Operating Procedure	Procédure opérationnelle standard
STC	Supplemental Type Certificate	Certificat de type supplémentaire
STCA	Short Term Conflict Alert	Filet de sauvegarde
STD		Standard
TAWS	Terrain Awareness and Warning System	Système bord d'avertisseur de proximité du sol
TCF	Terrain Clearance Floor	Plancher de dégagement du relief
TDZ	Touch Down Zone	Zone de toucher
TEM	Threat and Error Management	Gestion des menaces et des erreurs
TLB	Technical Log Book	Compte rendu matériel
TMA	Terminal Manoeuvring Area	Région de contrôle terminale
TOGA	Take-Off Go-Around	Décollage/Remise des gaz
TWR	Tower	Tour
UTC	Universal Time Coordinated	Temps universel coordonné
VD	Vertical Display	Écran vertical
VMC	Visual Meteorological Conditions	Conditions météorologiques de vol à vue
VNAV	Vertical Navigation	Mode de guidage vertical
VOR	VHF Omnidirectional Range	
VSD	Vertical Situation Display	Affichage de la situation verticale

Organisation de l'enquête

L'incident grave est survenu le 23 mai 2022 vers 13 h 40 locales. Une fiche de notification d'événement (FNE) a été rédigée le jour même par le contrôleur tour. Le lendemain, l'organisme de contrôle de Paris-Charles de Gaulle a envoyé aux autorités françaises, dont le BEA, une notification d'événement significatif (NES) pour cette quasi-collision avec le sol.

Sur la base des premières informations factuelles collectées, le BEA a ouvert une enquête de sécurité pour cet incident. Conformément à l'Annexe 13 à la Convention relative à l'Aviation Civile Internationale et au règlement européen (UE) n° [996/2010](#) relatif aux enquêtes et la prévention des accidents et des incidents dans l'aviation civile, le BEA a informé le 25 mai 2022 de l'ouverture de l'enquête de sécurité :

- l'Autorité d'enquête de Malte, le *Bureau of Air Accident Investigation* (BAAI), en tant qu'état d'immatriculation et d'exploitation de l'avion ;
- Airbus, le constructeur de l'avion ;
- la Direction des Services de la Navigation Aérienne (DSNA) de la Direction Générale de l'Aviation Civile française (DGAC), le prestataire de service de la navigation aérienne ;
- la Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile (DSAC) de la DGAC ;
- l'Agence de l'Union européenne pour la sécurité aérienne (AESA) ;
- l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI).

Le BAAI a nommé un représentant accrédité accompagné de conseillers techniques de l'exploitant aérien Airhub Airlines.

Du 24 mai au 31 mai, l'équipe d'enquête a consolidé les premières informations obtenues à partir de données complémentaires issues des données de vol, des témoignages de l'équipage et des contrôleurs aériens.

L'événement a été reclassé « incident grave » le 31 mai 2022 du fait de la proximité avérée avec le sol (quasi-collision), sans référence visuelle extérieure, et en l'absence de conscience de la situation tant côté pilotes que contrôleurs.

Un [rapport préliminaire](#) a été publié le 11 juillet 2022 par le BEA :

- au vu de la gravité de l'événement ;
- pour recommander de façon urgente aux acteurs de premières lignes de l'incident grave de mettre en place des mesures de sécurité immédiate ;
- pour une prise de conscience collective sur le risque de collision avec le sol engendré par un calage altimétrique erroné ;
- pour encourager les différents acteurs institutionnels à lancer les études appropriées et définir les actions de sécurité associées.

Six recommandations de sécurité ont été émises à destination des services de la navigation aérienne de l'aéroport Paris-Charles de Gaulle et à destination de l'exploitant aérien Airhub Airlines.

Par la suite, quatre groupes de travail ont été constitués pour déterminer et recueillir les renseignements nécessaires à l'enquête dans les domaines suivants : opérations aériennes, gestion du trafic aérien (ATM), systèmes bord et sol, navigation basée sur la performance (PBN).

Les entités suivantes ont également été sollicitées au cours de l'enquête :

- l'Autorité d'enquête de sécurité des États-Unis d'Amérique (*National Transportation Safety Board*, NTSB) qui a nommé un représentant accrédité accompagné de conseillers techniques de l'équipementier Honeywell pour le TAWS, de Boeing et de l'autorité des États-Unis en charge de l'Aviation civile, également en charge de la navigation aérienne (*Federal Aviation Administration*, FAA) ;
- la Commission européenne (CE).
- Eurocontrol ;
- Météo-France ;
- l'Association du transport aérien international (*International Air Transport Association*, IATA) ;
- l'Institut de Recherche Biomédicale des Armées (IRBA) ;
- l'équipementier Aviation Communication & Surveillance Systems (ACSS).

Le projet de rapport final a été soumis pour consultation aux représentants accrédités et à leurs conseillers, conformément à l'article 6.3 de l'Annexe 13 de l'OACI. Il a également été envoyé à la Commission européenne, l'AESA, la DSAC, la DSNA, l'OACI, Eurocontrol, Airbus et Météo-France.

1 RENSEIGNEMENTS DE BASE

1.1 Déroutement du vol

Note : les informations suivantes sont issues des enregistrements des radiocommunications, des données radar, des données de l'enregistreur de paramètres DAR, des témoignages de l'équipage et des contrôleurs aériens. Les données du CVR n'ont pas été préservées.

L'équipage de l'Airbus A320, effectuant le vol NSZ4311 (indicatif Red Nose 4311), décolle le 23 mai 2022 vers 9 h 30 de l'aéroport Stockholm Arlanda (Suède) à destination de l'aéroport Paris-Charles de Gaulle (CDG). Le commandant de bord est PF, le copilote est PM.

Avant la descente, l'équipage prépare une procédure d'approche satellitaire avec un guidage vertical barométrique, en l'occurrence une procédure RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV, pour la piste 27R de CDG car l'ILS est hors service. Les informations météorologiques incluses dans l'ATIS Q (*Automatic Terminal Information Service*) utilisé par l'équipage pour la préparation de l'approche sont les suivantes :

Niveau de transition 70, vent 280° 10 kt, visibilité 10 km, nuages fragmentés à 1 500 ft, température 19 °C, point de rosée 14 °C, QNH 1 001 hPa.

L'équipage a indiqué dans son témoignage qu'il est resté pendant toute l'approche dans les nuages, sans références visuelles, avec des turbulences modérées et sous une averse de pluie ce qui l'a conduit à utiliser la vitesse élevée des essuie-glaces.

1.1.1 Transmission à l'équipage d'un calage altimétrique (QNH) erroné par la contrôleuse d'approche intermédiaire (ITM)

À 11 h 32 min 24, alors que l'avion est en approche vers CDG, la contrôleuse ITM autorise l'équipage à descendre à 6 000 ft et lui transmet une valeur de QNH erronée de 1 011 hPa au lieu de 1 001 hPa alors en vigueur³ : « *Red Nose 4 3 1 1 descend ... descend ... 6,000 feet 1 0 1 1* ». Le PM collationne avec le QNH fourni : « *6,000 feet 1 0 1 1 ... 1 ... 0 1 1 ... Red Nose 4 3 1 1* ».

À 11 h 34 min 28, elle autorise l'équipage à descendre à 5 000 ft en répétant le QNH erroné et l'autorise à l'approche RNP : « *Red Nose 4 3 1 1 descend 5,000 feet 1 0 1 1 cleared full R N P 2 7 right* ». Le PM collationne l'information et le QNH erroné : « *Descend 5,000 feet Q N H 1 0 1 1 cleared full R N P approach 2 7 right Red Nose 4 3 1 1* ».

À 11 h 35 min 37, la contrôleuse ITM autorise un équipage easyJet à descendre à 5 000 ft et lui fournit le même QNH erroné : « *Easy 7 5 Mike Alpha direct Papa Golf 6 5 0 ... and descend 5,000 ft 1 0 1 1 cleared RNP approach 2 7 right* ». L'équipage easyJet ne collationne pas correctement le message car il collationne le QNH valide de 1 001 hPa : « *Direct to Papa Golf 6 5 0 descend 5,000 ft QNH 1 0 0 1 Easy 7 5 Victor Alpha* ». Cela n'est pas relevé par la contrôleuse.

À 11 h 36 min 04, la contrôleuse ITM autorise en français un équipage Air France à descendre à 5 000 ft avec le QNH correct de 1 001 hPa : « *Air France trente-cinq Alpha Juliette bonjour descendez cinq mille pieds mille un et guidage R N P vingt-sept droite* ». L'équipage d'Air France

³ Les conditions météorologiques indiquées dans l'ATIS S en vigueur étaient les suivantes : vent 280°/9 kt, visibilité 10 km, nuages épars 1 600 ft, fragmentés 2 800 ft, peu de Cumulonimbus 5 000 ft, température 18 °C, point de rosée 15 °C, QNH 1 001 hPa.

collationne correctement le message, y compris le QNH 1 001. Deux autres transmissions, en anglais, du QNH correct suivront pendant que le NSZ4311 est encore sur cette fréquence.

À 11 h 36 min 55, l'équipage du vol NSZ4311 atteint le repère d'approche finale (*Final Approach Fix*, FAF) à une altitude indiquée de 4 889 ft QNH 1 011 (4 623 ft QNH 1 001) et à environ 14,3 NM du seuil de piste. La vitesse indiquée (*Indicated Airspeed*, IAS) est de 185 kt et l'avion est configuré en CONF 2. Le mode FINAL APP est engagé.

Environ une minute plus tard, la contrôleuse ITM demande à l'équipage de contacter le contrôleur aérien de la tour Nord (LOC N).

NOTE : Du fait du calage altimétrique erroné, l'altitude affichée sur les instruments de l'avion est environ 280 ft au-dessus de l'altitude réelle de l'avion. L'équipage a donc réalisé l'approche avec un plan de descente environ 280 ft plus bas que prévu et attendu, sans en avoir conscience.

1.1.2 Quasi-collision avec le sol

À 11 h 38 min 09, l'équipage contacte le contrôleur LOC N qui lui répond : « *Bonjour Red Nose 4 3 1 1 you are number 1 wind 2 6 0 degrees 12 knots runway 2 7 right cleared to land* ». L'équipage collationne correctement la clairance.

À 11 h 38 min 44, à une hauteur de 2 500 ft et conformément à leur fonctionnement, les valeurs des radio-altimètres (RA) s'affichent sur les écrans de vol primaires (*Primary Flight Display*, PFD).

À 11 h 40 min 49, à une altitude indiquée de 1 395 ft QNH 1 011 (1 123 ft QNH 1 001, 836 ft RA) correspondant à l'altitude de stabilisation pour l'équipage (1 000 ft au-dessus de l'aérodrome) et à une distance de 3,1 NM du seuil de piste, l'avion est en configuration atterrissage CONF FULL, à une vitesse indiquée de 139 kt égale à la vitesse d'approche cible sans que les commandes de poussée des moteurs soient sur plein réduit, et avec une vitesse verticale de -738 ft/min.

NOTE : nonobstant le fait que la trajectoire de l'avion n'est pas sur le plan de descente correct, l'approche peut être considérée comme stabilisée.

À 11 h 41 min 32, l'alerte sol de proximité du relief (*Minimum Safe Altitude Warning*, MSAW) se déclenche (voir **Figure 1**, Point ①) dans les systèmes de contrôle aérien. L'avion est à une altitude indiquée de 919 ft QNH 1 011 (645 ft QNH 1 001, 239 ft RA), à 1,5 NM du seuil de piste.

À 11 h 41 min 41, à 1,2 NM du seuil de piste et avec une vitesse verticale de -717 ft/min, l'avion passe l'altitude indiquée de 811 ft QNH 1 011 (537 ft QNH 1 001, 122 ft RA), ce qui correspond approximativement à l'altitude de décision⁴ (DA) de l'équipage (Point ②). Ce dernier a indiqué dans son témoignage qu'il a remis les gaz aux minima car il n'avait pas acquis de références visuelles extérieures.

Au même moment, soit environ neuf secondes après le déclenchement de l'alerte MSAW, le contrôleur LOC N avertit l'équipage : « *Red Nose 4 3 1 1 I just had a ground proximity alert are you okay do you see the runway* » (Point ②). L'équipage a indiqué dans son témoignage ne pas avoir entendu cette communication radio.

⁴ La politique de l'exploitant concernant les approches LNAV/VNAV est d'ajouter 50 ft aux minima publiés. Ainsi, d'après la carte NavBlue utilisée par l'équipage, la DA de l'équipage était de 802 ft (752 ft + 50 ft).

À 11 h 41 min 47, alors que le contrôleur finit son message et que l'avion se trouve à une altitude indiquée de 735 ft QNH 1 011 (461 ft QNH 1 001, 52 ft RA) et à 1 NM du seuil de piste, le pilote automatique (*AutoPilot*, AP) est désengagé et le CDB applique au mini-manche un ordre à cabrer proche de la butée (Point 3).

Trois secondes plus tard, à 11 h 41 min 50, à une altitude indiquée de 679 ft QNH 1 011 (405 ft QNH 1 001), la hauteur radio-altimètre minimale enregistrée et corrigée est de 6 ft alors que l'avion est à environ 0,9 NM du seuil de piste. L'assiette de l'avion est alors de 11° à cabrer. Au même moment, le CDB avance les manettes de poussée dans le cran TOGA (Point 4).

Aucune alerte bord de proximité du sol (*Terrain Awareness and Warning System*, TAWS) n'a été enregistrée lors de l'approche.

Les deux pilotes ont indiqué dans leur témoignage ne pas avoir entendu les annonces automatiques des radio-altimètres, à l'exception des annonces à 2 500 ft et 1 000 ft.

À 11 h 42 min 02, l'équipage annonce au contrôleur qu'il remet les gaz (Point 5). Ce dernier répond : « *Roger ... Red Nose 4 3 1 1 turn right on heading 3 6 0 and climb altitude 5 000 feet 1 0 0 1* ». L'équipage collationne en utilisant le QNH erroné précédent, ce qui n'est pas relevé par le contrôleur LOC N : « *3 6 0 and climb 5 000 feet on 1 0 1 1 Red Nose 4 3 1 1* » (Point 6).

Pendant ces messages, les contrôleurs en poste dans la tour ne voient toujours pas l'avion. Au bout de quelques secondes, ils l'aperçoivent sortir des nuages, à faible hauteur et avec une attitude à cabrer.

À 11 h 42 min 05, l'AP est réengagé à une altitude indiquée de 1 203 ft QNH 1 011 (930 ft QNH 1 001, 593 ft RA) et à 0,3 NM du seuil de piste.

Au même moment et pendant le message du contrôleur LOC N à l'équipage, l'assistant LOC S de la tour Sud⁵ informe l'assistant LOC N qu'ils n'ont pas allumé le balisage lumineux de la rampe d'approche de la piste 27R.

À 11 h 42 min 27, le contrôleur LOC N allume la rampe d'approche. À la suite de l'alerte MSAW et du non-allumage de la rampe d'approche de sa part, ce dernier se fait relever par son assistant LOC N et un nouvel assistant LOC N s'installe.

⁵ Au moment de l'incident et conformément aux procédures de CDG, chaque doublet de pistes (nord et sud) est géré par un binôme de contrôleurs : un LOC et un assistant LOC. Le binôme en charge du doublet nord est situé dans la tour Nord, le binôme en charge du doublet sud est situé dans la tour Sud.

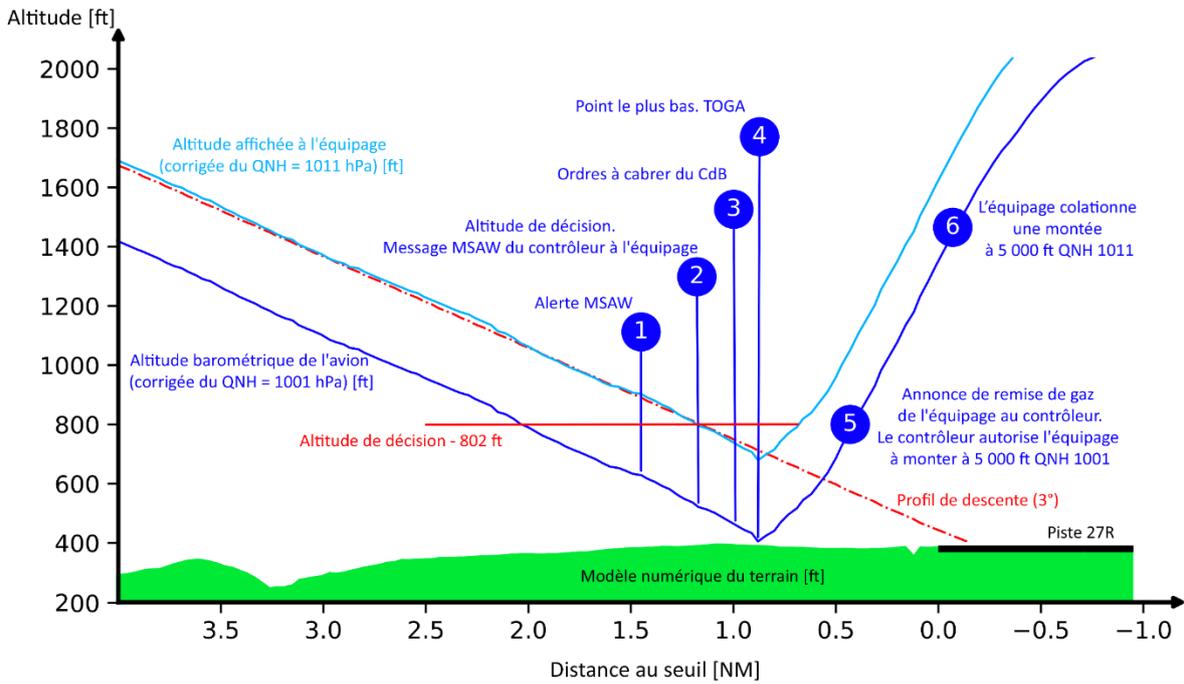


Figure 1 : plan de descente de la première approche, trajectoire calculée à partir des paramètres de vol enregistrés (Source : BEA)

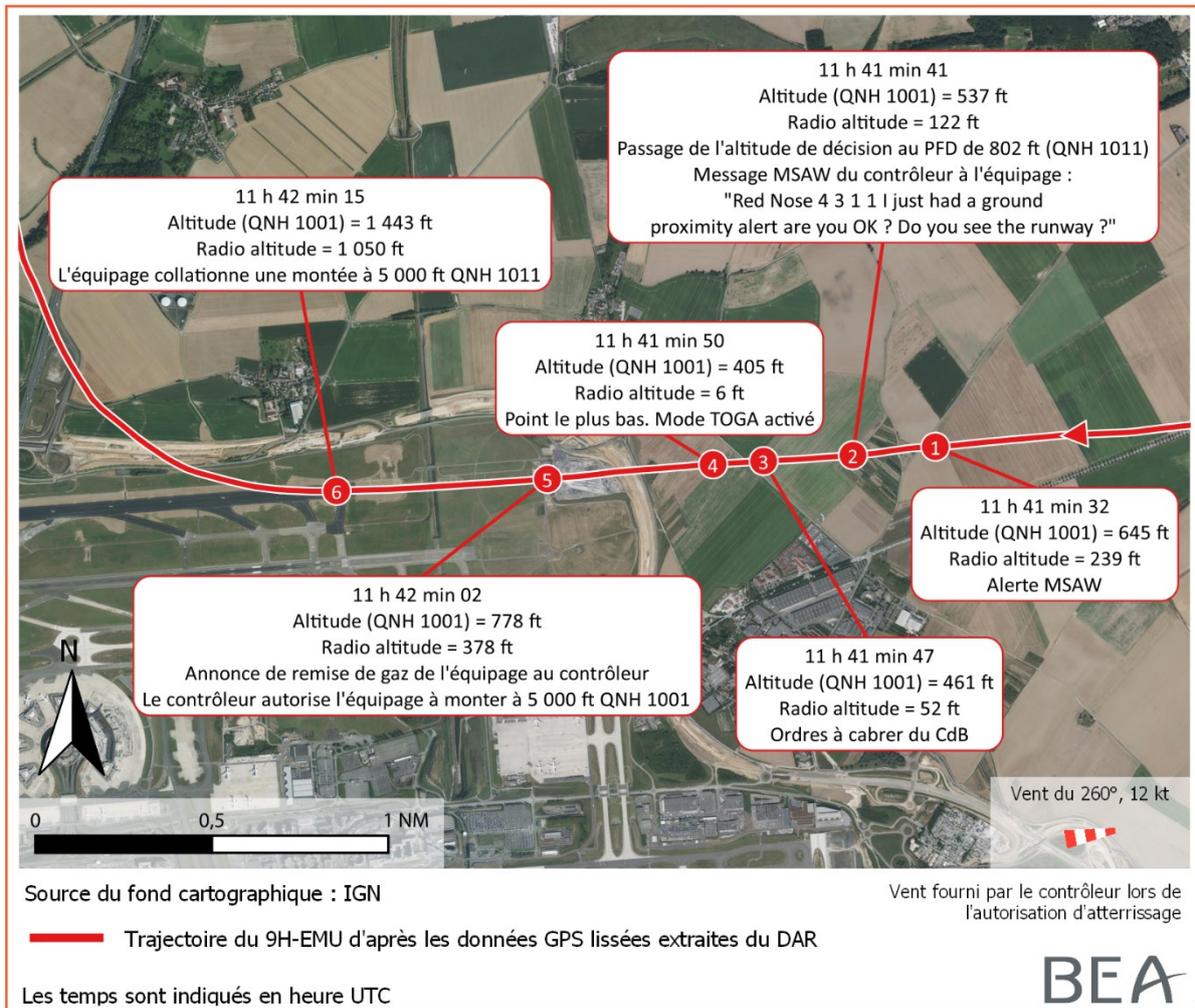


Figure 2 : trajectoire horizontale de la première approche

1.1.3 Deuxième approche

À 11 h 44 min 42 et après lui avoir donné plusieurs caps radar, le contrôleur LOC N demande à l'équipage de contacter l'arrivée (contrôleuse ITM) pour la deuxième approche. L'avion est en branche vent arrière pour la piste 27R. Une quinzaine de secondes plus tard, la contrôleuse ITM indique à l'équipage de prévoir une RNP 27R.

À 11 h 49 min 09, après avoir géré un conflit entre le vol NSZ4311 et un autre avion déclenchant le filet de sauvegarde (*Short Term Conflict Alert, STCA*) et nécessitant l'utilisation de la phraséologie d'urgence associée, la contrôleuse ITM autorise l'équipage à effectuer une deuxième approche RNP pour la piste 27R.

À 11 h 53 min 40, le contrôleur LOC N autorise l'équipage à atterrir. Celui-ci collationne et demande si la rampe d'approche est bien allumée, ce qui est confirmé par le contrôleur.

NOTE : l'avion vole toujours avec un calage altimétrique erroné. Ni l'équipage ni les contrôleurs aériens ne sont conscients de ce QNH erroné qui amène de nouveau l'avion sur un plan de descente plus bas d'environ 280 ft que celui publié.

Bien que réalisée sous le plan de descente nominal publié, l'approche réalisée en mode FINAL APP est de nouveau « stabilisée » pour l'équipage. L'avion est configuré pour l'atterrissage, à la vitesse d'approche de 140 kt et sous pilote automatique.

À 11 h 55 min 43, une nouvelle alerte MSAW se déclenche (voir **Figure 3**, Point 7). L'avion est, cette fois à une altitude indiquée de 1 403 ft QNH 1 011 (1 131 ft QNH 1 001, 842 ft RA), à 3,1 NM du seuil de piste.

Quatre secondes plus tard, le contrôleur LOC N (qui était en position d'assistant LOC N lors de la première approche) avertit l'équipage de l'alerte MSAW : « *Red Nose 4 3 1 1 I've just got a ... a terrain alert are you okay* » (Point 8).

L'équipage a indiqué dans son témoignage ne pas avoir compris la raison de ce message. Le PM répond : « *... Red Nose 4 3 1 1 we are well established on path and we have visual now* ».

À 11 h 56 min 00, à une altitude indiquée de 1 227 ft QNH 1 011 (954 ft QNH 1 001, 602 ft RA) et à 2,6 NM du seuil de piste, le PF applique un ordre à cabrer sur son mini-manche (Point 9). Simultanément, l'AP se déconnecte. Les directeurs de vol (*Flight Director, FD*) sont enlevés huit secondes plus tard.

L'équipage a indiqué dans son témoignage avoir cette fois acquis les références visuelles bien avant les minima.

Le PF corrige la trajectoire et atterrit sans autre incident à 11 h 57 min 14.

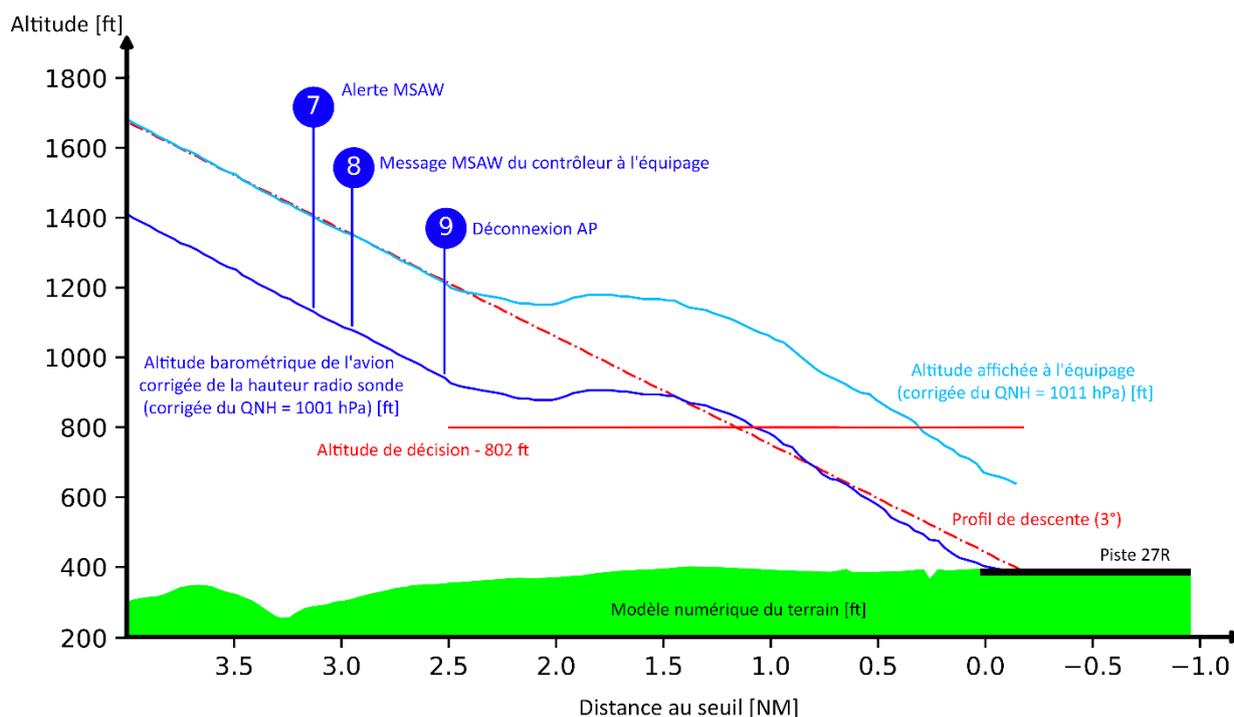


Figure 3 : plan de descente de la deuxième approche, trajectoire calculée à partir des paramètres de vol enregistrés (Source : BEA)

1.2 Tués et blessés

Sans objet.

1.3 Dommages à l'aéronef

Sans objet.

1.4 Autres dommages

Sans objet.

1.5 Renseignements sur le personnel

1.5.1 Équipage de conduite

Licence, Qualification, Stage, Contrôle

	Commandant de bord	Copilote
Âge, nationalité	37 ans, lituanien	42 ans, espagnol
Type de licence, délivrée le	ATPL(A) 23/11/2015	CPL(A) 13/10/2008
Première Qualification de Type (QT) A320 délivrée le	23/11/2015	2018
QT A320 valable jusqu'au	31/12/2022	28/02/2023
Aptitude médicale de classe 1 valable jusqu'au	23/03/2023	10/12/2022
Compétences linguistiques en anglais et date de validité	OACI NIVEAU 5 24/02/2024	OACI NIVEAU 6 Valide
Deux derniers contrôles hors ligne (Operator Proficiency Checks, OPC)	04/04/2022 27/10/2021	14/03/2022 26/08/2021

	Commandant de bord	Copilote
Contrôle de compétence sur les licences (<i>Licence Proficiency Check, LPC</i>) qui peut être combiné avec l'OPC	27/10/2021	27/02/2022
Dernier contrôle en ligne (<i>Line check, LC</i>)	05/12/2021	01/09/2021
Dernière formation sol	13/03/2022	06/06/2022

Expérience déclarée

	Commandant de bord	Copilote
Expérience totale / en tant que CDB (heures de vol - hdv)	5 878 / 2 529	2 221 / 481
Total sur type A320 / en tant que CDB (hdv)	5 878 / 2 529	947 / 0
Trois derniers mois (hdv)	143 h 58	95 h 38
Trente derniers jours (hdv)	62 h 39	48 h 04
Sept derniers jours (hdv)	19 h 06	19 h 06
Dernières 72 heures (hdv)	16 h 23	16 h 23
Dernières 24 heures (hdv)	4 h 20	4 h 20

Planning

Le jour de l'incident grave correspondait au dernier jour d'une séquence de vols de trois jours programmée pour le commandant de bord et le copilote. Auparavant, le copilote était en repos depuis le 5 mai 2022 et le CDB depuis le 3 mai 2022.

Date	Étapes (codes IATA)	Début du temps de service de vol (UTC)	Durée du vol
Avant le 20 mai	Repos	N/A	N/A
21 mai	ARN CTA	4 h 30	3 h 40
	CTA ARN		3 h 39
22 mai	ARN BUD	4 h 20	2 h 07
	BUD ARN		2 h 13
23 mai	ARN HEL	3 h 50	0 h 52
	HEL ARN		1 h 00
	ARN CDG		2 h 52
	CDG ARN		<i>Vol post-incident</i>
TOTAL	N/A	N/A	16 h 23

Il n'a pas été identifié d'écarts aux règles des temps de vol et repos applicables aux exploitants aériens commerciaux au travers des dispositions du règlement (UE) n° 965/2012 modifié dit « AIR OPS »⁶.

La dette de sommeil favorisée par la succession de trois levers précoces au cours des jours précédant l'incident, ainsi que dans une moindre mesure, l'enchaînement de trois vols au cours de la journée de l'incident, a pu contribuer à un possible état de fatigue légère ou modérée de l'équipage, sans que celui-ci en soit conscient.

⁶ Règlement de la Commission du 5 octobre 2012 déterminant les exigences techniques et les procédures administratives applicables aux opérations aériennes ([Version en vigueur le jour de l'incident grave](#)).

1.5.1.1 Commandant de bord (CDB)

Expérience professionnelle

Le CDB a effectué sa formation initiale en 2011. Il a ensuite été engagé par un exploitant en 2013 comme copilote sur A320. Il a été nommé CDB en 2018. Il a rejoint Airhub Airlines en octobre 2021 en tant que CDB. Il n'est pas salarié de l'exploitant et a un contrat en tant que travailleur indépendant.

Témoignage

Le CDB avait décidé d'être PF sur le vol vers CDG où il a l'habitude d'aller. Il ne s'est pas senti fatigué sur ce vol. Les conditions météorologiques prévues annonçaient des orages à l'arrivée. Il a ainsi décidé de prendre du carburant supplémentaire. Le vol s'est déroulé sans particularité. La communication avec le copilote était bonne, il avait déjà volé avec lui auparavant et il juge que la gestion des ressources de l'équipage (*Crew Resource Management, CRM*) était satisfaisante.

En croisière juste avant le début de descente, le copilote et lui ont consulté les informations de l'ATIS à tour de rôle et les ont notées sur un papier. Ils ont ensuite comparé leurs données et calculé les performances d'atterrissage à l'aide du système de documentation électronique (*Electronic Flight Bag, EFB*).

Ils ont commencé le briefing d'approche et revu les entrées du système de gestion de vol (*Flight Management and Guidance System, FMGS*) en prévision d'un atterrissage en piste 26L ou 27R. Les menaces identifiées étaient le mauvais temps et l'importance du trafic à CDG. Il précise que le manuel d'exploitation prévoyait pour les approches RNP une check-list supplémentaire à réaliser pendant le briefing avec notamment : la vérification de la précision GPS au niveau 100, les contrôles altitudes/distances aux différents points de contrôle de l'approche finale et la majoration des minima de 50 ft. D'après lui, ce briefing supplémentaire RNP avait été réalisé de façon satisfaisante car ils y sont habitués. Ils ont ensuite commencé la descente.

À la première clairance d'altitude vers 6 000 ft, ils ont reçu le QNH par le contrôleur aérien. Il se rappelle que le copilote a collationné le QNH et qu'il n'y a pas eu de correction par le contrôle. Il pense que si le contrôleur avait entendu un mauvais collationnement, il aurait réagi. Le CDB a donc pensé que le QNH fourni était correct et l'a entré au FCU. Ils ont ensuite vérifié la cohérence des altimètres. Il pense qu'il a reçu la valeur du QNH une seule fois jusqu'à la remise de gaz. Il indique également qu'il a tendance à faire confiance au contrôleur lorsque celui-ci fournit un QNH, d'autant plus que ce dernier a une information plus récente que celle de l'équipage récupérée via l'ATIS.

Il se souvient d'une certaine confusion dans les changements de fréquence avec l'ATC. Ils ont été ensuite autorisés à descendre à 5 000 ft et à procéder vers le point d'approche initial (*Initial Approach Fix, IAF*), puis autorisés à l'approche RNP. Il y avait du mauvais temps, le radar météo était sur « ON » et il voyait les cellules orageuses sur le radar. Néanmoins, l'approche se déroulait normalement.

Lors de l'approche finale, le copilote PM a vérifié la cohérence des altitudes-distance tous les nautiques et à chaque fois ils étaient sur le plan. Le FMGS était sur la page PROGRESS. L'approche était stabilisée. Ils étaient en permanence dans des nuages, sans référence visuelle.

Il indique que sur cet avion, les annonces automatiques sonores (*auto-callouts, ACO*) des radio-altimètres « HUNDRED ABOVE » et « MINIMA » ne sont pas prévues, et que ce sont donc des

annonces à faire par le PM. Il se rappelle avoir entendu une ACO à 2 500 ft et à 1 000 ft, mais pas les autres. Notamment, il ne se souvient pas avoir entendu les ACO « 50 » « 40 » « 30 » « 20 ». Il indique que sans référence visuelle extérieure et au niveau des minima, s'il avait entendu la séquence de telles annonces, il aurait immédiatement effectué une remise de gaz. Il ne se souvient pas non plus d'un message du contrôleur à propos d'une alerte de proximité avec le sol. Il indique qu'ils utilisaient tous les deux les casques audios standards de l'Airbus.

Ils n'ont pas vu le sol lors de l'approche. La pluie était intense et les essuie-glaces étaient sur la vitesse maximum. Aux minima et n'ayant toujours pas acquis le visuel, il a annoncé « *Go Around flaps* ». Le copilote a informé le contrôle de la remise de gaz. Pendant la remise de gaz, un autre pilote a dit sur la fréquence que la rampe d'approche était éteinte. Le contrôleur a répondu que c'était une erreur de leur part.

Pendant la remise de gaz, on leur a donné un cap 360 et on les a autorisés à monter à 5 000 ft. Dans ses souvenirs, le QNH n'a pas été mentionné à ce moment-là et le contrôleur n'a pas demandé la raison de la remise de gaz.

Ils sont alors passés avec l'approche. Il a fait une annonce aux passagers pour indiquer qu'ils avaient remis les gaz à cause du mauvais temps. Il a temporairement transféré les commandes au copilote, mis à jour le FMGS et réalisé un briefing rapide. Ils ont ensuite été autorisés vers l'IAF toujours à 5 000 ft. La deuxième approche s'est déroulée comme la première, avec notamment un contrôle altitude-distance tous les nautiques par le copilote. L'approche était de nouveau stabilisée.

Juste avant les minima, il a vu les lumières de la rampe d'approche, de la piste et de l'indicateur de pente d'approche (*Precision Approach Path Indicator, PAPI*). Dans ses souvenirs, il a vu une lumière blanche, une rose et deux rouges. Peut-être trois rouges, mais pas quatre. Il a déconnecté l'AP et les FD. Il pleuvait toujours et les essuie-glaces étaient toujours à vitesse élevée. Il corrigeait les rafales et la turbulence.

À peu près au même moment, le contrôleur les a avertis d'une alerte de proximité avec le relief et leur a demandé si tout allait bien. Le copilote a alors répondu qu'ils voyaient la piste et qu'ils allaient atterrir normalement.

Le contrôleur n'a plus mentionné quoi que ce soit ni indiqué que quelque chose s'était mal passé. Ils ont pensé qu'il y avait peut-être eu un problème technique à la tour. Ils ont alors contacté le sol et roulé jusqu'au parking. Pour lui, les opérations étaient normales. Ils ont ensuite préparé l'avion pour un retour vers Stockholm. Le vol vers Stockholm s'est déroulé sans particularité.

Deux jours après l'atterrissage à CDG, il a reçu un appel du chef pilote pour l'informer que les autorités françaises avaient ouvert une enquête en raison d'une alerte basse altitude reportée par les services de contrôle. Il n'a pas compris car pour lui c'était un vol sans événement particulier mis à part une remise de gaz aux minima, ce qui reste une opération normale.

1.5.1.2 Copilote

Expérience professionnelle

Le copilote a commencé à voler sur avion léger en 2008. Il a notamment été instructeur sur Cessna C172. Il a travaillé comme ingénieur de calibration de 2010 à 2018, période durant laquelle il a notamment effectué des évaluations de procédures d'approche RNP.

Il a commencé sa carrière de pilote de ligne en 2018 et a brièvement volé sur Boeing 737. Il a ensuite obtenu une qualification de type A320 puis a été employé par un exploitant européen jusqu'en 2019. Il n'a pas volé pendant plusieurs mois à cause de la pandémie du COVID-19, puis a rejoint l'exploitant GetJet Airlines en juillet 2021 et a suivi le module complémentaire permettant de voler chez l'exploitant Airhub Airlines en septembre 2021. Les deux exploitants ont quasiment les mêmes procédures. Il n'est pas salarié de l'exploitant et a un contrat en tant que travailleur indépendant.

Témoignage

Ils ont préparé le vol à destination de CDG. Les conditions météorologiques avaient été actualisées et prévoyaient à destination des orages et de la pluie, sans cisaillement de vent prévu. Il n'y avait pas de NOTAM particulier mis à part des ILS non disponibles. Ils ont alors vérifié les performances et les minima pour effectuer une approche RNP. Ils ont anticipé un atterrissage sur la piste 27R. D'un commun accord, ils avaient pris du carburant supplémentaire en raison des conditions météorologiques. Ils étaient prêts dès 8 h 55, mais ils ont reçu le créneau de 9 h 25 en raison des orages. Ils étaient déjà en retard, mais ne ressentaient aucune pression. Le vol s'est déroulé sans particularité. Il ne s'est pas senti fatigué sur ce vol. C'était la première fois qu'il allait à CDG avec cet exploitant. Il y était déjà allé à plusieurs reprises lorsqu'il travaillait pour un autre exploitant.

Il était PM sur le vol. En croisière, il a revu le FCOM et les approches RNP. À proximité de Reims, il a consulté l'ATIS de CDG et il a trouvé que la réception audio n'était pas bonne. Il a noté les informations sur l'EFB et son carnet papier personnel.

Il a calculé les performances d'atterrissage. Ils ont fait le briefing avec la check-list supplémentaire pour les approches RNP qu'il a l'habitude de passer en revue. Le briefing RNP prévoyait d'ajouter 50 ft aux minima. Les menaces identifiées étaient l'activité orageuse, la fréquence chargée et les pistes parallèles en opération spécialisée.

Après leur transfert avec le centre de contrôle en route de Reims, la fréquence est devenue chargée avec beaucoup de guidage radar des services de contrôle pour éviter les orages. Il ajoute qu'à certains moments la fréquence était difficilement audible et qu'il a dû demander deux fois le segment d'approche initiale. Pour lui, les conditions météorologiques étaient pires que ce qui était prévu ce jour-là à Paris.

Ils ont été pris en guidage radar et ils ont été autorisés en altitude en dessous du niveau de transition, peut-être vers 6 000 ft. Il ne se souvient plus exactement si le contrôleur a donné le QNH, mais il a collationné la clairance. Pour lui, s'il avait fait une erreur de collationnement, le contrôleur l'aurait rappelé pour corriger. Quand un contrôleur lui donne un QNH, il aime contre-vérifier avec ses notes de l'ATIS. Cette fois-là, il indique qu'il n'a pas eu le temps de le faire, probablement à cause de la charge de travail associée aux conditions météorologiques. Il précise toutefois que les SOP ne requièrent pas cette vérification. Rétrospectivement et après avoir écouté les radiocommunications de l'incident au BEA, il pense avoir peut-être hésité sur la valeur du QNH à utiliser.

Peu de temps après avoir été autorisés à l'approche RNP pour la 27R, ils ont été transférés à la tour. À 6 000 ft, ils étaient sans référence visuelle extérieure, avec de fortes précipitations.

Lors de l'approche, il regardait principalement le FMGS, les cartes d'approche sur l'EFB et les instruments. Il ne regardait pas dehors. Il a perçu que tout était gris et qu'il y avait des turbulences.

En tant que PM, il vérifiait l'adéquation altitude-distance tous les nautiques. Tout était cohérent et il n'y avait pas de panne, le système se comportait correctement. Il n'y avait pas de perte de signal et la précision GPS restait entre 0,3 et 1 NM conformément aux procédures. De plus, l'indicateur de déviation verticale (V/DEV) était à zéro. Il indique que le CDB et lui-même étaient satisfaits et que l'avion était correctement sur le plan.

Il indique avoir annoncé « *hundred above* » 100 ft au-dessus des minima. Juste avant les minima, il a regardé dehors. Il s'attendait à voir des lumières au sol ou la piste, mais ils sont restés sans références visuelles extérieures. Il a ensuite annoncé « *approaching minimum* » aux minima. Il ne se souvient pas avoir reçu un appel du contrôleur et précise que la charge de travail était élevée à l'approche des minima. Il ne se souvient pas avoir entendu d'*auto-callouts* mis à part celles à 2 500 et 1 000 ft.

Le CDB a alors annoncé « *Go-around flaps* » et ils ont effectué la remise de gaz. Il a reconfiguré l'avion, vérifié l'altitude et la vitesse verticale. Il a ensuite informé la tour qu'ils effectuaient une remise de gaz. Le contrôleur leur a donné une clairance en altitude et en cap qui différait de la procédure standard qu'ils avaient préparée lors du briefing. Il indique que c'est usuel à CDG et qu'ils s'attendaient à des guidages radar. Il ne se souvient pas qu'on leur ait donné le QNH. Il se concentrait sur la vitesse et l'altitude pendant la remise de gaz. Il vérifiait le FMA et il reconfigurait l'avion. Il précise que la charge de travail était importante et que tout se précipitait.

Ils ont effectué un palier à 5 000 ft, puis ont reçu d'autres caps radar. Ils ont réalisé un briefing rapide concernant la quantité de carburant restante et les points clés de la procédure d'approche RNP pour la piste 27R. Après avoir vérifié les minima, le pilote a activé la phase d'approche. Ils ont refait les items de la procédure de passage au niveau 100 et les altimètres ne montraient aucune différence. Le copilote indique qu'il a vérifié que les boutons-poussoirs ILS étaient bien en position OFF lors des deux approches.

À 5 000 ft, en branche vent arrière, ils ont reçu des caps d'interception puis ils ont recommencé l'approche. Ils avaient déjà réalisé la check-list approche. Ensuite, il a répété la même séquence de vérification que lors de la première approche : vérification de l'engagement des modes sur le FMA, vérification de la précision GPS, contrôles de la cohérence entre l'altitude et la distance au seuil de tous les nautiques, vérification que le V/DEV était bien centré à zéro et vérification de la bonne tenue de la vitesse.

Cette fois, ils sont sortis des nuages bien au-dessus des minima. Ils ont vu la piste et l'environnement. Il pense que lors de cette deuxième approche quelqu'un a demandé si la rampe d'approche était allumée.

Ils ont continué, ils avaient la piste en vue. Juste avant l'arrondi, le contrôleur leur a demandé si tout allait bien. Il a répondu qu'ils avaient visuel et qu'ils allaient atterrir. Il était surpris, il n'a pas compris pourquoi le contrôleur leur a posé cette question. Le contrôleur a poursuivi en leur indiquant qu'ils avaient eu une alerte relief. Il ne comprenait toujours pas et il a cru que c'était parce que le CDB avait réduit la vitesse ou qu'il y avait peut-être eu une rafale de vent, ou alors qu'il y avait eu un dysfonctionnement. Ils étaient tous les deux surpris de cette annonce d'alerte relief. Il ajoute qu'il ignore ce qu'est le système MSAW et que la documentation de l'exploitant ne le mentionne pas.

Ils ont atterri puis ont été transférés sur la fréquence sol pour rejoindre le terminal.

1.5.1.3 Charge de travail de l'équipage lors de l'approche

L'approche finale réalisée par l'équipage lors de l'incident grave a été effectuée sans références visuelles extérieures, sous une averse de pluie plutôt soutenue nécessitant le réglage des essuie-glaces sur la vitesse la plus élevée, et sans le balisage lumineux de la rampe d'approche.

L'approche finale est une phase de vol qui génère habituellement une forte charge de travail mental avec de nombreuses informations visuelles et auditives à traiter, et des prises de décisions à réaliser sous forte pression temporelle.

On note notamment pour les approches RNP que les contrôles et annonces d'altitude-distance sont fréquents et consommateurs de ressources mentales. Cela a notamment été constaté par l'équipe d'enquête lors des rejeux de l'incident grave au simulateur de vol (voir § 1.6.4).

Voici également quelques exemples d'approches réalisées de jour sans références visuelles extérieures et/ou sous la pluie, y compris avec les essuie-glaces en mode de vitesse élevée, afin de montrer au lecteur ce que représente une approche dans ces conditions. Toutes les approches ne sont pas effectuées sur Airbus A320.

- <https://www.youtube.com/watch?v=ySvfrRbqKc8>
- <https://www.youtube.com/watch?v=Sebt3x36LLE>
- <https://www.youtube.com/watch?v=nM13jpHrpjU>
- <https://www.youtube.com/shorts/pmPKxOypmNQ>
- <https://www.youtube.com/watch?v=LmbaaVIEv6Q>

1.5.2 Contrôleurs aériens de CDG

1.5.2.1 Informations générales

À CDG, les Premiers Contrôleurs (PC), c'est-à-dire les contrôleurs qui ont mené à bien leur formation en unité, sont titulaires d'une mention d'unité ZZ dite « finale ». Elle leur permet d'exercer leur fonction sur toutes les positions, tour et approche, à l'exception de celles de Chef de Tour et Chef de l'Approche qui nécessitent une ancienneté et une formation supplémentaire.

En tour de contrôle

En tour de contrôle, les positions possibles sont : Prévot, SOL, LOC, Ass LOC. Il y a aussi les positions Chef de Tour dans la tour Nord, et Coordinateur Vigie Sud (COOR VS) dans la tour Sud.

Position LOC/Ass LOC : Le contrôleur LOC est responsable de l'aire de manœuvre sur les pistes, les servitudes de piste et des voies de circulation entre les deux pistes d'un doublet. Il délivre, pour la piste ou le doublet de pistes dont il a la charge : les clairances de décollage, d'atterrissage et de traversée de piste, ainsi que les autorisations de pénétrer sur la piste et dans les servitudes. Il surveille et maintient les séparations interaxes, fournit aux équipages toutes les informations utiles pour les atterrissages et les décollages et attire l'attention du Chef de Tour notamment sur la nécessité d'allumer ou d'éteindre le balisage.

Le contrôleur assistant LOC (Ass LOC) a pour fonction de seconder le contrôleur LOC afin de permettre à ce dernier de concentrer ses ressources sur la gestion du trafic. Pour cela, l'Ass LOC se positionne à côté du contrôleur LOC et assure notamment des fonctions de coordination et de facilitation du travail du LOC (par exemple en attirant l'attention du contrôleur LOC sur les menaces telles que les évolutions météorologiques, un trafic particulier, etc.). Le binôme LOC/Ass LOC rend

le service de contrôle, le service d'information et le service d'alerte pour les aéronefs dans sa zone de responsabilité.

Lorsque la salle d'approche est ouverte et que les tours Nord et Sud sont ouvertes, l'armement est assuré par un binôme LOC/Ass LOC pour le doublet nord en tour Nord (LOC N/Ass LOC N) et un second binôme pour le doublet sud et l'hélistation en tour Sud (LOC S/Ass LOC S).

Position Chef de Tour : Le Chef de Tour est responsable en temps réel du fonctionnement de la structure de contrôle et de la fourniture des services de la circulation aérienne sur l'ensemble de la plate-forme de CDG. La tenue de la position Chef de Tour est assurée H24 depuis la tour Nord ou depuis la tour Centrale (notamment de nuit). La gestion en temps réel de la tour Sud est déléguée au COOR VS qui avertit le Chef de Tour en cas de problème. Un Chef de Tour (ou COOR VS en tour Sud) peut tenir une position de contrôle s'il peut reprendre ses fonctions rapidement en cas de nécessité.

Lors de l'incident grave : en accord avec le Manuel d'exploitation (Manex), le contrôleur en position LOC N assurait également la fonction de Chef de Tour. Un autre contrôleur occupait la position⁷ d'Ass LOC N, un troisième la position SOL et un quatrième la position PREVOL. Les postes physiques de ces contrôleurs sont situés directement contre les baies vitrées. En retrait dans la tour, un autre contrôleur disposant de la formation adéquate occupait le poste Chef de Tour, sans en assurer les fonctions, afin d'assurer les communications téléphoniques.

Le taux d'occupation de fréquence LOC N était inférieur à 18 % lors de l'incident grave.

En Salle d'Approche

En salle d'approche, les positions possibles sont : DEP (N/S), COOR DEP (N/S), INI (N/S), COOR INI (N/S), ITM (N/S/BA), Chef de l'Approche.

Positions d'approche intermédiaire (ITM) : Les contrôleurs ITM rendent les services de contrôle, d'information et d'alerte pour les aéronefs dont ils ont la responsabilité. Leur zone de responsabilité comprend les parties de la TMA Paris gérées par l'approche de CDG dans lesquelles évoluent les aéronefs à l'arrivée ou certains aéronefs au départ, après leur transfert par un autre secteur ou organisme, ainsi que les axes d'approche finale⁸ avant leur transfert au contrôleur LOC. Ils rendent les services de la circulation aérienne et assurent les fonctions radar « surveillance, assistance et guidage » pour les arrivées CDG et Le Bourget en fin d'approche initiale jusqu'au transfert au LOC et pour tout autre aéronef entrant dans leur zone de responsabilité. Ils appliquent entre autres les règles d'interception des approches parallèles indépendantes et assurent les séparations qui permettent de respecter les cadences à la piste et les séparations liées à la turbulence de sillage.

Le secteur ITM en salle d'approche est constitué de trois positions de contrôle, correspondant respectivement au secteur nord (ITM N), au secteur sud (ITM S) et au secteur concernant les arrivées et départs de l'aéroport Paris-Le Bourget ainsi que les autres aérodromes

⁷ Par commodité d'écriture, le terme « poste » désigne la position physique d'où le contrôleur exerce ses fonctions et le terme « position » désigne la zone géographique de compétence. Ex : « Les positions ITM N, ITM S et ITM BA étaient regroupées au poste ITM N ».

⁸ Ainsi que leur zone d'évolution normale (*Normal Operating Zone*, NOZ) et de non-transgression (*Non-Transgression Zone*, NTZ).

périphériques (ITM BA). Les positions peuvent être regroupées à la discrétion du Chef de l'Approche, dans la mesure où chaque ITM prend en compte moins de huit aéronefs.

Position Chef de l'Approche : Le Chef de l'Approche est le responsable en temps réel du fonctionnement de la structure de contrôle en salle d'approche et de la fourniture des services de la circulation aérienne dans l'ensemble des espaces aériens de CDG.

Lors de l'incident grave : au retour de sa pause déjeuner, la contrôleuse ITM mentionnée ci-après était installée sur le poste ITM Nord où étaient regroupées les trois positions ITM. Le premier échange avec le vol NSZ4311 a été fait dans cette configuration. Du fait d'un trafic plus important, un dégroupement a été réalisé à 11 h 31 et la contrôleuse a gardé les positions ITM N et BA.

Le taux d'occupation de fréquence ITM N + BA était inférieur à 50 % lors de l'incident grave.

1.5.2.2 Contrôleur ITM pour les deux approches

Licence, Qualification, Stage, Contrôle

Âge, nationalité	43 ans, française
Qualifications et mentions valides ⁹	ADI / (TWR, GMS, RAD), APS
Mentions d'unité	LFPG/ZZ
Date d'expiration des mentions	14 septembre 2023
Autres mentions et date d'expiration	EXA ¹⁰ valide jusqu'au 14 février 2023, OJTI/STDI ¹¹ valide jusqu'au 10 décembre 2023
Mention linguistique en anglais et date d'expiration	Niveau OACI 4 valide jusqu'au 25 mars 2023
Derniers stages de formation de maintien de compétences	FSAU/APP le 12 octobre 2020, stage FSAU/LOC le 31 mars 2022, stage PPS le 16 novembre 2021
Aptitude médicale	Valide

Expérience

À l'issue de sa formation initiale, la contrôleuse en position ITM N lors de l'incident grave a été affectée pendant six ans dans un centre de contrôle en route. Depuis 2007, elle est affectée à l'organisme de contrôle de Paris-Charles de Gaulle. Elle est qualifiée Premier contrôleur (PC) depuis 2009. Elle est qualifiée en tant qu'examinatrice depuis 2014. Elle a eu en outre une période de détachement de deux ans entre 2013 et 2015 à la subdivision Instruction.

Activités et services précédant l'incident grave

L'équipe de la contrôleuse ITM était en repos les deux jours ayant précédé celui de l'incident grave. La contrôleuse indique qu'elle était arrivée sur site vers 9 h 30 UTC et qu'elle a commencé sa période de service vers 11 h.

⁹ Voir glossaire.

¹⁰ Examinatrice.

¹¹ Instructrice.

Témoignage

Déroulement de l'incident grave

La contrôleuse indique ne pas avoir eu conscience d'une situation anormale lors de l'incident grave. Elle précise que l'équipage a réalisé son approche et qu'une alerte MSAW s'est déclenchée en courte finale. Elle n'était plus en contact radio avec l'équipage lors de celle-ci. Elle ajoute que cette alerte a été perçue par tout le personnel en salle d'approche car celle-ci se manifeste à la fois sur les écrans de visualisation et par une alerte sonore audible dans toute la salle. Cette alerte n'a pas eu de conséquence opérationnelle dans la salle d'approche car l'avion était déjà en contact avec la tour.

Elle se souvient que l'équipage a effectué une remise de gaz et est revenu sur sa fréquence d'approche ITM N+BA. L'avion était alors établi en vent arrière à 5 000 ft au cap 090°. Elle ajoute ne pas avoir été consciente que le calage altimétrique était erroné et avoir donné à l'équipage l'instruction « *continue as cleared* ». Elle précise ne pas avoir redonné le QNH car l'équipage s'était annoncé stable à 5 000 ft et était censé avoir déjà reçu cette information.

La contrôleuse indique avoir alors eu une alerte STCA (*Short Term Conflict Alert*) en raison d'un conflit potentiel de trajectoire entre le NSZ4311 et un autre avion qui était en contact avec le contrôleur ITM S et qui avait été autorisé à descendre à 4 000 ft pour l'ILS 26L. Elle relate qu'elle a alors appliqué la phraséologie d'urgence pour résoudre le conflit, de même que le contrôleur en position ITM S, ce qui a permis d'éviter de passer sous les normes de séparation.

Elle indique que l'équipage du NSZ4311 a réalisé une nouvelle approche et que l'alerte MSAW s'est à nouveau déclenchée. L'avion n'était plus sous sa responsabilité et n'était pas en contact radio avec elle. Elle a supposé qu'un problème technique était survenu à bord et que l'équipage allait peut-être se dérouter vers un autre aéroport. Elle a rempli une Fiche de notification des événements (FNE) au sujet du déclenchement du STCA. En effet, elle considérait, de même que les autres personnes présentes en salle d'approche, que le seul événement de sécurité significatif était celui impliquant le déclenchement du STCA avec l'utilisation de la phraséologie d'urgence.

Elle précise également que lors de cette journée, vers 13 h 20, il y a eu un autre événement de sécurité avec un conflit entre deux avions et déclenchement du STCA, suivi d'une perte de contrôle en vol d'un aéronef¹² qui a principalement attiré l'attention des contrôleurs aériens ce jour-là, avec relève et rejeu immédiat. Cela a pu, selon elle, atténuer la gravité perçue de l'incident grave du NSZ4311.

A posteriori

La contrôleuse indique qu'elle a été informée une semaine plus tard de la classification « quasi CFIT » de l'incident grave impliquant le NSZ4311. Elle a alors pris conscience du déroulement réel de l'événement et de sa gravité. Elle s'est par la suite entretenue de l'incident grave avec d'autres contrôleurs qui n'avaient pas non plus conscience de l'importance du QNH pour certaines approches RNP [Note : *plusieurs autres contrôleurs questionnés par le BEA lors de l'enquête ont indiqué la même méconnaissance*]. Elle note toutefois qu'un de ses proches, pilote chez Air France, était en revanche surpris de cette perception, car pour lui le QNH est un « *killer item* » lors des approches baro-VNAV.

¹² Il s'agit de l'[incident grave survenu au Beech 90 immatriculé F-HHAM et à l'Airbus A320 immatriculé D-AIZI exploité par Lufthansa survenu le 23/05/2022 vers Paris-Le Bourget \(77\)](#), pour lequel le BEA a ouvert une enquête de sécurité.

Avant l'incident grave, elle estimait que les points auxquels le contrôleur devait être particulièrement attentif lors d'une approche RNP par contraste avec une approche ILS étaient :

- le fait qu'il n'y ait qu'une seule altitude d'interception ;
- l'absence de possibilité de rattrapage du plan par le haut.

À propos de la première erreur de QNH, elle indique qu'il est possible qu'il y ait eu une confusion entre l'indicatif de vol épelé en langue anglaise « Red Nose 4 3 1 1 » et le QNH annoncé « 1 0 1 1 ». Elle précise aussi que « 1 0 1 1 » est plus simple à dire que « 1 0 0 1 ». Elle indique qu'habituellement elle regarde l'écran DECOR (voir § 1.10.3) où est affiché le QNH avant de l'annoncer à la fréquence. Toutefois, elle ne se souvient pas si elle l'a fait à cette occasion précise.

Concernant les deux autres erreurs de QNH qui ont suivi, avec le NSZ4311 puis avec un easyJet, elle indique qu'elle a pu avoir gardé en tête de manière inconsciente la « *musicalité* » du « 1 0 1 1 ».

Elle précise qu'elle n'était pas fatiguée, que la charge de travail n'était pas trop importante car les positions ITM étaient dégroupées.

Elle ajoute qu'à la suite de l'incident grave, elle a consulté la fiche réflexe APPROCHE FINALE RNP CDG pour ITM qui est disponible sur position et qu'elle consulte rarement car les contrôleurs sont habitués à autoriser des RNP. Cette fiche prescrit de donner le QNH au moment d'autoriser la finale RNP. Toutefois, selon elle, personne ne le fait. Elle indique que le QNH est donné obligatoirement lors de la première clairance en altitude, quel que soit le type d'approche, et éventuellement par réflexe aux clairances d'altitude suivantes.

À propos de la possibilité de détecter une incohérence entre l'altitude affichée à l'écran radar et la trajectoire supposée de l'avion, elle indique que, même si le palier à 5 000 ft avait été plus long, elle ne pense pas qu'elle aurait remarqué une anomalie lors de la première approche. Elle n'a en effet pas détecté une incohérence d'altitude lors de la dizaine de minutes où elle l'avait en fréquence en palier à 5 000 ft entre la remise de gaz et la deuxième approche. Elle ajoute qu'elle n'a pas utilisé le bouton « Alt » d'affichage de l'altitude au QNH¹³ des avions (voir § 1.10.3.2).

À propos de la procédure en cas d'alerte MSAW, elle déclare ne pas savoir comment y réagir et ne pas se souvenir de la phraséologie standard [*Note : plusieurs autres contrôleurs questionnés par le BEA lors de l'enquête ont indiqué la même méconnaissance*]. Elle pense qu'en cas de déclenchement de MSAW, elle imposerait une remise de gaz. Elle note que cette alerte est peu fréquente et qu'elle concerne le plus souvent des aéronefs qui ne sont pas en contact avec CDG, notamment pour des approches sur l'aéroport du Bourget. Ainsi, le déclenchement d'une alerte MSAW n'éveille pas d'inquiétude particulière pour les contrôleurs de CDG. Elle se rappelle avoir eu un briefing ou une formation lors de la mise en place du système MSAW. Elle n'en a plus eu depuis.

¹³ Ceci est confirmé par le rejeu réel des données radars.

1.5.2.3 Contrôleur LOC N pour la première approche

Licence, Qualification, Stage, Contrôle

Âge, nationalité	46 ans, français
Qualifications et mentions valides	ADI / (TWR, GMS, RAD), APS
Mentions d'unité	LFPG/ZZ
Date d'expiration des mentions	14 décembre 2023
Autres mentions et date d'expiration	OJTI/STDI valide jusqu'au 14 décembre 2023
Mention linguistique en anglais et date d'expiration	Niveau OACI 4 valide jusqu'au 22 mars 2025
Derniers stages de formation de maintien de compétences	FSAU/APP le 10 décembre 2020, stage FSAU/LOC le 19 mai 2022, stage PPS le 21 septembre 2021
Aptitude médicale	Valide

Expérience

Le contrôleur, en position LOC N lors de l'incident grave, a été affecté en 2001 à l'organisme de contrôle Paris-Charles de Gaulle, à l'issue de sa formation initiale. Il a exercé les fonctions de Premier Contrôleur et instructeur jusqu'en 2018, à l'exception d'une période d'un an entre 2009 et 2010 où il a été détaché à la subdivision Qualité de Service Sécurité et Environnement. Il est qualifié en tant que chef de quart depuis le 30 mai 2010 et en tant que Chef de Tour depuis le 1^{er} avril 2016. Il occupe depuis le 1^{er} novembre 2018 les fonctions de Chef de l'Approche.

Activités et services précédant l'incident grave

Le contrôleur était de service en tant que Chef de l'Approche le 21 mai 2022 de 8 h à 14 h 30. Il était en repos le 22 mai, la veille de l'incident grave.

Le contrôleur indique qu'il a pris son service à 4 h 30 en tant que contrôleur tour (LOC N) et Chef de Tour, dans le cadre de l'exercice des privilèges de ses mentions d'unité en vue de la prorogation de ces dernières. Cette vacation était réalisée dans l'équipe dont le contrôleur faisait partie avant son affectation en tant que Chef de l'Approche en 2018.

Il précise qu'entre 4 h 30 et 10 h, il a d'abord occupé la position LOC N, puis assistant LOC N, SOL et Chef de Tour. Il a pris sa pause déjeuner entre 10 h et 11 h puis a repris en tant que contrôleur LOC N vers 11 h 10.

Témoignage

Déroulement de l'incident grave

Le contrôleur indique que, le jour de l'incident grave, le balisage avait été éteint vers 7 h locale une fois la lumière du jour installée. Il ajoute que les conditions météorologiques avaient été bonnes durant la matinée, mais qu'un grain était passé sur les installations entre 10 h 30 et 11 h 15, laissant la piste mouillée. Il ajoute qu'environ dix minutes avant l'arrivée du NSZ4311 sur la fréquence LOC, il a constaté qu'un autre épisode de mauvais temps s'approchait de la piste et a décidé en concertation avec l'assistant LOC d'allumer le balisage sur le réglage d'intensité trois sur quatre. Le contrôleur déclare qu'il pensait avoir allumé le PAPI, le balisage de piste, ainsi que la rampe d'approche. Il note que lorsque le NSZ4311 est arrivé, la visibilité était temporairement très mauvaise et il n'a pas vu l'avion lors de l'approche finale.

Il indique ne pas avoir noté d'anomalie lorsque l'avion s'est présenté en finale, jusqu'à ce qu'une alerte MSAW se déclenche. Il a alors réagi en informant le pilote de l'alerte et en lui demandant

s'il voyait la piste. Il se souvient que l'équipage a répondu assez tardivement en annonçant une remise de gaz. Le contrôleur estime qu'il s'est écoulé trois ou quatre secondes avant de voir l'avion sortir des nuages à basse hauteur avec une assiette à cabrer. Il a demandé à l'équipage de réaliser une procédure d'approche interrompue vers le nord à 5 000 ft et précise ne pas avoir remarqué le mauvais collationnement de QNH.

Le contrôleur ajoute que peu de temps après, ils ont reçu un appel téléphonique du contrôleur assistant LOC S de la tour Sud, qui les avertissait que leur rampe d'approche n'était pas allumée. Il a alors immédiatement activé celle-ci et augmenté l'intensité lumineuse du balisage. Il se souvient qu'on lui a alors proposé d'être relevé, ce qu'il a accepté car il se sentait légèrement perturbé par l'oubli d'allumage de la rampe d'approche.

Il indique que son assistant LOC N est alors passé en position LOC N, qu'un autre contrôleur est venu occuper la position assistant LOC et que lui-même a repris la position Chef de Tour sur le poste dédié. Il s'est ensuite occupé de changer l'ATIS et de coordonner avec le Chef de l'Approche la seconde approche du NSZ4311. Il a hésité à proposer l'ILS de la piste intérieure 27L pour la seconde approche, mais cette option a été écartée au vu de l'amélioration des conditions météorologiques.

Il note qu'il a été surpris qu'une nouvelle alerte MSAW se déclenche lors de la seconde approche du NSZ4311. En revanche, cette fois-ci, les nuages avaient commencé à se dissiper et l'équipage a pu terminer son approche à vue.

À l'issue de la vacation, il a rempli une FNE au sujet du déclenchement du MSAW. Il note avoir discuté de l'incident grave avec deux autres contrôleurs présents à la tour lors du déclenchement du MSAW. Il se souvient que tous trois avaient des doutes quant à la gravité de l'incident : il leur avait semblé que l'avion était bas lorsqu'ils l'avaient vu effectuer sa remise de gaz, sans en avoir la certitude.

A posteriori

Au sujet des approches RNP, il estime que les difficultés suivantes sont cumulées :

- interception à une altitude spécifique, ce qui complexifie la tâche pour l'ITM ;
- élévation de la hauteur de décision ;
- importance du QNH.

Il indique que ces éléments sont régulièrement rappelés aux contrôleurs lors des briefings périodiques et que la subdivision Contrôle a beaucoup insisté sur ces aspects et les risques associés. Il ajoute que le sujet RNP a été traité à plusieurs reprises et que la subdivision Contrôle s'assurait que tous les contrôleurs soient présents à des sessions de briefing et aient eu accès aux informations inhérentes. Il remarque toutefois que ces éléments restent très théoriques, que « *ça ne nous est jamais arrivé* » auparavant et qu'il était difficile de réaliser l'importance réelle du QNH sans événement auquel le rattacher.

Interrogé sur le mauvais collationnement du QNH par le pilote lors de la remise de gaz alors qu'il avait fourni le QNH correct, il déclare ne pas l'avoir entendu. Il précise que la phraséologie standard pour ces situations est « *cap-altitude-QNH* » et qu'en position LOC, il est très fréquent de raccourcir la remise de gaz pour gagner du temps, ce qu'il a fait dans ce cas en l'absence de trafic conflictuel. En position LOC, l'information de calage altimétrique n'est quasiment jamais fournie, à l'exception des remises de gaz avec clairance d'altitude. Il note toutefois que les pilotes de certaines

compagnies aériennes, par exemple easyJet, ont pour habitude de demander la confirmation du QNH lorsqu'ils réalisent des approches RNP. Il ajoute que ces demandes étaient surprenantes pour des contrôleurs habitués aux approches ILS, mais que cela prend désormais tout son sens à la vue de cet incident.

Concernant la détection d'une incohérence entre l'altitude affichée à l'écran radar et la trajectoire supposée de l'avion lors du déclenchement du MSAW, il indique que dans cette situation il n'a le temps ni de calculer ni de faire confirmer les éléments pertinents. En effet, il faudrait appuyer sur le bouton « alt » d'affichage de l'altitude au QNH (voir § 1.10.3.2), ce qu'il estime être trop « lourd » dans la pratique.

Il ajoute qu'il n'est pas facile de se souvenir s'il existe une phraséologie particulière à employer en cas d'alerte MSAW, en raison de la rareté de ce type d'occurrence à CDG et du manque d'habitude. Il se rappelle uniquement les termes « *ground proximity* » enseignés en instruction initiale et il n'a pas souvenir d'avoir revu le thème du MSAW en formation depuis. Enfin, il note qu'en salle d'approche, les déclenchements du MSAW sont la plupart du temps relatifs à des avions qui ne concernent pas l'organisme de CDG, et que dans le cas du NSZ4311, à la tour de contrôle, les membres de l'équipe s'étaient immédiatement rendu compte du fait qu'il impliquait un avion en contact avec eux.

1.5.2.4 Contrôleur Ass LOC N pour la première approche et contrôleur LOC N pour la deuxième approche

Licence, Qualification, Stage, Contrôle

Âge, nationalité	29 ans, français
Qualifications et mentions valides	ADI / (TWR, GMS, RAD), APS
Mentions d'unité	LFPG/ZZ
Date d'expiration des mentions	15 août 2024
Autres mentions et date d'expiration	OJTI/STDI valide jusqu'au 15 août 2024, EXA valide jusqu'au 24 novembre 2024
Mention linguistique en anglais et date d'expiration	Niveau OACI 4 valide jusqu'au 1 ^{er} novembre 2022
Derniers stages de formation de maintien de compétences	Stage FSAU/LOC le 13 janvier 2022, stages FSAU/APP et PPS effectués sur la période 2018 - 2021
Aptitude médicale	Valide

Expérience

Le contrôleur, en position d'assistant LOC N lors de l'incident grave, a été affecté en 2015 à Paris-Charles de Gaulle, à l'issue de sa formation initiale. Il a été qualifié en tant que Premier Contrôleur en 2018 et instructeur en 2019. Il est de plus qualifié en tant qu'examineur depuis 2021.

Activités et services précédant l'incident grave

Le contrôleur Ass LOC N était en repos les trois jours ayant précédés celui de l'incident grave. Sa période de service débutait à 7 h 30 et il a commencé sur la position PREVOL avant de passer à la position Ass LOC N vers 11 h.

Témoignage

Le contrôleur indique que bien que la charge de travail ait été importante sur les fréquences SOL et PREVOL, le trafic était peu dense sur la fréquence LOC. Il ajoute que les conditions météorologiques ne posaient pas de problème jusqu'à une dizaine de minutes avant l'incident

grave, lorsqu'une masse nuageuse est arrivée par l'est. Cela a fortement gêné la visibilité sur les avions en finale pour les contrôleurs. Toutefois il note que l'organisme n'était pas passé en procédure LVP (*Low Visibility Procedure*), la dégradation étant très localisée et les conditions sur l'aérodrome dans son ensemble étant toujours favorables.

Il indique que, lors de l'incident grave, c'est l'alerte MSAW qui a attiré son attention. Il déclare que selon lui la procédure en cas d'alerte MSAW est d'annoncer l'alerte à l'équipage et de lui demander s'il « *a visuel* ». Il précise que dans le cas où l'avion n'est pas en guidage radar, la phraséologie préconisée est plutôt « *check your altitude* ».

Le contrôleur Ass LOC N relate qu'après avoir entendu l'alerte MSAW, il a cherché l'avion visuellement sans succès, tandis que le contrôleur LOC N communiquait avec l'équipage. Celui-ci a alors répondu qu'il remettait les gaz. Il se souvient avoir vu ensuite l'avion sortir des nuages en montée avant le seuil de la piste à une hauteur qu'il estime très basse.

Le contrôleur Ass LOC N a alors coordonné la procédure d'approche interrompue avec le contrôleur coor DEP pour une branche vent arrière standard à 5 000 ft et transmis l'information au contrôleur LOC N qui a donné à l'équipage un cap au nord et une clairance à 5 000 ft. Une fois ces actions effectuées, le contrôleur Ass LOC N a proposé au contrôleur LOC N de le relever, ce qu'il estime être une procédure standard pour ce type de situation.

Le contrôleur ajoute qu'à un moment au cours de la séquence, il a reçu un appel du contrôleur Ass LOC S l'informant que son équipe avait oublié d'allumer la rampe d'approche de son doublet de pistes et avait de plus remarqué que la rampe d'approche du doublet nord n'était pas allumée non plus. Il se souvient avoir transmis cette information au contrôleur LOC N, ce qui a paru le perturber et l'a peut-être encouragé à accepter d'être relevé. Aussitôt après, la rampe d'approche a été allumée. Peu de temps après la remise de gaz, le contrôleur Ass LOC N est passé en position LOC N.

Lors de la deuxième approche et à la suite du déclenchement du MSAW, il se souvient avoir informé l'équipage du déclenchement de l'alerte de proximité avec le relief et avoir demandé si tout allait bien. L'équipage a répondu qu'il avait visuel et le contrôleur a alors autorisé l'atterrissage.

Le contrôleur indique par ailleurs qu'il a vu l'avion sortir de la couche nuageuse en palier, au cours des échanges radiophoniques, à une hauteur qu'il estime trop basse. Il a alors observé l'avion rattraper le plan et atterrir sans incident.

A posteriori

Le contrôleur remarque qu'après l'incident grave, et jusqu'à sa lecture du rapport produit par la subdivision Qualité de service sécurité et environnement au sujet de l'incident grave, il ne soupçonnait pas qu'une erreur des contrôleurs de transmission du QNH ait pu en être à l'origine.

Il déclare par ailleurs être surpris de la non-détection de l'erreur de collationnement lors de la remise de gaz. Il pense qu'il est possible que cela soit survenu au moment où il relevait le contrôleur LOC pendant que celui-ci débranchait son équipement audio et que lui-même connectait le sien. Il suppose que la proximité de sonorité entre l'indicatif et le QNH a pu jouer un rôle dans l'erreur de collationnement.

Questionné sur les approches RNP à CDG, il répond qu'en raison de la mise hors service de l'ILS 27R depuis plusieurs jours, les contrôleurs ne proposaient que des approches RNP sur cette piste. Il ajoute que ceux-ci sont habitués à ce type d'approche et que les procédures et la phraséologie associée sont maîtrisées. Il est cependant « *moins serein* » que lors des approches ILS. Il estime en effet que, bien qu'il y ait eu un volume de formation qu'il décrit comme important sur les procédures RNP, certains aspects sont plus problématiques. Il cite par exemple l'importance du QNH dont il note ne pas avoir saisi l'ampleur avant l'incident grave, ou la nécessité pour les contrôleurs de faire l'interception du plan de descente à la bonne altitude. Il ajoute que l'information de calage altimétrique n'est généralement fournie par le contrôleur LOC que sur demande explicite de l'équipage ou en cas de remise de gaz.

Concernant la détection d'une incohérence entre l'altitude affichée à l'écran radar et la trajectoire supposée de l'avion lors du déclenchement du MSAW, il indique que, selon lui, même en appuyant sur le bouton « alt » d'affichage de l'altitude au QNH, des calculs seraient nécessaires et que, compte tenu des approximations, il serait difficile de déterminer si l'avion est ou non sur la trajectoire prescrite.

Au sujet du MSAW, il indique que les contrôleurs de CDG ne sont pas habitués à ce que les déclenchements de cette alerte concernent des avions avec lesquels ils sont en fréquence. Il déclare ne pas avoir eu de briefing sur ce point, bien qu'il se souvienne de l'existence d'une procédure associée dans le Manex. Il ajoute toutefois que le Manex contient un nombre important de procédures.

1.6 Renseignements sur l'aéronef

1.6.1 Informations générales

Constructeur	Airbus
Type	A320-214
Numéro de série	1087
Immatriculation	9H-EMU
Date de livraison	19/10/1999
Exploitant	Airhub Airlines
Moteurs	CFM56-5B

L'avion était dans les limites de masse et centrage spécifiées par le manuel de vol. Lors de la première approche, la masse était d'environ 63 t pour un centre de gravité à environ 28 % de la corde aérodynamique moyenne.

Il n'y avait pas de point particulier inscrit dans le compte rendu matériel de l'avion (*Technical Log Book*, TLB) ou d'équipement placé sur la liste minimale d'équipement (*Minimum Equipment List*, MEL), qui auraient pu avoir des incidences sur l'incident grave.

L'avion n'était pas équipé pour réaliser des procédures RNP APCH avec des minima LPV, procédure qui utilise un guidage vertical satellitaire SBAS (*Satellite-Based Augmentation System*).

L'avion n'était pas équipé d'un Digital-ATIS.

1.6.2 Chaîne altimétrique

1.6.2.1 Généralités

Un altimètre barométrique mesure la pression atmosphérique extérieure à partir de prises de pression statique situées sur le fuselage et la compare au calage altimétrique, valeur de référence fixée par l'équipage. À l'aide de la variation de la pression en fonction de l'altitude dans une atmosphère normalisée selon l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), l'altimètre permet d'afficher au pilote l'un des paramètres suivants en fonction du calage altimétrique :

- le niveau de vol, en utilisant une référence de pression arbitraire fixée à 1 013,25 hPa (ou 29,92 pouces de mercure (inHg)), autrement appelée « Standard/STD ». Le niveau de vol est utilisé par tous les aéronefs au-dessus du niveau de transition afin d'avoir une référence commune pour la prévention des abordages ;
- l'altitude par rapport au niveau moyen de la mer (*Above Mean Sea Level*, AMSL), en utilisant la valeur de la pression atmosphérique au niveau de l'aérodrome ramenée au niveau de la mer. Il s'agit du QNH ;
- la hauteur par rapport au sol, en utilisant la valeur de la pression atmosphérique au niveau de l'aérodrome. Il s'agit du QFE.

1.6.2.2 Chaînes altimétriques de l'Airbus A320

Sur Airbus A320, il y a trois chaînes altimétriques : une pour l'altitude côté CDB, une pour l'altitude côté copilote et une pour la chaîne de secours¹⁴. Chaque chaîne altimétrique utilise deux systèmes de mesures de pression situés de part et d'autre du fuselage avant.

Le réglage du calage altimétrique pour chaque système d'instruments de vol électronique (*Electronic Flight Instruments System*, EFIS) côté CDB/copilote est réalisé sur le bandeau de contrôle du vol (*Flight Control Unit*, FCU). Pour ces deux chaînes altimétriques, un appui sur le sélecteur de la référence barométrique permet de sélectionner le calage sur QNH. Le sélecteur rotatif permet de choisir la valeur du calage altimétrique désiré. Le basculement sur le calage standard s'effectue en tirant sur le sélecteur. Il est également possible de sélectionner l'unité de la pression barométrique (hPa ou inHg, cette dernière étant par exemple l'unité de référence de calage altimétrique utilisée aux États-Unis).

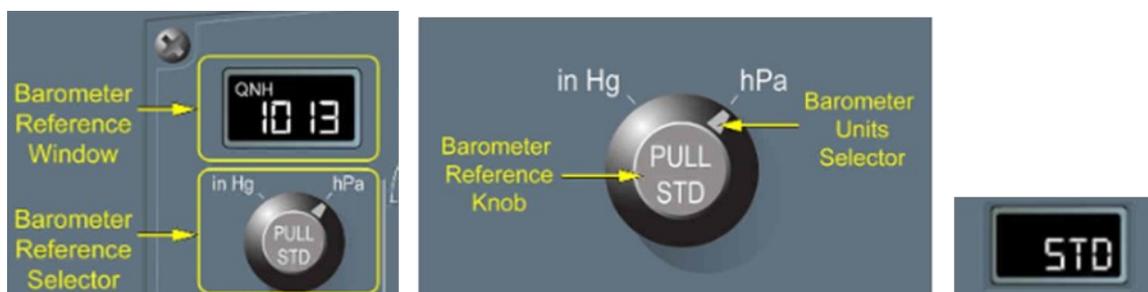


Figure 4 : réglage de la référence altimétrique au FCU CDB, avec un QNH réglé à 1 013 hPa (à gauche) ou réglé au standard (à droite) (Source : FCOM Airbus)

¹⁴ Il peut s'agir sur de vieux A320 d'un altimètre et non d'une chaîne altimétrique.

La référence barométrique est indiquée sur le PFD en dessous du bandeau d'altitude :

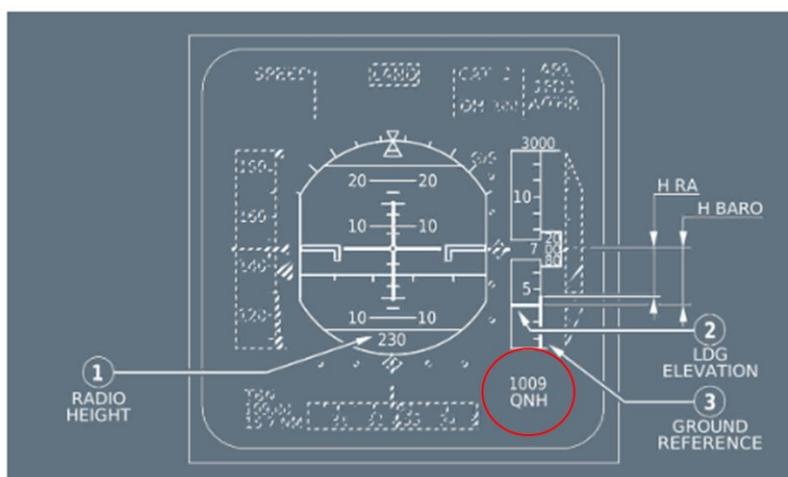


Figure 5 : calage altimétrique au PFD (Source : FCOM Airbus)

D'après le FCOM Airbus et quel que soit le type d'approche, le réglage de la référence altimétrique lors de la descente doit se faire quand l'avion approche le niveau de transition et que l'équipage est autorisé à une altitude. Ce changement de calage doit être effectué manuellement sur les trois chaînes altimétriques et vérifié par le PF et le PM.

Sur Airbus A320, il n'y a pas de fonction de présélection d'une valeur de QNH, on ne peut modifier que la valeur actuelle.

1.6.3 Radio-altimètre

Le radio-altimètre est destiné à mesurer une hauteur par rapport au sol ou la surface de l'eau. Il fonctionne sur le principe du radar. Une antenne émettrice émet une onde vers le sol, où elle est réfléchiée et captée par l'antenne réceptrice. La mesure du temps entre l'émission et la réception de l'onde permet de calculer la distance avec le sol, c'est-à-dire la hauteur radio-altimètre (RA) après la calibration de l'instrument.

Les valeurs calculées sont affichées sur les PFD (*Primary Flight Display*) en dessous d'une hauteur de 2 500 ft RA. L'A320 compte deux radio-altimètres indépendants. Les valeurs mesurées par le radio-altimètre n° 1 sont affichées sur le PFD 1 (commandant de bord) et le n° 2 sur le PFD 2 (copilote).

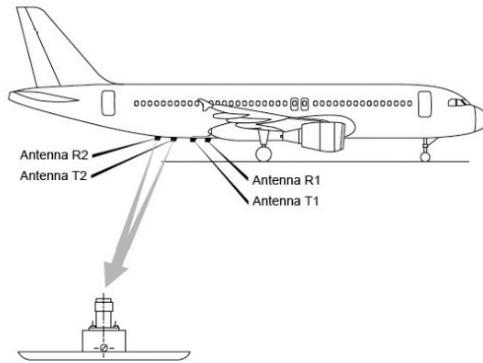


Figure 6 : emplacements des antennes réceptrices (R) et émettrices (T) des radio-altimètres 1 et 2 sur un A320 (Source : Airbus)

Les valeurs de hauteur radio-altimètre enregistrées dans les données de vol du 9H-EMU et affichées sur les PFD ont été corrigées d'un incrément de +5 ft, car les valeurs enregistrées étaient de -5 ft lorsque l'avion était au sol. Cette correction permet ainsi d'avoir une valeur de 0 ft RA lors du roulement à l'atterrissage de l'avion. La valeur minimale de la hauteur radio-altimètre enregistrée dans les données de vol lors de la quasi-collision avec le sol était de 1 ft avant correction (6 ft après correction).

La section « *summary for each phase* » du FCOM Airbus indique notamment que l'équipage doit garder le radio-altimètre dans son circuit visuel lors de l'approche et l'atterrissage. Mis à part ce point, aucune annonce ou critère spécifique associé à la surveillance du paramètre de radio-altitude ne sont inclus dans les SOP LNAV/VNAV ou LPV.

1.6.3.1 Affichage de la valeur de la hauteur mesurée par le radio-altimètre

Plusieurs informations issues des radio-altimètres sont affichées sur le PFD et peuvent éventuellement permettre aux pilotes de se rendre compte que l'avion se rapproche du sol. Il s'agit de paramètres secondaires visant à donner une meilleure appréhension de la situation à l'équipage dans le contexte d'opérations CATII/CATIII qui, avec des DH inférieures à 200 ft, demandent une acquisition visuelle de références proche du sol ou de la piste.

La valeur de la hauteur de l'avion par rapport au sol est indiquée au bas de la sphère d'attitude du PFD, pour une hauteur inférieure ou égale à 2 500 ft RA. La couleur et la dimension des chiffres changent en fonction de la valeur de la hauteur du radio-altimètre (RA) :

- 400 ft < RA < 2 500 ft : chiffres en vert
- RA ≤ 400 ft : chiffres en ambre un peu plus grand

L'affichage des chiffres est également fonction de la hauteur :

- RA > 50 ft : variations de 10 ft
- 50 ft ≥ RA ≥ 5 ft : variations de 5 ft
- RA < 5 ft : variations de 1 ft



Figure 7 : affichage de la valeur de la hauteur radio-altimètre au PFD, ici 2 310 ft RA
(Source : Airbus)

1.6.3.2 Ruban rouge sur le bandeau d'altitude

Lorsque l'avion se trouve à une hauteur inférieure à 570 ft RA, un ruban rouge apparaît au bas du bandeau d'altitude et dont la longueur varie en fonction de la hauteur RA.

Lorsque l'avion est au sol, le haut de ce ruban se trouve au milieu de la fenêtre d'altitude. Il ne dépend que de la hauteur RA et n'est pas affecté par le calage altimétrique.

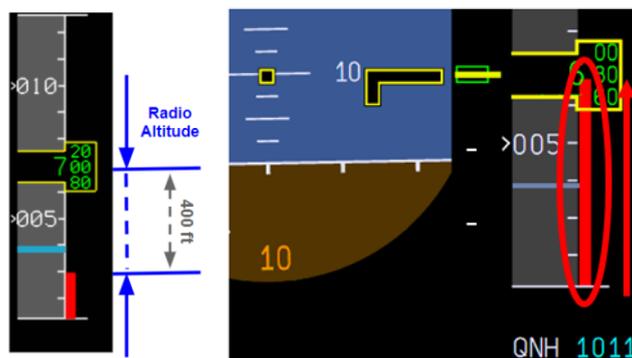


Figure 8 : affichage du PFD avec une hauteur de 400 ft RA à gauche, et lorsque que le 9H-EMU se rapproche du sol à droite avec le QNH erroné (Source : Airbus)

1.6.3.3 Représentation de l'altitude de l'aérodrome sur le bandeau d'altitude

L'altitude de l'aérodrome est représentée sur le bandeau d'altitude par un trait bleu sur les anciens modèles d'instruments¹⁵ (comme c'est le cas pour le 9H-EMU), ou par un bandeau marron sur les modèles d'instruments plus récents¹⁶ et beaucoup plus largement répandus dans la flotte actuelle Airbus.

En cas de calage altimétrique correct et lorsque le relief est plat avant le seuil de piste, le trait bleu (ou le haut du bandeau marron) représentant l'altitude de l'aérodrome devrait coïncider avec le haut du ruban rouge du radio-altimètre pendant l'approche finale. Lors de l'atterrissage, ces éléments se situent au même niveau que la fenêtre d'altitude sur le bandeau d'altitude. Lorsque le

¹⁵ Electronic Instruments System (EIS), qui comprend notamment les PFD, les ND, l'E/WD et le SD. Les anciens modèles sont appelés EIS1.

¹⁶ EIS2.

relief est plat avant la piste, une erreur de calage altimétrique entraîne une incohérence de position entre ces deux éléments comme indiqué sur la figure suivante.

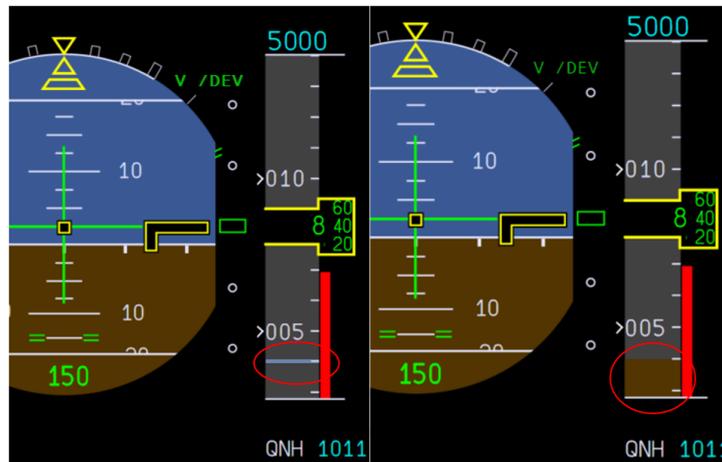


Figure 9 : représentation de l'altitude de l'aérodrome avec un QNH erroné et un relief plat avant la piste, selon les deux modèles EIS Airbus (à gauche EIS1 comme 9H-EMU, à droite EIS2)
(Source : Airbus)

1.6.3.4 Représentation de la hauteur sur le PFD

En dessous de 300 ft RA, la hauteur se visualise également par l'écartement entre la ligne d'horizon et la ligne située au-dessus de la valeur de la hauteur radio-altimètre. Cette dernière se déplace vers le haut lorsque l'avion est en phase de descente. En remontant, la graduation d'assiette s'efface progressivement jusqu'à ce qu'au sol, cette ligne se superpose à celle de l'horizon.

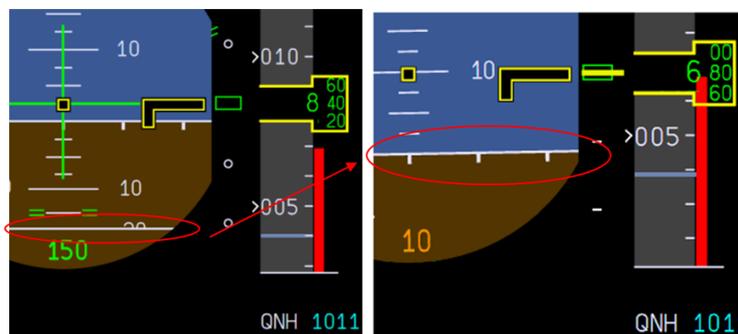


Figure 10 : représentation de la hauteur radio-altimètre sur le PFD du 9H-EMU (Source : Airbus)

1.6.4 Annonces automatiques sonores

Les annonces automatiques sonores (*Auto-callouts*, ACO) de hauteur radio-altimètre sont destinées à sensibiliser l'équipage de conduite de la proximité du sol. Elles sont émises lorsque l'aéronef en descente passe certaines hauteurs préprogrammées au-dessus du relief.

Sur Airbus A320, c'est le FWC (*Flight Warning Computer*) qui génère ces annonces par une voix synthétique, en utilisant les données des radio-altimètres. Elles sont diffusées par les haut-parleurs du cockpit, même s'ils sont éteints ou si l'équipage utilise des casques audios. Il existe 20 annonces sur A320, programmables au choix par l'opérateur (à l'exception de l'annonce « FIVE HUNDRED » obligatoire). Les annonces suivantes étaient implémentées sur le 9H-EMU :

Height (feet)	Call out
2 500	TWO THOUSAND FIVE HUNDRED OR TWENTY FIVE HUNDRED
1 000	ONE THOUSAND
500	FIVE HUNDRED
200	TWO HUNDRED
100	ONE HUNDRED
50	FIFTY
40	FORTY
30	THIRTY
20	TWENTY
10	TEN
DH (or MDA/MDH) + 100	HUNDRED ABOVE
DH (or MDA/MDH)	MINIMUM

Figure 11 : auto-callouts programmées pour le 9H-EMU (Source : Airhub Airlines)

Les annonces (barométrique) « HUNDRED ABOVE » et « MINIMUM » étaient activées au niveau du FWC, mais n'étaient pas disponibles pendant l'incident grave (limitation liée aux approches de non-précision¹⁷ avec EIS1). Le FCOM prévoit dans ce cas que c'est au PM de faire ces annonces. Les membres d'équipage ont indiqué dans leur témoignage qu'ils étaient au courant qu'ils devaient faire ces deux annonces, et le copilote PM a indiqué les avoir réalisées.

Les pilotes du 9H-EMU ont indiqué dans leurs témoignages avec le BEA qu'ils ont entendu seulement les annonces à 2 500 ft RA et 1 000 ft RA et qu'ils n'ont pas entendu les autres annonces et notamment celles de la séquence « FIFTY, FORTY, THIRTY, TWENTY ». D'après eux, s'ils avaient entendu cette séquence, ils auraient immédiatement pris conscience de la gravité de la situation.

Les deux FWC du 9H-EMU ont été déposés à la demande du BEA pour être testés sur banc d'essai d'Airbus le 18 octobre 2022 afin de vérifier la génération des annonces au simulateur lors d'une approche nominale ainsi que lors des deux approches dans les conditions de l'incident grave. Ces trois simulations ont été effectuées pour chacun des FWC.

Lors des simulations, l'ensemble des annonces programmées ont été générées et les essais n'ont ainsi pas fait apparaître de dysfonctionnement du système¹⁸.

Il est cependant à noter que lors des rejeux de l'incident grave au simulateur de développement, les pilotes qualifiés sur l'avion n'avaient pas forcément souvenir de, ou perçu, l'ensemble des annonces émises lors de l'approche, alors même que le but de la séance était de vérifier le déclenchement de ces annonces.

¹⁷ Dans cette logique, les approches baro-VNAV sont classées parmi les approches de non-précision par opposition aux approches de précision.

¹⁸ D'après l'analyse des données de vol effectuée par Airbus, l'annonce "RETARD" aurait été émise lors de l'événement. L'échantillonnage et la précision des données n'a cependant pas permis de déterminer si, lors de cette phase dynamique, l'annonce "TEN" a été émise en plus.

1.6.5 Approches barométriques sur Airbus A320

1.6.5.1 Navigation verticale barométrique

1.6.5.1.1 Généralités sur la baro-VNAV et conséquence d'un calage altimétrique erroné

La navigation verticale barométrique (baro-VNAV) est une fonction du système de navigation de l'avion fournissant un guidage vertical basé sur l'altitude barométrique. Le système de gestion du vol (*Flight Management System, FMS*) génère le profil de descente à partir des paramètres suivants inclus dans la base de données de navigation :

- le point d'approche interrompue (*Missed Approach Point, MAPt*) ;
- l'angle de la trajectoire de vol (*Flight Path Angle, FPA*) ;
- le point de descente finale (*Final Descent Point, FDP*).

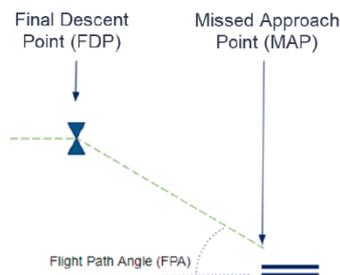


Figure 12 : génération du profil de descente baro-VNAV (Source : Airbus)

Le guidage vertical s'appuie sur les différences entre l'altitude barométrique indiquée et l'altitude barométrique du profil de descente du FMS afin de générer les déviations verticales (V/DEV). Or, par conception, la même source d'information : l'altitude barométrique, utilisée pour la génération du profil de descente et pour le calcul des déviations verticales par rapport à ce profil.

Ainsi, si une altitude barométrique erronée est utilisée à cause d'un calage altimétrique erroné, l'avion suivra une trajectoire de vol parallèle, décalée vers le bas ou vers le haut par rapport à celle conçue et publiée pour éviter le relief et les obstacles. Un calage altimétrique erroné, supérieur de 10 hPa à la valeur attendue, 1 011 hPa au lieu de 1 001 hPa par exemple, conduit à décaler l'altitude réelle de l'avion d'environ 280 ft vers le bas tout au long de la trajectoire.

Enfin, quel que soit le type de procédure d'approche, un calage altimétrique erroné affectera l'altitude indiquée aux pilotes. Ainsi, lorsque l'altitude de décision (DA) ou l'altitude minimale de décision (MDA) sera indiquée, celle-ci ne correspondra pas à l'altitude réelle de l'avion.

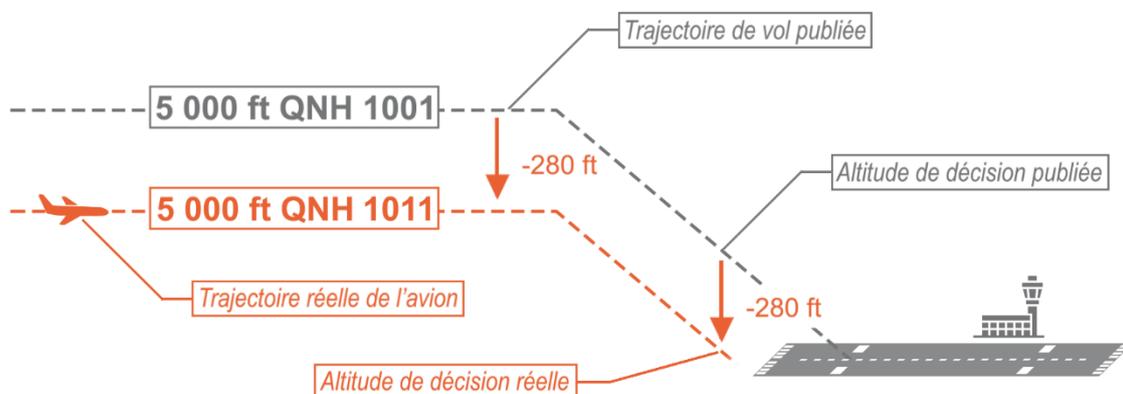


Figure 13 : représentation d'une erreur de calage altimétrique de 10 hPa (Source : BEA)

Le principe du guidage vertical en baro-VNAV ne permet pas de détecter un calage altimétrique erroné, et les déviations verticales (V/DEV) ainsi que les barres de tendances des directeurs de vol (FD) affichées au PFD restent centrées tant que l'avion est à l'altitude barométrique du profil de descente FMS.

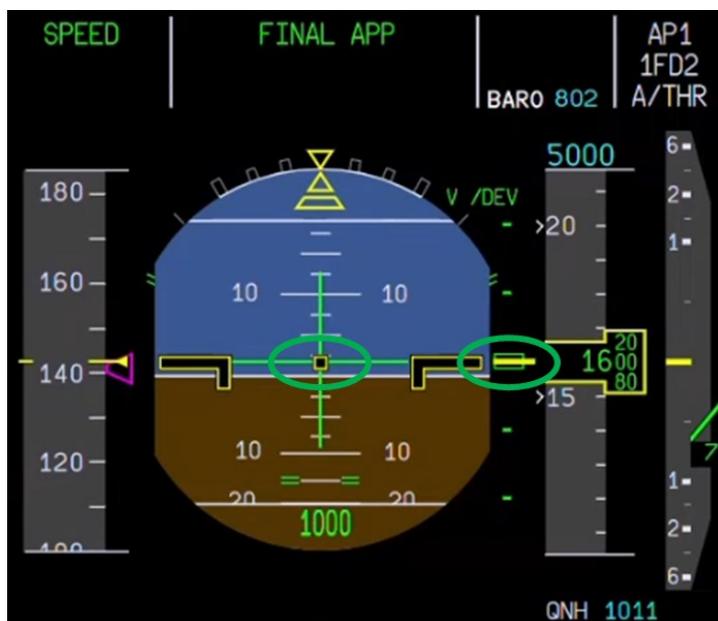


Figure 14 : simulation PFD de l'incident grave, avec V/DEV et barres de tendances des FD centrées (Source : Airbus)

De la même manière, les contrôles de l'altitude par rapport à la distance, dont les valeurs sont fournies par les cartes d'approches et demandées par les procédures (voir § 1.6.5.2) sont inefficaces pour détecter une erreur de QNH commune aux altimètres lors des approches barométriques, puisque la même information de calage altimétrique erroné est utilisée pour la génération du profil de descente et pour la vérification de l'altitude.

Il est enfin à noter que le profil de descente de la fonction baro-VNAV peut être affecté par les écarts de température, et que les approches satellitaires peuvent être soumises à toutes les perturbations du signal issu d'un système mondial de navigation par satellite (*Global navigation satellite system, GNSS*), comme du brouillage ou leurrage (*jamming* ou *spoofing*¹⁹).

1.6.5.1.2 Les différentes alertes existantes

Plusieurs alertes existent pour avertir les équipages d'une incohérence sur l'altitude ou le calage altimétrique :

- en cas de différence d'altitude barométrique entre les chaînes altimétriques du CDB et du copilote, une alerte ambre « **NAV ALT DISCREPANCY** » est déclenchée, avec le message « **CHECK ALT** » s'affichant sur le côté droit de l'échelle d'altitude du PFD ;
- en cas de différence entre les chaînes altimétriques du CDB et du copilote concernant la référence de pression utilisée (STD vs QNH/QFE ou QNH vs QFE), une alerte ambre « **NAV BARO REF DISCREPANCY** » est déclenchée ;

¹⁹ Le brouillage et le leurrage pour la navigation GNSS sont des menaces actuellement traitées de manière intense par la communauté aéronautique. Bien qu'importants, ces sujets n'ont pas été analysés par le BEA dans le cadre cette enquête car n'étant pas en lien direct avec l'événement.

- en cas de différence entre les valeurs de calage altimétrique sélectionnées sur les panneaux de contrôle du FCU du côté CDB et du côté copilote, une alerte ambre « NAV BARO VALUE DISAGREE » est déclenchée ;
- enfin et pour pallier un oubli de changement de référence, l’affichage « STD » ou « QNH » clignote sur le PFD lorsque STD n’est pas sélectionné au-dessus de l’altitude de transition entrée au FMS ou lorsque STD est toujours sélectionné en phase d’approche sous le niveau de transition.

Cependant, aucune alerte n’existe lorsque :

- un même QNH erroné est inséré dans les deux chaînes altimétriques CDB/copilote, l’avion ne sachant pas quel est le QNH réel local ;
- le QNH affiché au PFD est différent de celui du FMS ou du calage réglé sur l’altimètre de secours ou de l’ISIS (*Integrated Standby Instrument System*).

1.6.5.1.3 Les différents modes de guidage possibles sur Airbus A320

Les approches de type baro-VNAV sont disponibles sur tous les avions Airbus. Sur les Airbus A320 comme le 9H-EMU, non équipés des fonctions FLS (*FMS Landing System*) ou SLS (*SBAS Landing System*), le mode de guidage managé utilisant la fonction baro-VNAV est le mode FINAL APP. Les différents modes de guidage managés possibles selon le type de procédure d’approche sont les suivants (voir § 1.8.1 pour les différents types de procédure d’approche) :



APPROACH NAME	ILS	GLS	RNP		RNP AR	LOC only	VOR	NDB
	ILS	GBAS LS	RNAV(GNSS) RNAV(GPS) RNP APCH		RNAV(RNP) RNP(AR) RNP AR APCH	LOC	VOR DME	
			LNAV/VNAV	LNAV				
FMS selection	ILS14R-Z	GLS14R-Z	RNV14R-Z		RNV14R-Z RNP14R-Z (AR)	LOC14R-Z	VOR14R-Z	NDB14R-Z
APPROACH MODE ARMING								
GUIDANCE MODE FMA	G/S LOC	G/S LOC	FINAL APP	FINAL APP	FINAL APP	FPA LOC	FINAL APP	FINAL APP
PFD								
ND								
LATERAL SOURCE	LOC	GPS GBAS	FMS	FMS	FMS	LOC	FMS	FMS
VERTICAL SOURCE	G/S	GPS GBAS	Baro Alt	Baro Alt	Baro Alt	Baro Alt	Baro Alt	Baro Alt
TEMPERATURE compensation for Final leg guidance	Not needed (Geometrical beam)	Not needed (not baro sensitive)	Not Compensated	Not Compensated	Not Compensated	Not Compensated	Not Compensated	Not Compensated
Recommended mode	★	★	★	★	★	★	★	★

Figure 15 : les différents modes de guidage en managé par types d'approche sur Airbus A320 sans fonction FLS ou SLS (Source : [Airbuswin](#))



La terminologie Airbus pour les RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV est : « RNAV(GNSS) avec des minima LNAV/VNAV ». Les approches réalisées avec le mode FINAL APP sont réalisées en descente continue (*Continuous Descent Final Approach, CDF*A). Pour le mode FINAL APP et comme indiqué sur la **Figure 15** ci-dessus :

- le guidage latéral est fourni par le système FMS. Lors d'une approche RNP APCH, la source de guidage latéral est satellitaire ;
- le guidage vertical utilise la fonction baro-VNAV. La valeur du calage altimétrique (QNH) utilisée par l'équipage déterminera ainsi le profil de descente et le guidage associé. La température n'est pas compensée par le système. Le QNH et la température doivent donc être connus des pilotes.

1.6.5.2 Procédure d'approche en mode de guidage FINAL APP

La procédure opérationnelle standard (*Standard Operating Procedure, SOP*) est disponible en [annexe 1](#) de ce rapport.

En préparation du vol, la disponibilité du mode GPS PRIMARY doit être vérifiée. Lors de la préparation de la descente, l'équipage doit vérifier que la température de l'aéroport est supérieure à la température minimale autorisée pour le type d'approche et prendre l'information QNH de l'aéroport. L'utilisation d'un QNH issu d'une station déportée n'est pas autorisée pour une approche RNAV(GNSS) avec des minima LNAV/VNAV. La page PERF APP du FMS est renseignée par le PF et vérifiée par le PM. La sélection de la procédure d'approche se fait dans la page ARRIVAL du FMS.

Lors de la descente, le calage des altimètres est effectué en passant du calage standard au calage QNH et il n'est accepté qu'une différence maximale de 100 ft entre les altimètres. Il n'est pas demandé de confirmer le calage altimétrique avec une autre source d'information.

Si le plan de vol est valide (profil latéral et vertical) et que l'approche sélectionnée est compatible avec le mode FINAL APP, lorsque l'équipage appuie sur le bouton poussoir APPR du FCU (*Flight Control Unit*), les modes APP NAV (latéral) et FINAL (vertical) s'arment. Lors de la capture du plan de descente, les modes APP NAV et FINAL fusionnent en mode FINAL APP. La gestion de l'énergie et de la configuration est identique à celle d'une approche ILS.

À partir du repère d'approche finale (*Final Approach Fix, FAF*), qui correspond dans la plupart des cas chez Airbus au *Final Descent Point (FDP)*, le PM doit vérifier les distances par rapport aux altitudes comme publiées sur la carte d'approche. Il doit aussi annoncer les déviations excessives :

- X-TRK (déviations horizontales) supérieures à 0,1 NM ;
- V/DEV (déviations verticales) supérieures à ½ point.

À l'approche des minima, l'annonce ONE HUNDRED ABOVE doit être surveillée (dans le cas d'une annonce automatique sonore (*auto-callouts, ACO*)) ou annoncée par le PM 100 ft au-dessus des minima. Arrivé aux minima, l'annonce MINIMUM doit être surveillée (dans le cas d'une ACO) ou annoncée par le PM.

Aux minima, si les références visuelles sont suffisantes, l'approche est poursuivie. Si les références visuelles ne sont pas acquises, une remise des gaz doit être effectuée.

En cas de dégradation des performances de navigation en approche finale, une procédure est prévue et doit être briefée lors de la préparation de la descente.

En résumé, tel qu'applicable au 9H-EMU au moment de l'événement :

- les SOP ne mentionnent pas le risque de CFIT (QNH entré dans les EFIS supérieur au QNH réel) ou d'approche non stabilisée (QNH entré dans les EFIS inférieur au QNH réel) en cas de réglage erroné du QNH commun aux altimètres de l'avion ;
- les SOP ne prévoient pas le pré-affichage de la valeur du QNH par anticipation sur les EFIS, ceux-ci ne permettant pas de le faire directement, avant la descente lorsque l'équipage a obtenu les éléments de l'ATIS et que le calage altimétrique est encore au standard ;
- quand l'avion approche le niveau de transition, ou que l'équipage est autorisé à une altitude inférieure par le contrôleur aérien, le QNH doit être affiché sur l'EFIS control panel et sur l'altimètre standby. Les valeurs de QNH doivent être comparées ainsi que les altitudes ;
- les SOP ne demandent pas de comparer la valeur du QNH fournie par le contrôleur aérien en approche avec les autres sources disponibles (METAR, ATIS, QNH inséré au FMS, etc.) ;
- les SOP demandent de vérifier régulièrement les distances par rapport aux altitudes comme publiées sur la carte d'approche. Ces contrôles ne permettent pas de détecter une erreur de calage altimétrique.

1.6.6 Procédures et instruments d'autres types avions et d'autres exploitants

Les SOP Airbus sur toute la flotte Airbus, ainsi que les SOP Boeing sur toute la flotte (737, 747, 757, 767, 777 et 787) sont similaires à celles prévues pour l'A320. À la date de l'incident, il n'était notamment pas prévu de faire confirmer le calage altimétrique avec une autre source d'information pour prévenir l'utilisation d'un calage altimétrique erroné. De même, une erreur de calage altimétrique commune aux altimètres n'est pas détectable directement à partir des instruments et systèmes à disposition de l'équipage, à l'exception des avions équipés d'un système ALTSM ou CAM-BTA (voir § 1.18.3.1).

Des sondages effectués dans les manuels d'autres constructeurs comme Embraer, Bombardier et ATR ne laissent pas apparaître de différences significatives par rapport aux points précédents.

On peut toutefois noter que certains exploitants aériens demandent explicitement à leurs équipages, lors du passage du calage altimétrique standard au calage QNH, de confirmer la valeur du QNH transmis par l'ATC à l'aide d'une autre source d'information (ATIS, METAR, dossier de vol, ACARS...).

Sur A350 et A380, ainsi que sur une partie de la flotte Boeing, une fonction de pré-affichage en standby du QNH sur les chaînes altimétriques est disponible. Les SOP de ces flottes demandent alors la présélection en standby du QNH lors de la préparation de l'approche. Airbus a indiqué au cours de l'enquête que cette procédure de pré-affichage du QNH n'est pas demandée sur les flottes A320, A330 et A340 car les instruments ne sont pas prévus pour ça et la manipulation nécessiterait de modifier la valeur de calage altimétrique en vigueur et pourrait générer, dans certains cas, des alertes ainsi que des écarts d'altitude.

Certains exploitants aériens ont également établi des procédures spécifiques en cas de transmission d'une alerte MSAW/relief/altitude faible par les contrôleurs aériens à l'équipage alors que ce dernier est sans référence visuelle extérieure. Ces procédures peuvent demander par exemple d'appliquer la procédure PULL UP.

1.6.7 Système bord d'avertisseur de proximité du sol (TAWS)

1.6.7.1 Description du système

Le TAWS (*Terrain Awareness and Warning System*) est un système embarqué destiné à avertir l'équipage en cas de risque de collision avec le sol. Le 9H-EMU était équipé d'un TAWS de marque Honeywell et de type EGPWS (*Enhanced Ground Proximity Warning System*) MARK V.

L'EGPWS comprend :

- les cinq modes de protection basiques du GPWS, fonctions réactives et basées principalement sur les radio-altimètres de l'avion :
 1. taux de descente excessifs,
 2. taux de rapprochement au sol excessif,
 3. vitesse verticale négative ou perte d'altitude après le décollage,
 4. rapprochement vers le sol hors configuration atterrissage,
 5. déviation excessive sous le plan des approches de précision pour les ILS, MLS, GLS²⁰ et les RNP APCH avec des minima LPV, avec l'annonce vocale « GLIDE SLOPE ». Elle ne fonctionne donc pas pour les approches baro-VNAV,
- ainsi que plusieurs autres fonctions d'amélioration (*Enhanced GPWS*) qui utilisent également une base de données du relief et des obstacles en plus des paramètres de l'avion et qui permettent notamment d'avoir certaines fonctions prédictives comme :
 - la fonction d'évitement du relief explorant vers l'avant (*Forward Looking Terrain Avoidance, FLTA*),
 - la fonction d'alerte de descente prématurée (*Premature Descent Alert, PDA*) qui chez Honeywell est incluse dans la fonction de plancher de dégagement du relief TCF (*Terrain Clearance Floor*).

Aucun des cinq modes basiques du TAWS n'aurait généré d'alerte lors de l'incident grave au vu de la vitesse verticale nominale et de la configuration de l'avion pour l'atterrissage. Dans les circonstances de l'incident grave, c'est la fonction TCF du PDA qui aurait pu déclencher une alerte.

La fonction TCF d'Honeywell calcule une enveloppe de dégagement du terrain autour de la piste de l'aéroport et déclenche une alerte si la marge de franchissement du relief n'est pas suffisante, même lorsque l'avion est en configuration d'atterrissage. Elle protège également contre une tentative d'atterrissage là où il n'y a pas d'aérodrome.

La fonction TCF utilise : les paramètres de position de l'aéronef, les paramètres avion (en particulier la vitesse, l'altitude, le taux de descente et la hauteur RA), la position de la piste d'atterrissage issue de la base de données et la base de données des obstacles. Si l'aéronef pénètre l'enveloppe de protection, les alertes suivantes sont déclenchées :

- une alerte orale « TOO LOW TERRAIN ». Si l'aéronef continue sa descente, l'alerte orale est émise à chaque diminution de 20 % de la hauteur par rapport au sol ;
- une alerte visuelle à l'aide d'un indicateur lumineux sur le panneau d'instrument.

L'enveloppe TCF comprend une zone d'inhibition autour de l'aérodrome pour éviter de fausses alarmes. Cette zone dépend de la version logicielle de l'EGPWS ainsi que des données entrantes et notamment la source de positionnement de l'avion.

²⁰ *Instrument-based landing system, Microwave landing system, GBAS landing system.*

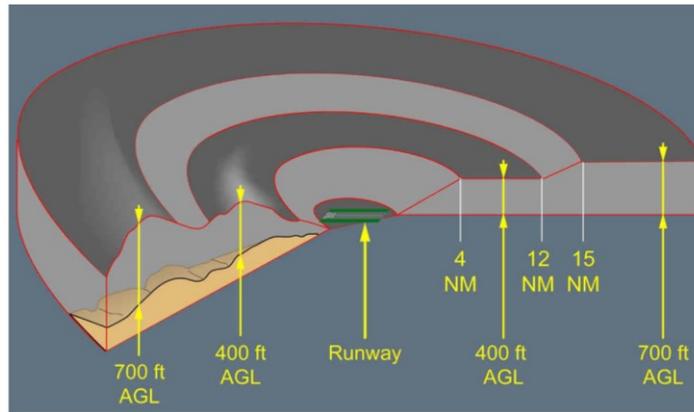


Figure 16: schéma descriptif du mode TCF (Source : FCOM Airbus)

L'alerte TCF « TOO LOW TERRAIN » est de niveau « **caution** » et non pas « **warning** » comme c'est le cas par exemple des alarmes du type « TERRAIN AHEAD, PULL UP ». La philosophie Airbus concernant les procédures opérationnelles associées à une alerte ou alarme TAWS peut être résumée de la manière suivante :

- en cas d'alarme de niveau « **warning** », il est demandé à l'équipage d'effectuer une manœuvre d'urgence (plein manche à cabrer et pleine poussée) ;
- en cas d'alerte de niveau « **caution** », comme c'est le cas de l'alerte TOO LOW TERRAIN :
 - de nuit ou en IMC, il est demandé à l'équipage d'effectuer une manœuvre d'urgence (action à plein cabrer et pleine poussée),
 - la trajectoire de vol doit être ajustée si elle a lieu de jour et en VMC, avec le relief et les obstacles clairement en vue,
- les procédures TAWS sont des *Memory Item* devant être connus par cœur par l'équipage.

1.6.7.2 Test de l'EGPWS du 9H-EMU

Honeywell a procédé à l'examen de l'EGPWS le 16 septembre 2022 sous le contrôle d'un représentant de l'autorité américaine en charge de l'aviation civile (*Federal Aviation Administration, FAA*). L'examen et le déchargement des données de l'EGPWS du 9H-EMU n'ont pas révélé de déclenchement d'alerte ni de défaillances du système lors de l'incident grave. Le système a fonctionné conformément aux spécifications. L'EGPWS utilisait les données de position FMS et n'était pas câblé pour utiliser les données de position GNSS.

Le P/N de l'EGPWS est le 965-0976-003-**206-206**. Les dix premiers chiffres correspondent au hardware, les trois suivants (-206) à la version du logiciel de fonctionnement et les trois derniers (-206) à la version du logiciel de configuration. Le logiciel de fonctionnement comprend entre autres la version de la base de données de terrain et des enveloppes de détection. Le logiciel de configuration quant à lui regroupe la version des fichiers d'interface avion. La version -206-206 date de 1998. Dans des versions ultérieures, Honeywell a attribué des P/N dédiés par avionneur.

L'enveloppe de détection TCF dépend de la qualité des données de positionnement. Honeywell a estimé, dans les circonstances de l'incident grave en utilisant un positionnement de source FMS sans le mode Nav, que l'enveloppe TCF s'arrêtait à 1,9 NM du seuil. Lors de l'incident grave, l'EGPWS n'a pas émis d'alerte car l'aéronef se trouvait en dehors de l'enveloppe TCF, dans la zone d'inhibition. Il aurait fallu une erreur de 23 hPa, décalant le plan de descente vers le bas d'environ 650 ft, pour qu'une alerte soit émise dans les circonstances de l'incident grave avec l'enveloppe TCF de l'EGPWS du 9H-EMU.

Honeywell a effectué des simulations afin de déterminer si des versions postérieures à l'EGPWS de l'incident grave auraient émis des alertes. L'enveloppe TCF a notamment été améliorée à partir de 2003 avec la version -218-218 (équivalent au P/N 965-1676-002 sur les avions Airbus) et qui a notamment permis de réduire la zone d'inhibition autour de l'aérodrome. Sur les versions -218-218 et postérieures, avec une source de positionnement GNSS, Honeywell a estimé qu'une alerte « **TOO LOW TERRAIN** » aurait été émise à 200 ft RA, 617 ft QNH 1 001 à 11 h 41 min 35, soit 15 secondes avant les « 6 ft ». L'alerte aurait été émise à 1,4 NM du seuil de piste.

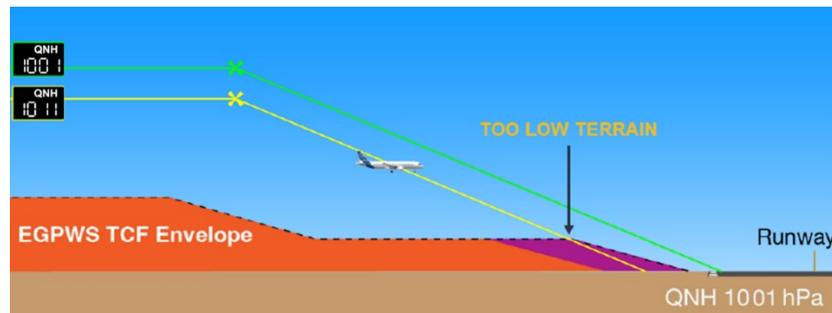


Figure 17 : schéma de la trajectoire de l'avion et de l'enveloppe TCF plus protectrice (zone en violet) avec une version EGPWS -218-218 ou postérieure utilisant le GNSS comme source de positionnement (Source : Airbus)

1.6.7.3 Exigences règlementaires

Exigences applicables

En termes d'emport, l'Annexe 6 de l'OACI, au travers du paragraphe 6.15.1, demande que : « tous les avions à turbomachines dont la masse maximale au décollage certifiée dépasse 5 700 kg ou qui sont autorisés à transporter plus de neuf passagers seront dotés d'un dispositif avertisseur de proximité du sol à fonction d'évitement du relief explorant vers l'avant [TAWS] ».

En Europe, les dispositions du règlement (UE) n° 965/2012 modifié dit « [AIR OPS](#) » relatives au transport aérien commercial exigent au travers du CAT.IDE.A.150 Système d'avertissement et d'alarme d'impact (TAWS) que : « Les avions à turbine dont la masse maximale au décollage certifiée (MCTOM) est supérieure à 5 700 kg ou dont la configuration maximale opérationnelle en sièges passagers (MOPSC) est supérieure à 9 sont équipés d'un système d'avertissement et d'alarme d'impact (TAWS) qui satisfait aux exigences d'un équipement de classe A²¹, comme spécifié dans une norme appropriée ». Le guide associé indique que l'arrêté sur les normes techniques européennes (*European Technical Standards Order*, ETSO) peut être utilisé comme norme appropriée.

En ce qui concerne la certification des équipements TAWS en Europe, deux spécifications de certification fournissent des exigences supplémentaires :

- le CS-ACNS qui définit les exigences de certification relatives aux opérations aériennes au niveau de l'aéronef, établi, par le biais du CS ACNS.E.TAWS.005, que l'équipement TAWS de classe A peut être approuvé conformément à la norme ETSO-C151b ;
- le CS-ETSO qui définit les normes de certification au niveau des équipements établi, par le biais de la norme ETSO-C151, les exigences applicables aux TAWS destinés à être installés sur des aéronefs à voilure fixe.

²¹ Les TAWS de classe B doivent quant à eux équiper certains types d'avions à moteurs à pistons et les TAWS de classe C ont vocation à équiper les aéronefs d'aviation générale.

À partir du 25 juillet 2020, les TAWS nouvellement conçus et fabriqués, pour lesquels l'équipementier demande une approbation/autorisation ETSO, doivent être conformes à la norme [ETSO-C151d](#) de l'AESA, équivalente à la norme TSO-C151d de la FAA, en se référant presque exclusivement au document DO-367 de la RTCA, daté du 31 mai 2017. Toutefois, la norme TSO « C151d » précise que les autorisations accordées pour les TAWS conçus et fabriqués selon des normes antérieures restent valables.

Ainsi, sur le plan opérationnel dans le transport aérien commercial, il n'est pas nécessaire de mettre à jour les TAWS conçus et fabriqués conformément aux normes ETSO/TSO précédentes (ETSO-C151b étant la norme minimale), et par conséquent, la norme RTCA DO-367 ne s'applique pas au TAWS équipant l'A320 9H-EMU²² à la date de publication du présent rapport.

Les spécifications les plus récentes concernant les TAWS : RTCA DO-367

Le paragraphe 2.2.1.1.7.2.1 sur les critères d'alertes (caution) de la norme RTCA DO-367 demande que les TAWS de classe A fournissent des alertes de descente prématurée PDA (caution) en moins de 1,3 seconde selon un volume hauteur-distance au seuil de piste tel que défini dans le schéma suivant. Ce volume de protection est le résultat d'un compromis entre plusieurs fabricants de TAWS.

Les fabricants de TAWS doivent procéder au test de conditions de leur produit en respectant les hauteurs de déclenchement de l'alerte PDA en fonction des critères de vitesses (taux de descente et vitesse sol) et de distance vis-à-vis du seuil de piste. Les tests doivent être effectués selon différentes vitesses sol, différents taux de descente et à différentes distances du seuil de piste.

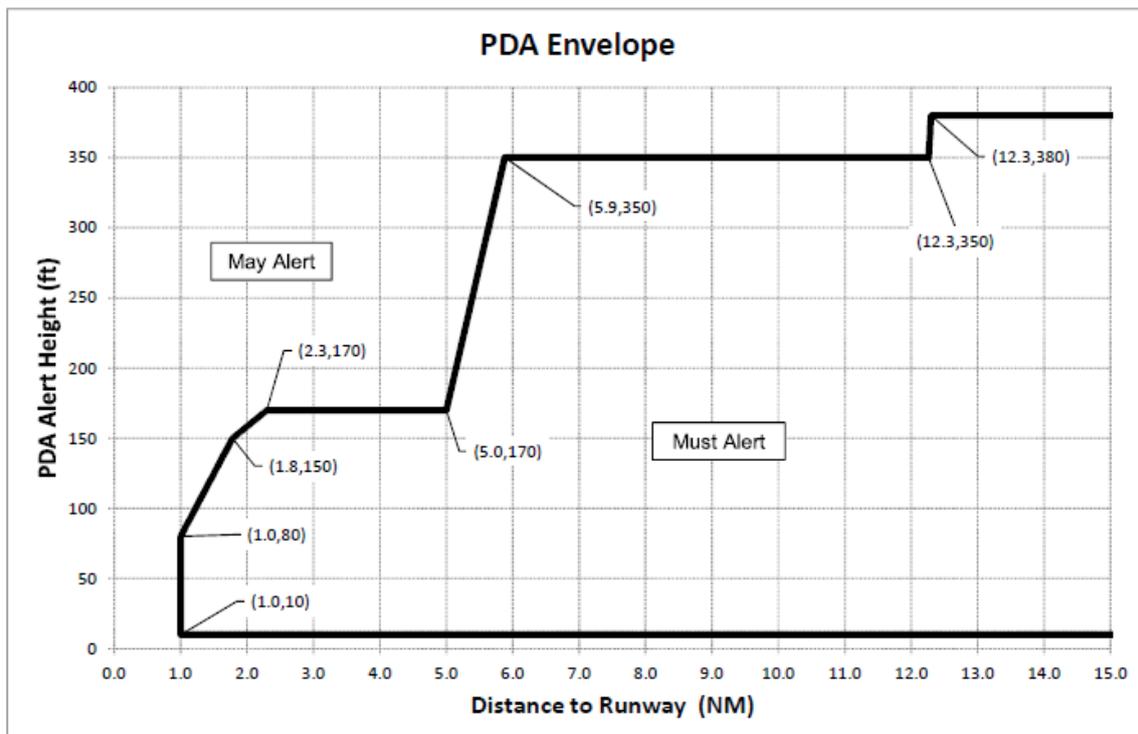


Figure 18 : enveloppe PDA (Source : RTCA DO-367)

²² Compte tenu des dispositions du paragraphe 2.b. du TSO-C151d et de l'autorisation ETSO/TSO accordée au TAWS équipant l'A320 immatriculé 9H-EMU, la configuration de l'aéronef est conforme aux règlements CS-ETSO/CS-ACNS/CAT.IDE.A.150 et satisfait au moins aux exigences ETSO-C151b applicables aux équipements de classe A.

La figure suivante présente le positionnement des différentes enveloppes de détection :

- enveloppe PDA « must alert » selon RTCA DO-367 (en rouge) ;
- enveloppe TCF Honeywell (en bleu clair pour la version -206-206 équipant le 9H-EMU et en bleu foncé pour -218-218) ;
- un plan d'approche standard à 3° (en vert) ;
- ainsi qu'un plan d'approche à 3° décalé vers le bas de 280 ft, associé à une erreur de calage altimétrique de 10 hPa (en gris).

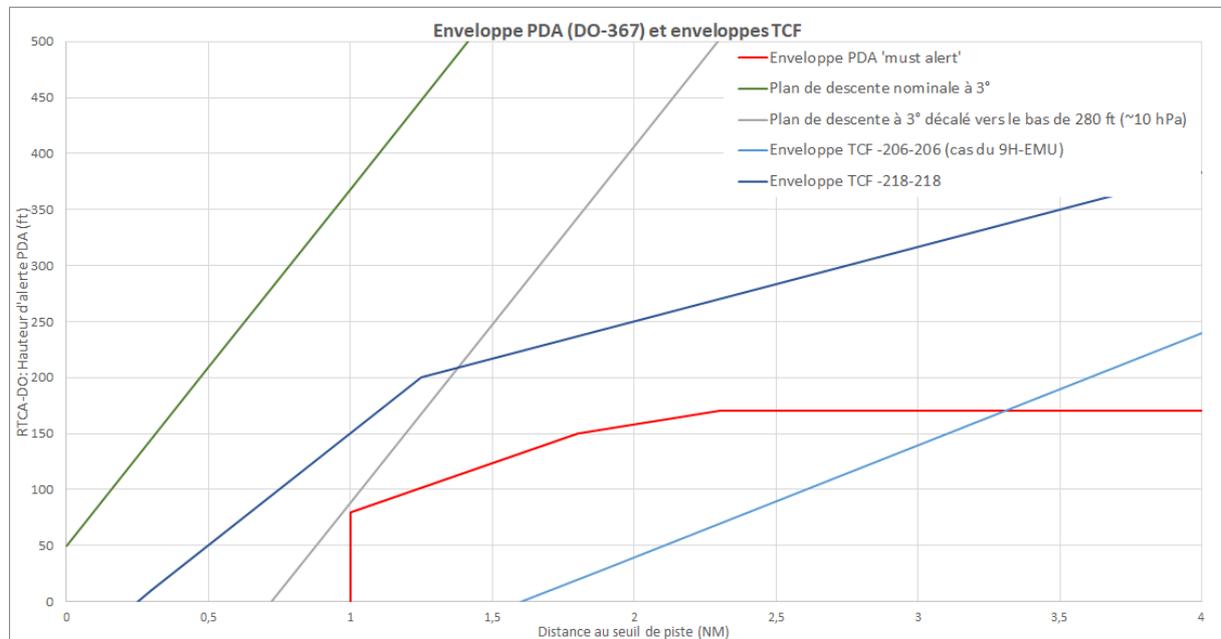


Figure 19 : comparaison des enveloppes PDA et d'un plan d'approche à 3° décalé vers le bas de 280 ft (Source : BEA)

On voit tout d'abord que l'enveloppe TCF d'un EGPWS avec une version logicielle -206-206 sans source de positionnement GNSS, comme celui qui équipe le 9H-EMU, est beaucoup moins restrictive que l'enveloppe de la norme RTCA DO-367 applicable presque 20 ans plus tard.

On voit également que le plan à 3° décalé par le bas d'environ 280 ft et associé à une erreur de calage altimétrique de 10 hPa ne rentre pas dans l'enveloppe PDA « must alert » de la norme RTCA DO-367 actuelle. Ainsi, il n'est pas exigé, pour l'ensemble des TAWS des avions conçus et produits aujourd'hui, qu'une alerte PDA soit émise dans des conditions similaires à celles de l'incident grave du 9H-EMU.

On peut toutefois constater que l'enveloppe TCF d'Honeywell avec une version logicielle -218-218 ou postérieure est plus performante que les exigences minimales de la norme et permet ainsi de fournir une alerte à environ 200 ft sol dans de telles circonstances.

1.6.7.4 État des flottes Airbus et Boeing concernant les emports de TAWS

1.6.7.4.1 Airbus

Airbus fait appel à deux fournisseurs de TAWS. Honeywell historiquement et ACSS²³ plus récemment.

ACSS

Dans le cadre de l'enquête, le BEA a contacté ACSS pour qu'il effectue des simulations d'approche dans des circonstances similaires à celles de l'incident et avec les mêmes hypothèses que pour les simulations effectuées par Honeywell (voir § 1.6.7.2).

Les résultats des simulations montrent que tous les standards ACSS ont généré des alertes dans les conditions de l'incident grave. Dans le cadre de ces simulations, les alertes PDA ont été déclenchées plus de 20 s avant le point le plus bas à 6 ft RA, soit à une distance supérieure à 1,6 NM du seuil de piste et à une hauteur de plus de 270 ft RA.

Il est à noter également que plusieurs alertes (**caution**) FLTA « TERRAIN AHEAD » puis alarmes (**warning**) FLTA « TERRAIN AHEAD PULL UP » sont émises dans les 15 dernières secondes avant le point le plus bas.

On peut donc considérer qu'aucun avion Airbus équipé d'un TAWS ACSS n'est concerné par l'absence d'alerte PDA dans des circonstances similaires à celle de l'incident grave.

Honeywell

Airbus a estimé qu'environ 600 avions encore en service (environ 500 A320 et environ 100 A330/A340) pourraient être actuellement équipés d'EGPWS Honeywell avec une version logicielle antérieure au -218-218 qui ne permet pas le déclenchement d'une alerte TAWS dans les circonstances de l'incident grave. Cette estimation est difficile à réaliser par les constructeurs et les fabricants de TAWS du fait que les opérateurs ne les informent pas systématiquement des évolutions apportées à leurs avions et qu'ils peuvent également passer par des modifications dont la conception relève d'un organisme tiers autre que le constructeur de l'avion (*Supplemental Type Certificate, STC*).

Il est à signaler qu'entre 2004 et 2010, Airbus²⁴ et Honeywell²⁵ ont effectué une campagne de communication au travers de lettres d'information de service (SIL), non obligatoires, afin d'inciter les opérateurs à faire évoluer leur TAWS sur des standards plus récents et à modifier l'avion (*retrofit*) pour que l'information GNSS soit utilisée comme source de données de positionnement. Il n'y a pas eu d'action de retrofit sur le 9H-EMU.

Aujourd'hui, concrètement, ces SIL ne sont plus réellement applicables pour des raisons de compatibilité et de saut technologique entre les équipements d'anciennes générations concernées par la problématique soulevée par cet incident grave et les équipements actuellement produits. Aujourd'hui, la modification des avions ne peut se faire qu'au cas par cas selon le niveau des

²³ Coentreprise entre L3Harris Technologies et Thales.

²⁴ Lettre d'information de service (*Service Information Letter, SIL*) n° 34-080.

²⁵ SIL D201504000056 en complément du [Special Airworthiness Information Bulletin \(SAIB\) NM-15-11](#) de la FAA à la suite de l'accident mortel de l'Airbus A300 immatriculé N155UP, exploité par UPS Airlines, survenu le 14 août 2013 sur l'aéroport de Birmingham (Alabama, USA).

équipements installés à bord. À titre d'exemple, le rétrofit du 9H-EMU vers un standard actuellement disponible qui permettrait le déclenchement d'une alerte TAWS dans les circonstances de l'incident grave nécessiterait un investissement avec un coût significatif pour un exploitant. Une telle opération impliquerait en effet une mise à jour logicielle du TAWS, un changement de matériel (MMR, ADIRU), des modifications de programmation du FWC et des modifications de câblages.

1.6.7.4.2 Boeing

Boeing a également été consulté au cours de l'enquête pour déterminer un nombre approximatif d'avions concernés par la problématique TAWS soulevée par cet incident grave. Le constructeur a été confronté aux mêmes difficultés qu'Airbus pour donner un nombre, à savoir que les opérateurs ne sont pas obligés de leur reporter les évolutions apportées à leurs avions, et qu'ils peuvent également passer par des STC. Boeing a estimé toutefois qu'à partir des informations à sa disposition, environ 1 000 avions en service pourraient être équipés d'EGPWS Honeywell avec une version logicielle antérieure au -218-218 qui ne déclencherait pas d'alerte TAWS dans les circonstances de l'incident grave. De même, des difficultés de rétrofit similaires à celles évoquées au paragraphe précédent sur la flotte Airbus peuvent être rencontrées.

1.6.7.5 Synthèse concernant le TAWS

- L'EGPWS de l'avion a fonctionné conformément à ses spécifications et n'a pas déclenché d'alerte ou d'alarme lors de l'incident grave.
- Des versions logicielles postérieures, utilisant le GNSS comme source de positionnement, auraient permis d'avoir des alertes « TOO LOW TERRAIN » à environ 200 ft RA.
- Il a été estimé qu'environ 1 600 avions Airbus et Boeing actuellement en service ont un TAWS de standard équivalent à celui du 9H-EMU et ne déclenchant pas d'alerte dans les circonstances de l'incident grave.
- Opérationnellement, il n'y a pas d'exigence de mise à jour imposée des standards TAWS d'un avion exploité en transport aérien commercial. Ainsi, un vieil avion peut actuellement toujours voler avec le standard TAWS de lorsqu'il a été produit.
- Les normes de certification actuelles applicables aux TAWS n'imposent pas d'avoir une quelconque alerte ou alarme de proximité avec le sol dans les conditions de l'incident grave, à savoir un plan de descente nominale de 3° décalé vers le bas de 280 ft.

1.7 Renseignements météorologiques

1.7.1 Informations de la préparation du vol

Les informations météorologiques à la disposition de l'équipage dans le dossier de vol NSZ4311 du 23 mai 2022 à CDG étaient les suivantes :

Aéroport de destination PARIS/CHARLES DE GAULLE RWY 08L 08R 09L 09R 26L 26R 27L 27R :
TAF 222300Z 2300/2406 06005KT CAVOK TX19/2310Z TN10/2405Z PROB30 TEMPO 2300/2308 4000 -TSRA SCT060CB BECMG 2306/2308 22010KT BKN012 TEMPO 2309/2314 22015G25KT 2000 TSRA BKN008 BKN040CB BECMG 2313/2315 28010KT BKN020 PROB40 TEMPO 2319/2323 25015G25KT 4000 SHRA BKN012 SCT012CB=

Dans le message TAF émis le 22 mai à 23 h et valable pour le 23 mai, sont notamment prévues, temporairement entre 9 h et 14 h, des averses de pluie modérées à fortes avec une visibilité réduite à 2 000 m, des nuages fragmentés à 800 ft et 4 000 ft et des cumulonimbus.

1.7.2 Conditions météorologiques lors de l'incident grave

Situation générale

Sur l'aéroport Paris-Charles de Gaulle, un front froid instable circulait en matinée et s'évacuait vers 13 h/13 h 30 en laissant derrière lui une traîne peu active. Les vents de secteur sud-ouest sous le front s'orientaient ouest à nord-ouest dans la traîne. Aucun impact de foudre n'a été détecté à CDG entre 11 h et 12 h correspondant à la période de l'incident grave.

Les METAR de CDG de 11 h 30 et 12 h étaient les suivants :

- *LFPG 231130Z 26008KT 9999 SCT016 BKN028 18/15 Q1001 RESHRA TEMPO 3500 SHRA SCT060CB*

Observation du 23 à 11 h 30 UTC à LFPG : vent du 260°, 8 kt, visibilité supérieure à 10 km, nuages épars (SCT, 3 à 4 octas) dont la base est à 1 600 ft AAL, nuages fragmentés (BKN, 5 à 7 octas) à 2 800 ft, température 18 °C, point de rosée 15 °C, QNH 1 001 hPa, averse de pluie récente, temporairement visibilité 3 500 m, averse de pluie, nuages épars à 6 000 ft avec présence de Cumulonimbus (Cb).

- *LFPG 231200Z 29010KT 5000 SHRA FEW010 BKN015 BKN028 FEW050CB 16/15 Q1001 TEMPO 3500 SHRA SCT060CB*

Observation du 23 à 12 h à LFPG : vent du 290°, 10 kt, visibilité 5 000 m, peu de nuages (FEW, 1 à 2 octas) à 1 000 ft, nuages fragmentés à 1 500 ft, nuages fragmentés à 2 800 ft, peu de nuages à 5 000 ft avec présence de Cb, température 16 °C, point de rosée 15 °C, QNH 1 001 hPa, temporairement visibilité 3 500 m, averse de pluie, nuages épars à 6 000 ft avec présence de Cb.

Images radar précipitation

Les images radar servent à visualiser les zones de précipitations en temps réel, sans renseigner sur leur nature et leur état liquide ou solide.

Les images radar, centrées sur CDG à 11 h 40 et 11 h 55 correspondant approximativement aux heures de déclenchement des alertes MSAW lors des deux approches du 9H-EMU, montrent les averses de pluie aux alentours de CDG, avec une plus forte intensité lors de la première approche :

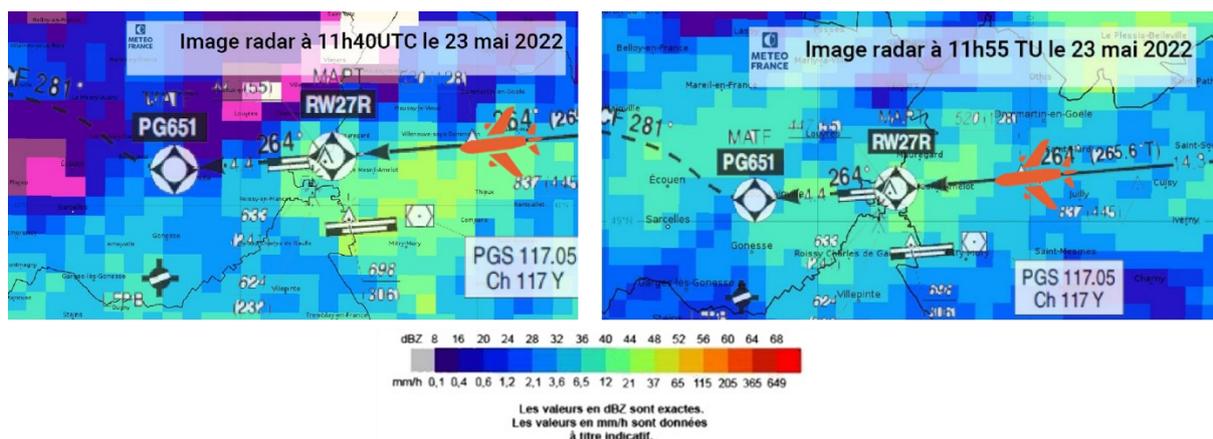


Figure 20 : images radar précipitation à 11 h 40 et 11 h 55 (Source : Météo-France)

Observations et relevés de mesures de CDG

Le résultat des observations humaines réalisées par l'agent de Météo-France lors des deux approches était le suivant :

Heure (UTC)	Visibilité observée (m)	Phénomènes observés	État du ciel
11 h 31	15 000	RAS	Ciel couvert présence de Cb
11 h 40	1 000	Averse	Ciel couvert présence de Cb
11 h 43	1 500	Averse	Ciel couvert présence de Cb
11 h 52	2 500	Averse	Ciel couvert présence de Cb
11 h 56	2 500	Averse	Ciel couvert présence de Cb
11 h 57	2 500	Averse	Ciel couvert présence de Cb

Le résultat des relevés de mesures de piste pour la 27R pour les deux approches indiquait une portée visuelle de piste (*Runway Visual Range*, RVR) supérieure à 2 000 m.

Ces différentes mesures et observations humaines réalisées par l'agent de Météo-France lors des deux approches montrent que la situation météorologique s'est dégradée à CDG avec le début d'une averse de pluie et les baisses de visibilité associée à partir de 11 h 40, soit à peu près au même moment que la fin de la première approche et le rapprochement avec le sol du 9H-EMU. Une averse de pluie était toujours présente lors de la deuxième approche, même si celle-ci était moins intense que lors de la première et avec une amélioration de la visibilité.

1.7.3 Variations du QNH en 30 minutes

À la suite de l'incident grave, et dans le cadre du groupe de travail « altimétrie » lancé par la DSAC (voir § 4.4) a été posée la question d'étudier la faisabilité et la pertinence d'installer un système bord dans les avions qui donnerait aux pilotes une alerte en cas de différence trop importante entre le QNH utilisé pendant la préparation de l'approche, généralement rentré dans le FMS, et la valeur du QNH donnée par le contrôle aérien puis entrée par les pilotes dans les altimètres pour caler l'altitude sur les systèmes de l'avion.

Afin d'appréhender les variations naturelles de QNH et ainsi établir à terme un seuil d'alerte adéquat, Météo-France a réalisé une étude détaillée sur les variations de QNH en 30 minutes à partir des données des messages METAR. Les versions anglaises et françaises de cette étude sont disponibles en [annexe 2](#).

Pour être la plus large et la plus complète possible, la base de données a porté sur l'ensemble des METAR disponibles dans le monde pour l'année 2022 auxquels ont été retranchés les METAR non exploitables (problème de codage, de date, sans valeur de QNH ou alors valeur collée au groupe précédent/suivant, etc.). Au total, 38 877 820 METAR ont été retenus pour l'étude, représentant 97,97 % du total de la base de données des METAR de 2022, répartis sur environ 3 700 aéroports à travers le monde²⁶.

L'étude a démontré que les variations de QNH sur un pas de temps de 30 minutes sont de manière générale faibles, et que la valeur du QNH est un paramètre très stable :

- pas de variation du QNH dans 70,96 % des cas ;
- variation de 0 ou 1 hPa dans 99,77 % des cas ;
- variation de 0 à 2 hPa dans 99,973 % des cas ;

²⁶ Il est à noter qu'étant donné la répartition de ces aéroports, cette base de données tend à représenter plutôt le climat des moyennes latitudes de l'hémisphère nord.

- variation de 0 à 3 hPa dans 99,989 % des cas ;
- variation de 0 à 4 hPa dans 99,993 % des cas.

En ce qui concerne les variations importantes de QNH, supérieures ou égales à 5 hPa (représentant environ 2 700 METAR), l'étude a montré que seuls 8 % de ces cas proviennent d'une origine naturelle météorologique, le reste s'expliquant par :

- une erreur de transcription humaine du QNH dans les METAR lorsque ceux-ci ne sont pas retranscrits automatiquement (environ la moitié des METAR de la base de données). Il est alors notamment mis en avant les erreurs de transpositions de chiffre, ainsi que des pics d'erreur autour des valeurs de 10 et 20 hPa ;
- ou une défaillance du capteur de pression au sol.

Dans les cas d'une origine naturelle météorologique, les variations naturelles importantes de QNH en 30 minutes sont possibles :

- lors de la présence de systèmes orageux organisés (majoritairement aux États-Unis, même si potentiellement observables partout dans le monde) ;
- lors de la présence d'un cyclone (zone tropicale, juin à novembre dans l'hémisphère Nord, novembre à mai dans l'hémisphère Sud) ;
- lors des tempêtes hivernales (aéroports situés à des latitudes supérieures à 50°) ;
- lors des situations de fort vent sur le relief (aéroports de montagne ou à proximité d'un massif montagneux).

L'étude a également établi que la variation météorologique naturelle de la pression n'a jamais excédé 11 hPa en 30 minutes en 2022.

1.8 Aides à la navigation

1.8.1 Généralités sur les différents types d'approche IFR et spécificités

1.8.1.1 Historique et contexte de développement des approches baro-VNAV

Le développement des aides à l'atterrissage a commencé dans les années 1920 avec des aides radio fournissant uniquement un guidage latéral avec des systèmes tels que les radiophares non directionnels (*Non-Directional Beacons*, NDB), puis s'est étendu avec les *Localizers* (LOC) et les *VHF Omni-Range* (VOR) par la suite. Ces systèmes ont fourni et continuent de fournir des données de guidage latéral pour les approches de non-précision. Le plan de descente et donc la gestion du profil vertical étaient quant à eux gérés par les pilotes à l'aide de leur altimètre barométrique ainsi que de leur vue. Les minima applicables à ces approches étaient relativement élevés.

En parallèle se sont aussi développés les systèmes d'atterrissage aux instruments (*Instrument-Based Landing System*, ILS) permettant un guidage vertical (*Glide-slope*) à l'aide d'un signal radio provenant d'une antenne au sol en plus du guidage latéral du LOC. Les ILS ont ainsi créé la notion d'approche de précision (*Precision Approach*, PA), plus apte à réaliser des opérations par conditions météorologiques dégradées, par opposition aux approches de non-précision (*Non-Precision Approach*, NPA) ne fournissant pas de guidage vertical. Cependant, les ILS étant coûteux à l'achat et à l'entretien, encombrants et avec de nombreuses contraintes d'installations, ils n'étaient installés que sur certains QFU des plus grands aéroports.

Jusqu'aux années 1970 environ, le risque de CFIT sur les approches de non-précision était ainsi élevé, entre autres dû aux erreurs de calage altimétrique, mais il était toléré eu égard aux exigences globales du niveau de sécurité de l'époque. Le transport aérien commercial s'est fortement développé au cours des décennies qui ont suivi, et les attentes sociétales ont évolué à la fois sur le plan de la sécurité et de l'accessibilité aéroportuaire au regard des conditions météorologiques. Les installations ILS se sont ainsi fortement répandues et sont devenues un standard d'équipement dans le monde entier, et ce encore aujourd'hui. Le guidage vertical associé étant basé sur une source radio au sol, le plan de descente et le guidage vertical associé ne subissent pas les effets des erreurs de calage altimétrique ni des variations de température.

Dans les années 1980 et 1990, le développement des systèmes de gestion du vol (*Flight Management System, FMS*) et l'introduction des systèmes de positionnement par satellite (*Global Navigation Satellite System, GNSS*) ont permis de réaliser de la navigation satellitaire dans le cadre de la navigation de surface (*Area Navigation, RNAV*). Ce concept initial de performance de navigation requise (*Required Navigation Performance, RNP*) a été repris dans les années 2000 par l'OACI dans le doc 9613, manuel de la navigation basée sur les performances (*Performance Based Navigation, PBN*). D'abord mise en œuvre en route et dans les régions de contrôle terminales (*Terminal Manoeuvring Area, TMA*) la navigation par satellite s'est ensuite appliquée à l'ensemble des phases de vol, y compris aux approches finales. L'OACI a alors créé une catégorie de procédure d'approche complémentaire des NPA et PA : les procédures d'approche avec guidage vertical (*Approach Procedure with Vertical guidance, APV*), au travers de l'utilisation de la fonction baro-VNAV ou des systèmes SBAS²⁷. Les APV proposaient ainsi un guidage vertical, sans pour autant atteindre les performances du guidage vertical de l'approche de précision de type ILS. Elles ont facilité le remplacement de la technique de descente par palier (*Dive and Drive*) par la technique d'approche finale à descente continue (*Continuous Descent Final Approach, CDFA*).

Les approches baro-VNAV ont ainsi grandement participé et continuent aujourd'hui de participer à l'amélioration de la sécurité, car elles permettent de réduire le risque de collision avec le sol en l'absence de procédure d'approche de précision, ainsi que sur des pistes sans équipement de radionavigation, en fournissant des informations de guidage vertical.

1.8.1.2 Typologie des procédures et opérations d'approches IFR

1.8.1.2.1 NPA, APV et PA

Les approches APV se distinguent, d'une part des approches de non-précision car elles prennent en compte un guidage vertical de l'aéronef, et d'autre part des approches de précision car elles ne peuvent pas prétendre à des hauteurs de décision (*Decision Height, DH*) inférieures ou égales à 200 ft du fait de la performance du guidage vertical (la DH des APV est limitée à 250 ft).

Il existe deux types d'APV : les APV baro-VNAV (approches avec guidage vertical barométrique, appelées RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV dans le manuel PBN OACI) et les APV SBAS (approches avec guidage vertical satellitaire, appelées RNP APCH avec des minima LPV - *Localizer Performance with Vertical guidance* dans le manuel PBN OACI).

Toujours dans le cadre de la PBN, ont également été introduites les procédures RNP APCH avec des minima LNAV, qui ne prennent en compte que le guidage latéral des aéronefs. Elles sont donc associées aux approches de non-précision.

²⁷ Le système WAAS a été certifié en 2003 aux États-Unis, EGNOS l'a été en 2011 en Europe.

Il est aussi à noter que les procédures RNP APCH vers des minima LPV ont bénéficié dans les années 2010 d'une amélioration de la performance des systèmes SBAS, dont certains peuvent proposer une DH pouvant descendre jusqu'à 200 ft. Ces procédures sont appelées LPV 200 ou SBAS CAT I, et sont associées aux approches de précision.

Enfin, l'OACI a introduit la notion d'opération d'approche aux instruments de type A et de type B, qui a été notamment repris par l'AESA en 2021 :

- une « opération d'approche aux instruments de type A » est une opération d'approche aux instruments avec une hauteur minimale de descente (*Minimum descent height*, MDH) ou une DH égale ou supérieure à 250 ft ;
- une « opération d'approche aux instruments de type B » est une opération avec une DH inférieure à 250 ft. Celles-ci sont classées comme suit :
 - a) catégorie I (CAT I) : une DH d'au moins 200 ft et, soit une visibilité d'au moins 800 m, soit une RVR d'au moins 550 m,
 - b) catégorie II (CAT II) : une DH inférieure à 200 ft, mais d'au moins 100 ft, et une RVR d'au moins 300 m,
 - c) catégorie III (CAT III) : une DH inférieure à 100 ft ou aucune DH et une RVR inférieure à 300 m ou aucune limitation de la RVR.

1.8.1.2.2 Opérations 2D ou 3D

Les systèmes de navigation embarqués se sont d'abord limités aux récepteurs des signaux émis par les moyens de radionavigation conventionnels. Par conséquent, les pilotes ne disposaient et n'utilisaient que des informations de guidage latéral pour les approches de non-précision. On emploie dans ce cas le terme « opérations 2D ».

Les approches de précision et les APV, compte tenu de leur guidage vertical, sont par définition des « opérations 3D » offrant en plus un guidage vertical. L'introduction de la fonction baro-VNAV a permis, sous réserve d'un codage spécifique dans les bases de données FMS, d'offrir la possibilité de réaliser les approches de non-précision en opération 3D, en disposant d'une information de guidage vertical barométrique élaborée uniquement à partir des systèmes de l'avion, à l'instar d'une APV baro-VNAV. De nos jours, la plupart des avions modernes de transport commercial ont la capacité baro-VNAV, et ainsi, les approches de non-précision (conventionnelles ou RNP APCH avec des minima LNAV) peuvent être opérées en 2D ou en 3D avec la fonction baro-VNAV.

1.8.1.2.3 Systèmes de renforcement et approches RNP

Toutes les approches RNP ont en commun de s'appuyer sur un système GNSS. L'utilisation du GNSS pour des opérations d'approche nécessite que la précision et l'intégrité du positionnement fourni par la constellation satellitaire soient renforcées.

Il existe deux types de système de renforcement au profit des approches RNP :

- *Aircraft-Based Augmentation System* (ABAS) : système embarqué permettant de détecter et rejeter un satellite dont le signal serait défectueux.
- *Satellite-Based Augmentation System* (SBAS) : système satellitaire qui mesure le décalage entre les positions réelles d'un réseau de balises sol et leurs positions calculées par un système GNSS, et qui retransmet aux avions par satellite des informations qui permettent d'appliquer des corrections de positions. Certaines régions du monde ne bénéficient pas de système SBAS. Dans une majeure partie de l'Europe, le SBAS est disponible au travers du service EGNOS (voir § 1.8.4.1).

Les procédures RNP APCH avec des minima LNAV et celles avec des minima LNAV/VNAV peuvent utiliser aussi bien un système ABAS qu'un système SBAS. Les procédures RNP APCH avec des minima LPV ne peuvent s'appuyer que sur des systèmes d'augmentation SBAS, car seuls ces systèmes permettent une précision de position verticale suffisante.

Il existe aussi le système de renforcement au sol GBAS (*Ground-Based Augmentation System*) qui fournit des corrections différentielles et une surveillance de l'intégrité des données GNSS en utilisant les signaux satellitaires reçus par plusieurs antennes au sol sur un aéroport donné. Le message de correction différentielle calculé à partir de ces données est ensuite diffusé en continu de manière omnidirectionnelle par un émetteur au sol utilisant une fréquence de diffusion VHF. Les avions équipés²⁸ peuvent ainsi réaliser des opérations d'atterrissage GLS (*GBAS Landing System*) qui sont des alternatives aux approches ILS et LPV. En Europe seuls quelques aéroports sont équipés de GBAS (CDG n'en fait pas partie) et peu de procédures sont publiées. Le GBAS ne fait pas partie des RNP dans le concept PBN de l'OACI.

1.8.1.2.4 Exigences requises pour réaliser des approches RNP

En Europe, la réalisation d'une approche RNP publiée, à l'image de toute opération relevant du concept PBN, nécessite :

- que l'avion dispose d'un équipement spécifié pour ce type d'opération, dont l'exploitant assure le maintien de navigabilité²⁹ ;
- que l'exploitant ait défini les procédures opérationnelles adéquates³⁰ ;
- que les pilotes soient formés et qualifiés PBN, ce qui est désormais systématique en Europe pour tous les pilotes qualifiés aux instruments (IR), conformément au règlement (UE) n° 1178/2011 « AIR CREW ».

1.8.1.2.5 Minima des approches IFR

Les minima pour les atterrissages sont définis³¹ comme les « minimums opérationnels d'aéroport » qui sont les limites des possibilités d'utilisation d'un aéroport par un équipage exprimées en termes de :

- visibilité et/ou de RVR ;
- altitude/hauteur minimale de descente (*Minimum Descent Altitude/Height*, MDA/H) pour les opérations 2D ; en dessous de laquelle une descente ne doit pas être réalisée sans la référence visuelle nécessaire ;
- altitude/hauteur de décision (*Decision Altitude/Height*, DA/H) pour les opérations 3D ; à laquelle une procédure d'approche interrompue doit être engagée si la référence visuelle nécessaire à la poursuite de l'approche n'a pas été établie.

²⁸ Au premier trimestre 2023 et d'après les informations d'Eurocontrol issues des capacités déclarées dans les plans de vol au sein de la zone de la Conférence européenne de l'aviation civile (CEAC), 8 % (respectivement 15 % pour les vols réguliers) des avions étaient déclarés GBAS, assurant 11 % des vols (respectivement 13 %).

²⁹ Voir règlement [AIR OPS](#) - CAT.OP.MPA.126.

³⁰ Certaines opérations spécifiques, comme les approches avec autorisation requise (RNP AR APCH), nécessitent un agrément de l'exploitant au regard du règlement [AIR OPS](#) SPA.PBN.100. Ce n'est pas le cas de la procédure RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV utilisée par l'équipage lors de cet incident grave, qui est une approche « standard ».

³¹ D'après le règlement AIR OPS par exemple et en particulier le point CAT.OP.MPA.110 et ses AMC et GM.

La détermination de la MDA/H ou DA/H par l'exploitant aérien³² prend en compte plusieurs critères et doit correspondre au maximum de plusieurs valeurs et notamment la hauteur de franchissement des obstacles (*Obstacle Clearance Height, OCH*) et les minima les plus bas permis par la procédure d'approche aux instruments (la DH la plus basse permise pour une approche ILS de catégorie I ou pour une RNP APCH avec des minima LPV est de 200 ft. La DH la plus basse permise pour une RNP APCH avec des minima LNAV ou LNAV/VNAV, ainsi que pour les approches LOC ou VOR/DME est de 250 ft).

L'OCH est déterminée lors de la conception de la procédure d'approche et sa méthode de calcul diffère selon la typologie des procédures d'approche (NPA, APV, PA). Les marges sont plus importantes pour les NPA que pour les APV, et plus importantes pour les APV que pour les PA.

À titre d'exemple et d'après la publication d'information aéronautique (*Aeronautical Information Publication, AIP*), pour la piste 27R de CDG et pour les aéronefs de catégorie C dont l'Airbus A320 fait partie, pour les procédures d'approche RNP APCH avec des minima :

- LPV (et ILS CAT I) : la DA/DH est de 600/200 ft pour une OCH à 180 ft ;
- LNAV/VNAV : la DA/DH est de 750/360 ft pour une OCH à 358 ft ;
- LNAV : la MDA/MDH est de 880/490 ft pour une OCH à 484 ft.

La RVR est déterminée à partir de plusieurs paramètres, dont la DH/MDH qui elle-même dépend de l'OCH. Ainsi, plus l'OCH est basse, plus la RVR minimale autorisée pour réaliser l'approche sera réduite.

1.8.1.3 Sensibilité au calage altimétrique

Les différents types de procédure d'approche ont un plan descente qui peut être ou non affecté par une erreur de calage altimétrique. On utilisera ainsi, dans la suite du rapport, le terme « approches barométriques » pour désigner les procédures d'approche pour lesquelles le plan de descente est affecté par un calage altimétrique erroné (identifiées par l'encadré rouge de la Figure 21) :

Non-Precision Approach		APV Approach with Vertical Guidance		Precision Approach		
Conventional Navigation	PBN RNP APCH	PBN RNP APCH / RNP AR APCH	PBN RNP APCH	GBAS	Conventional Navigation	
VOR - VOR/DME NDB - NDB/DME LOC - LOC/DME	NPA GNSS LNAV	APV Baro-VNAV LNAV/VNAV	APV SBAS	SBAS CAT I	GLS	ILS PAR
Operated in 2D or 3D (with the use of Baro-VNAV)			Necessarily operated in 3D			
Vertical profile impacted by altimeter setting!			Vertical profile not impacted by altimeter setting			

Figure 21 : tableau récapitulatif extrait du bulletin EUR OPS 2023_001 « Risks related to altimeter setting errors during APV baro-VNAV and non-precision approach operations » publié par le bureau régional EUR/NAT de l'OACI en juillet 2023

³² À ce titre, la publication d'information aéronautique française fournissant directement une MDA/H ou DA/H en plus de l'OCH est une particularité.

La fonction baro-VNAV n'a pas été conçue comme un système autonome d'approche et d'atterrissage, et le guidage vertical repose uniquement sur des données internes à l'avion, en particulier l'altitude barométrique qui dépend elle-même du calage altimétrique.

Ainsi, si les opérations d'approches 2D sont systématiquement des approches particulièrement sensibles à l'erreur de calage altimétrique, la réalisation d'une opération d'approche 3D ne signifie pas une exposition moindre à ce danger, puisque celles reposant sur la fonction baro-VNAV y sont tout autant sensibles.

A contrario, les approches ILS ou celles s'appuyant sur un système de renforcement des performances de navigation (GBAS ou SBAS) sont moins sensibles à l'erreur de calage altimétrique car le guidage vertical et donc le plan de descente sont issus d'une source extérieure à l'avion (signal d'une balise radio au sol ou signal satellitaire) indépendante du calage altimétrique.

L'altitude réelle de l'avion à l'altitude de décision lue par l'équipage reste néanmoins affectée dans tous les cas³³ par une erreur de calage altimétrique et peut mener à des événements de type atterrissage dur.

1.8.2 Développement des approches APV baro-VNAV : cadre réglementaire et évaluation de la sécurité

1.8.2.1 Concept PBN de l'OACI, spécifications et plan de développement

Le concept PBN est présenté dans le Manuel PBN³⁴ de l'OACI. Il s'agit d'une méthode de navigation basée sur des exigences de performance portant notamment sur l'aéronef, l'équipage, la conception de procédure ou la performance des signaux de navigation aptes à supporter les performances opérationnelles requises dans un espace aérien donné. Ces exigences définissent des conditions de précision, d'intégrité, de continuité et de disponibilité de la fonction navigation.

L'Annexe 10 à la Convention relative à l'aviation civile internationale, concernant les télécommunications aéronautiques³⁵, décrit les exigences relatives à la performance des systèmes GNSS, notamment ceux destinés à fournir le guidage horizontal des opérations d'approches RNP (quels que soient les minima) ainsi que le guidage vertical des opérations d'approches RNP avec des minima LPV.

Pour les systèmes GNSS, le risque d'intégrité qui détermine leur capacité à fournir des avertissements en temps utile lorsque le système ne peut plus être utilisé en toute sécurité, est fixé à 2×10^{-7} /approche pour le guidage latéral associé aux procédures RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV et LPV, et pour le guidage vertical associé à des procédures RNP APCH avec des minima LPV uniquement. Il ne prend pas en compte les aléas opérationnels comme les erreurs de calage altimétrique.

Le Supplément B au Volume I de l'Annexe 10 présente une stratégie pour l'introduction et l'utilisation d'aides non visuelles d'approche et d'atterrissage. Cette stratégie n'est pas prescriptive concernant les ILS, leur maintien ou leur suppression.

³³ Hors opération CAT II/III où c'est uniquement la hauteur radio-altimètre qui est utilisée pour les minima.

³⁴ Doc 9613 (quatrième édition – 2013) ; version en vigueur à la date de l'incident grave.

³⁵ Septième édition (2018) ; version en vigueur à la date de l'incident grave – voir tableau 3.7.2.4-1 dans le Volume I.

En outre, elle reconnaît que « *les approches au GNSS assurant un guidage dans le plan horizontal et le plan vertical peuvent constituer une option économique lorsqu'il est envisagé d'introduire un service d'approche de catégorie I ou lorsqu'il est prévu de remplacer ou de retirer un ILS existant* » et que pour cela, il doit être pris en considération « *l'équipement des usagers* ».

La Résolution A37-11 de l'OACI adoptée en 2011 inclut dans ses objectifs celui de favoriser le développement d'approches PBN, en particulier avec guidage vertical. Cette résolution prévoit que toutes les extrémités de pistes équipées d'approches aux instruments ou servant à des aéronefs dont la masse maximale certifiée au décollage est supérieure ou égale à 5 700 kg doivent disposer d'une procédure d'approche avec guidage vertical lorsque cela est possible. Cet objectif était vu comme un levier de réduction du risque de CFIT par rapport à la situation existante dans laquelle certaines de ces pistes étaient équipées uniquement de procédures NPA. Cette résolution prévoit également que l'OACI élabore une méthode d'évaluation de la sécurité parmi les éléments indicatifs à mettre à disposition des États.

Au cours de l'enquête sur cet incident grave, l'OACI a indiqué au BEA qu'elle n'avait pas élaboré cette méthodologie d'évaluation.

1.8.2.2 Développement de la fonction baro-VNAV

L'introduction du FMS à bord des avions a ouvert la possibilité de fournir des informations de navigation dans le plan vertical (VNAV) en continu à partir des informations barométriques : cela correspond à la fonction baro-VNAV. L'objectif initial de cette nouvelle fonction était d'optimiser la consommation de carburant en effectuant des descentes continues. Cette capacité a notamment été reconnue par la FAA en 1988 au travers de la publication de la circulaire [AC20-129](#).

Au cours de la décennie qui a suivi, le risque élevé de CFIT associé aux approches de non-précision sans guidage vertical a conduit la communauté aéronautique internationale à recommander puis requérir la descente continue, y compris pour les approches finales, au travers de la technique de vol CDFA. L'utilisation de la fonction baro-VNAV a ainsi également été étendue aux approches finales.

À cette fin, l'OACI a introduit en 2001 dans le doc 8168 PANS-OPS des critères propres à la baro-VNAV. Par la suite, ceux-ci ont été révisés en introduisant des hypothèses de performance spécifiques en plus de celles définies dans l'AC20-129. Dans le 12^e amendement des PANS-OPS volume II, relatif à la conception des procédures et publié en 2004, une nouvelle méthode de calcul des marges de franchissement des obstacles dans le calcul de l'OCH a été définie pour les RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV. Les PANS-OPS reposant sur des opérations normales, les menaces inhérentes à la fonction baro-VNAV, comme un calage altimétrique erroné par exemple, n'ont pas été prises en compte lors de la mise en place de cette méthode et la réduction des minima pour ces approches n'a pas donné lieu à une étude de sécurité de la part de l'OACI.

Les PANS-OPS mentionnent le risque d'erreur de calage altimétrique et l'inefficacité de certaines défenses opérationnelles : « *[une] contre-vérification par altimètre indépendant possible dans le cadre d'opérations ILS, MLS, GLS, SBAS APV-I/CAT I ne l'est pas dans le cadre d'opérations APV/baro-VNAV parce que l'altimètre est aussi la source sur laquelle le guidage vertical est basé* »

Les PANS-OPS précisent toutefois que « *l'atténuation des défaillances ou des réglages incorrects de l'altimètre sera réalisée au moyen de procédures d'exploitation normalisées similaires à celles qui sont appliquées aux procédures d'approche classique* » et le Supplément A du Manuel PBN ed4 de l'OACI précise que la maîtrise du risque d'erreur de calage altimétrique repose sur les connaissances et la formation des pilotes.

Les critères de performance pour le guidage vertical des opérations RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV ont été décrits dans le Supplément A au Volume II de la quatrième édition du Manuel PBN, publiée en 2013. Ces critères étaient toutefois basés sur l'AC20-129 de la FAA (publiée le 12 septembre 1988, qui a été retirée le 8 mai 2012) et étaient obsolètes. L'édition 5 du Manuel PBN publiée en 2023 ne propose plus aucun critère de performance baro-VNAV.

Il n'existe à ce jour pas de critères de performances pour les systèmes baro-VNAV utilisés pour les procédures RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV dans la documentation OACI.

L'OACI ne fixe pas non plus le risque d'intégrité applicable aux systèmes baro-VNAV utilisés dans les procédures RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV. Différentes études montrent pourtant que l'intégrité des données manipulées par l'humain est limitée et ne peut pas atteindre les ordres de grandeur attendus en matière d'intégrité des systèmes GNSS utilisés pour le guidage en approche (10^{-7} /approche).

Aparté sur les États-Unis :

Il convient de signaler que les États-Unis sont l'un des pays qui possèdent le plus grand nombre de publications de procédure RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV. Les industries, les associations et les autorités y ont fortement poussé pour le développement des baro-VNAV. Peu d'événements significatifs en lien avec des erreurs de calage altimétrique y sont reportés. Questionnée sur la réalité des opérations effectuées, l'autorité américaine en charge de l'Aviation civile (*Federal Aviation Administration, FAA*) a indiqué qu'il n'y a pas de suivi du type de procédure réalisé par les équipages. Elle a toutefois indiqué que lorsqu'elles sont disponibles, les approches ILS restent privilégiées.

Il est important de prendre en compte que le contexte et l'organisation des espaces aériens aux États-Unis diffèrent sensiblement de ceux d'autres parties du monde et de l'Europe notamment.

Les comparaisons peuvent ainsi être inappropriées et les discussions à l'échelle internationale doivent tenir compte de ces différences. En ce qui concerne les États-Unis, on peut notamment citer que :

- le calage altimétrique est donné en pouce de mercure (inHg) et non en hectopascal (hPa).

La pression standard à 1 013 hPa correspond à 29,92 inHg. Le calage altimétrique aux États-Unis varie donc généralement entre 28.XX et 30.XX inHg, 29.XX inHg étant le plus courant.

Ainsi, l'erreur la plus courante en Europe de ± 1 sur le deuxième digit (± 10 hPa, voir § 1.18.1.2) correspond à une erreur d'un dixième de pouce de mercure sur un altimètre réglé au calage américain (ex : 29,82 -> 29,92) qui ne provoque qu'un décalage de l'altitude d'environ 100 ft. Pour avoir une erreur équivalente à celle de l'incident grave du 9H-EMU, il faudrait une erreur de trois dixièmes, beaucoup plus conséquente, plus facilement détectable et donc moins fréquente (voir § 1.18.1.2).

De plus, les bonnes pratiques locales recommandent d'utiliser « *high* » avant un calage altimétrique de 30.XX inHg et « *low* » avant un calage altimétrique de 28.XX inHg, limitant les erreurs importantes ;

- le niveau de transition est le FL 180, et le calage altimétrique est fourni par le contrôleur en route lors de la descente.

Un niveau de transition élevé implique généralement un changement de calage altimétrique du STD vers la référence locale lors d'une phase à faible charge de travail pour l'équipage, comparée au FL 080-FL 050 généralement utilisé comme niveau de transition en Europe. Cela laisse également plus de temps à l'équipage et aux contrôleurs d'identifier un éventuel écart d'altitude ;

- la langue utilisée, l'anglais, est la langue maternelle des contrôleurs aériens et d'une grande partie des pilotes, réduisant par conséquent le risque d'erreur de transmission, de collationnement ou de non-détection d'une mauvaise information.

1.8.2.3 Spécifications européennes relatives aux approches RNP

En 2009, l'AESA a publié l'AMC 20-27³⁶ consacrée aux opérations d'approches RNP avec minima LNAV et LNAV/VNAV, qui intégrait entre autres les critères suivants :

- l'utilisation par les contrôleurs d'une phraséologie adaptée aux procédures RNP APCH ;
- la connaissance par les contrôleurs de la capacité VNAV des aéronefs, ainsi que les particularités liées au calage altimétrique et à l'effet de la température pouvant affecter l'opération VNAV de l'APV baro ;
- la confirmation par les contrôleurs du QNH auprès des équipages de conduite avant le début de l'approche, afin de minimiser le risque d'erreur de référence barométrique ;
- la nécessité pour les exploitants aériens, par le biais des procédures et de la formation des équipages, de souligner l'importance de disposer d'un calage altimétrique correct. Un syllabus pour la formation des équipages était proposé, incluant des items spécifiques à la fonction baro-VNAV, tels que les attendus en matière de validité, de précision et d'intégrité du calage altimétrique, ainsi que des précautions sur quand et comment modifier le calage altimétrique ou sur le fait que les contrôles d'altitude-distance ne permettent pas de détecter une telle erreur.

Ces dispositions ont été globalement intégrées progressivement dans divers règlements dont le règlement (UE) n° [965/2012](#) modifié dit « AIR OPS » relatif aux opérations aériennes, dans le règlement (UE) 2017/373 modifié dit « IR ATM-ANS »³⁷ relatif aux services de navigation aérienne, dans les spécifications de certifications de communication, de surveillance et de navigation CS-ACNS, et l'AMC 20-27 a finalement été abrogée.

³⁶ Airworthiness approval and operational criteria for RNP APPROACH (RNP APCH) operations including APV baro-VNAV operations.

³⁷ Règlement d'exécution 2017/373 de la Commission du 1^{er} mars 2017 établissant des exigences communes relatives aux prestataires de services de gestion du trafic aérien et de services de la navigation aérienne ainsi que des autres fonctions de réseau de la gestion du trafic aérien, et à leur supervision ([Version en vigueur le jour de l'incident grave](#)).

On peut toutefois noter que la problématique d'erreur de calage altimétrique qui avait été clairement identifiée et mise en avant dans l'AMC 20-27 a été diluée dans l'ensemble de ces règlements sans en reprendre les éléments de contexte. On peut citer par exemple que :

- le besoin de confirmation par les contrôleurs du QNH auprès des équipages de conduite avant le début de l'approche, afin de minimiser le risque d'erreur de référence barométrique, n'a pas été repris dans l'IR ATM-ANS (voir § 1.17.1.3.4) ;
- la nécessité de disposer d'un calage altimétrique correct dans le contexte d'approche baro-VNAV en raison du risque de CFIT n'a pas été reprise dans l'AIR OPS ;
- l'information que les contrôles d'altitude-distance ne permettent pas de détecter une erreur de calage altimétrique n'a pas été reprise dans l'AIR OPS.

1.8.2.4 Évaluation de la sécurité des approches APV baro-VNAV par Eurocontrol

En 2010, Eurocontrol a réalisé une évaluation de la sécurité des opérations d'approche APV baro-VNAV. Le changement considéré était l'introduction d'opérations APV baro-VNAV sur une piste pour laquelle une procédure RNP APCH avec des minima LNAV a déjà été publiée.

Le rapport de cette évaluation de sécurité n'a pas été officiellement validé ni publié par Eurocontrol. Seule une version provisoire de ce rapport a été mise à la disposition de plusieurs organisations.

L'étude de sécurité envisageait différents scénarios, y compris le cas d'une approche APV baro-VNAV réalisée avec un calage altimétrique erroné. Le risque de CFIT et de non-détection de l'erreur est bien identifié au travers de l'étude, et par exemple 72 incidents de calage altimétrique reportés par les opérateurs à l'aviation civile du Royaume-Uni entre février 2009 et février 2010 sont analysés. Eurocontrol propose également quelques mesures de sécurité complémentaires :

- l'énonciation de l'identification de l'ATIS et du QNH par l'équipage avant de commencer l'approche initiale ;
- la répétition du QNH par le contrôleur LOC ou l'AFIS au premier contact ;
- le relèvement de l'altitude de transition pour permettre à l'équipage de régler le QNH dans une phase où la charge de travail est moindre que pendant l'approche et pour laisser plus de temps pour détecter un éventuel réglage incorrect ;
- l'utilisation du radio-altimètre comme moyen d'identification d'une erreur de QNH en cas de relief plat avant la piste.

L'étude conclut sur ce sujet que le calage altimétrique est primordial pour les approches APV baro-VNAV, que la fréquence d'occurrence d'une erreur de calage altimétrique en APV baro-VNAV devrait être comparable à celle des approches NPA et que l'APV baro-VNAV n'apporte pas de bénéfice de sécurité pour ce cas précis, les deux types d'approches étant vulnérables de la même manière.

1.8.2.5 Plans de déploiement de la PBN en France et en Europe

Pour se conformer à la résolution A37-11 de l'OACI, la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) a publié son plan de mise en œuvre de la navigation basée sur la performance (PBN) en 2012. Le plan élaboré par la DGAC contient des objectifs à court, moyen et long terme. Sur le long terme, l'objectif était que les aéronefs s'équipent d'avioniques leur permettant de réaliser les approches SBAS CAT I au travers des procédures RNP APCH avec des minima LPV, seul équivalent reconnu à l'ILS ou au GLS en matière de niveau de sécurité et de performance.

En 2015, par le biais de l'avis de proposition de modification (*Notice of Proposed Amendment*) NPA 2015-01, l'AESA a proposé une réglementation pour la mise en œuvre de la PBN au sein du

réseau européen de gestion du trafic aérien (EATMN). En ce qui concerne les opérations d'approche, la disposition proposée prévoyait que les prestataires de services de la navigation aérienne et les exploitants d'aérodrome mettent en œuvre avant janvier 2024 des procédures d'approche PBN avec guidage vertical (APV) à toutes les extrémités de piste aux instruments où il n'existe actuellement qu'une procédure d'approche de non-précision.

L'évaluation de l'impact sur la sécurité correspondante, intégrée dans l'avis de proposition de modification NPA 2015-01, s'est limitée à cette transition spécifique, et n'a pas considéré les différences par rapport aux approches de précision. Elle a conclu que l'introduction des procédures d'approche APV (SBAS ou baro-VNAV indistinctement) permettrait, par rapport aux procédures d'approche de non-précision, d'harmoniser les types d'approche, d'assurer une meilleure séparation des obstacles et d'améliorer la conscience de la situation des pilotes. La sensibilité des approches baro-VNAV aux erreurs de calage altimétrique, qui n'était pas un paramètre déterminant compte tenu du changement considéré, n'a pas été étudiée ni mentionnée dans la NPA. L'analyse d'impact réglementaire menée par l'Agence a conclu que la disposition proposée, tout comme le règlement dans son ensemble, était d'un point de vue global incluant la sécurité, préférable au statu quo réglementaire.

L'Opinion 10/2016 publiée par l'AESA a confirmé l'objectif et les conclusions de la NPA 2015-01, tout en avançant la date d'application à 2020 au lieu de 2024.

Le règlement européen (UE) 2018/1048³⁸, dit « IR-PBN », est entré en vigueur en 2018.

Outre ce qui a été discuté et analysé dans le cadre de la NPA 2015-01 et de l'Opinion 10/2016, ce règlement a rendu obligatoire, avant le 24 janvier 2024, la publication « à toutes les extrémités de piste aux instruments, de procédures d'approche conformes aux exigences de la spécification relative à l'approche RNP (RNP APCH), comprenant les minima LNAV, LNAV/VNAV et LPV³⁹ ». Elle a de plus exigé au travers de son Article 5 (« Utilisation exclusive de la PBN ») qu'à partir du 6 juin 2030, « les prestataires de services ATM/ANS ne fournissent pas leurs services en utilisant des procédures de navigation conventionnelle⁴⁰ ».

Cette dernière exigence a été introduite à la toute fin du processus réglementaire lors des réunions de comitologie sous l'égide du Comité « ciel unique ». Les informations recueillies auprès des représentants français de la DGAC à cette comitologie suggèrent que les motivations étaient principalement de deux ordres :

- il était attendu que cette exigence incite les exploitants d'aéronefs à s'équiper de systèmes leur permettant de réaliser des procédures RNP APCH avec des minima LPV s'ils souhaitent conserver un niveau d'accessibilité comparable à celui qu'ils ont avec

³⁸ Règlement d'exécution de la Commission du 18 juillet 2018 fixant des exigences pour l'utilisation de l'espace aérien et des procédures d'exploitation concernant la navigation fondée sur les performances ([Version en vigueur le jour de l'incident grave](#)).

³⁹ Deux types de dérogations sont prévus : 1) lorsque, en raison du relief, des obstacles ou des conditions de séparation du trafic aérien, la mise en œuvre des procédures d'approche 3D est excessivement difficile et 2) aux extrémités de piste aux instruments sans couverture SBAS appropriée.

⁴⁰ Une exception est prévue pour des opérations CAT II, CAT IIIA et CAT IIIB.

les ILS-CAT I. Pour autant ni l'AESA ni la Commission européenne n'avaient communiqué à cette époque⁴¹ sur cet aspect lors des consultations vers les exploitants aériens ;

- le retrait des aides conventionnelles telles que les ILS CAT I devrait permettre de réaliser des économies substantielles pour les prestataires ATM/ANS, et donc par voie de conséquences pour les exploitants aériens.

L'introduction de cette disposition n'a pas donné lieu à une évaluation spécifique de son impact sur la sécurité avant l'adoption du règlement ni donné lieu à la définition de critères pour ajuster cette disposition dans le cas où le développement de la capacité LPV ne serait pas celui attendu à l'horizon 2030. La Commission européenne et l'AESA ont indiqué au BEA au cours de l'enquête que dès 2021, l'AESA assurait un suivi de l'évolution des capacités PBN des aéronefs en Europe au travers des bilans effectués par Eurocontrol sur la base des éléments déclarés dans les plans de vol (voir § 1.8.4.2.2).

Enfin, il est à noter que [l'AESA a par la suite clarifié](#) les dispositions du règlement vis-à-vis du GBAS : *« les opérations d'approche prises en charge par les installations CAT I du système d'atterrissage GBAS (GLS) n'entrent pas dans le champ d'application de l'IR PBN ; elles ne sont donc pas concernées par les restrictions et peuvent continuer à être utilisées après la date limite mentionnée »*.

1.8.3 Rationalisation des moyens de radionavigation et retrait des ILS

En Europe, les plans PBN nationaux établis avant la publication de l'IR-PBN incluaient une première réflexion autour de la rationalisation des moyens de radionavigation. Ainsi, concernant les approches, dès 2012, le plan PBN France statuait qu'à long terme (après 2020) *« la fin du déploiement de la constellation européenne (Galileo) associée à la version V3 d'EGNOS devrait permettre de consolider et de fiabiliser l'usage des seuls moyens satellitaires pour la navigation des aéronefs. Cette phase devrait donc permettre une nouvelle étape de rationalisation du réseau d'installations sol défini jusqu'alors (ILS, VOR et DME) »*.

Dans les faits, la DSNA en tant que principal prestataire de service de la navigation aérienne en France et donc principale organisation historiquement chargée de l'exploitation des moyens de radionavigation, a effectivement procédé à une rationalisation des ILS CAT I en parallèle du déploiement des procédures d'approche RNP, notamment de celles avec minima LPV. Ainsi, le nombre d'ILS CAT I sur le territoire est passé de 116 (répartis sur 79 aéroports) en 2011 à 64 (sur 37 aéroports) en 2016. Par ailleurs, la gestion d'une partie des ILS CAT I restants a été transférée aux exploitants d'aérodromes (voir les aérodromes en vert sur la **Figure 22**). Les aérodromes où ont été supprimés les ILS CAT I sont les moins desservis en transport commercial.

⁴¹ Depuis la publication de l'IR PBN, l'AESA a réalisé des [communications](#) autour du règlement, notamment en incitant les exploitants à s'équiper en capacité LPV pour conserver un niveau d'accessibilité comparable aux ILS CAT I.

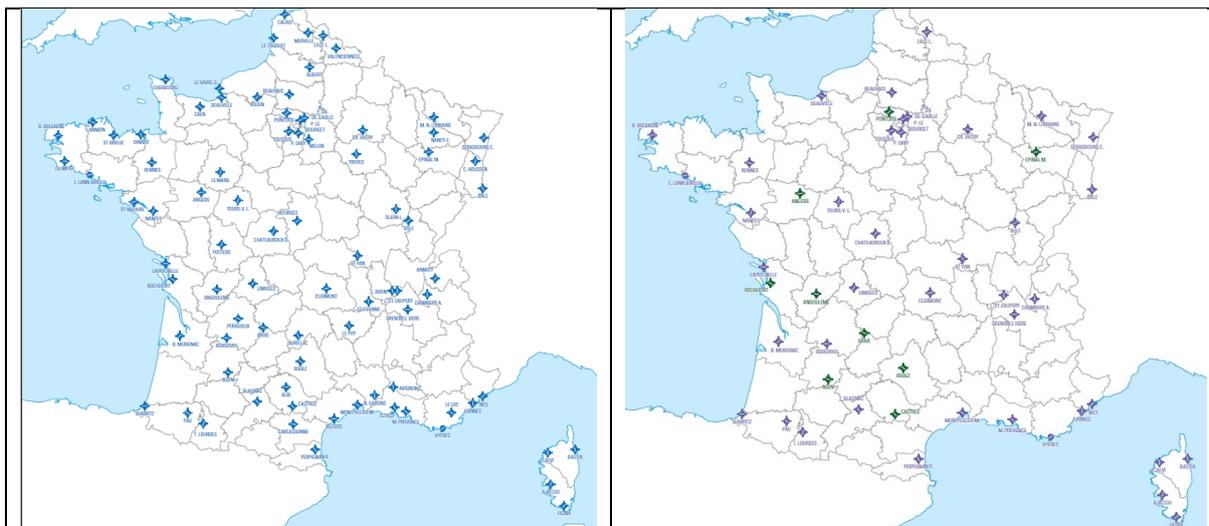


Figure 22 : réseau d'ILS CAT I avant 2011 (gauche) et après 2016 (droite) en France métropolitaine (Source : DGAC)

1.8.4 Développement de la capacité SBAS pour réaliser des procédures RNP APCH avec des minima LPV

La possibilité pour un équipage qualifié de réaliser une procédure RNP APCH avec des minima LPV dépend :

- de l'existence de ce type de procédure sur le QFU considéré. Il faut pour cela qu'un système de renforcement SBAS (voir § 1.8.1.2.3) soit disponible dans la zone géographique considérée et que l'environnement permette la conception de ce type de procédure ;
- du système de navigation de l'avion qui doit pouvoir offrir un guidage SBAS dans les plans horizontal et vertical ;
- de la disponibilité de la capacité LPV à bord de l'avion. En effet, un avion équipé SBAS, s'il n'est pas certifié pour, ou n'a pas la capacité LPV, ne pourra effectuer cette procédure.

1.8.4.1 Développement des systèmes de renforcement SBAS

Plusieurs États ou régions du monde ont mis en place leur propre système de renforcement satellitaire SBAS. Ces systèmes sont compatibles et interopérables. Le SBAS européen EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), a été mis en service en 2011 et couvre la majeure partie de l'Union européenne (UE) ainsi que certains pays et régions voisins, notamment à l'aide du système mondial de navigation par satellite (*Global Navigation Satellite System*, GNSS) européen Galileo. Il est à noter que les zones de service EGNOS pour les opérations LPV ne couvrent pas la totalité du ciel unique européen, c'est-à-dire l'espace aérien où s'applique le règlement (UE) 2018/1048 « [IR-PBN](#) ».

La Figure suivante montre le développement du SBAS dans le monde en 2023.

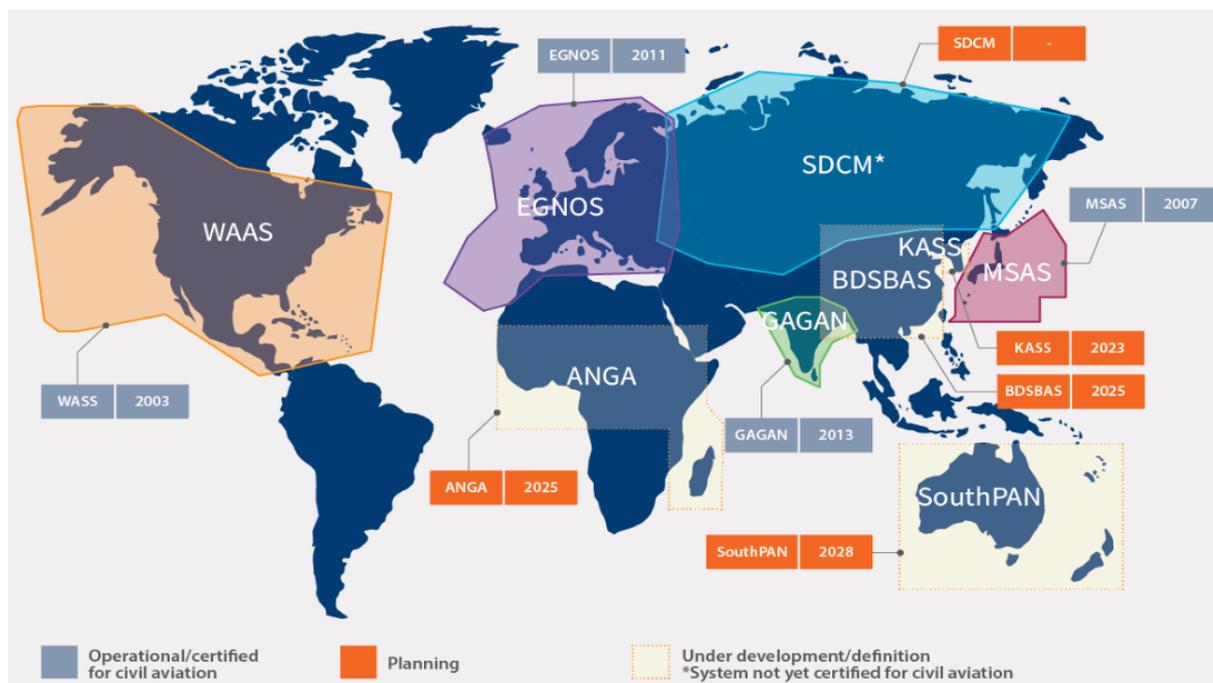


Figure 23 : représentation des zones couvertes par les différents systèmes SBAS déjà déployés ou en cours de développement à travers le monde, en 2023
(Source : Agence de l'Union européenne pour le programme spatial - EUSPA)

1.8.4.2 Développement de la capacité LPV pour les avions

1.8.4.2.1 Déploiement des systèmes LPV chez Airbus et Boeing

Chez Airbus, c'est la fonction SBAS Landing System (SLS) qui permet de réaliser des procédures RNP APCH avec des minima LPV⁴² lorsque celles-ci sont approuvées par les autorités nationales. La fonction SLS est proposée en option pour les avions sortant d'usine (*forward fit*) depuis :

- 2014 sur les A350 ;
- 2021 sur la famille A320 ;
- 2022 pour les A330 et A380.

Par ailleurs, sur la famille A220, la capacité LPV est fournie de base.

Airbus indique qu'un rétrofit est possible pour les avions non équipés initialement. Toutefois, selon l'ancienneté et le numéro de série de chaque avion, le rétrofit peut nécessiter le remplacement onéreux de nombreux équipements (FMGC, MMR, EFIS notamment).

Airbus a indiqué qu'à la fin 2022, moins de 500 avions sur la totalité de la flotte Airbus en service d'environ 10 000 avions étaient équipés de la fonction SLS. Environ 70 % des clients de l'A350 avaient choisi d'équiper leur avion avec cette fonction. Néanmoins, les disponibilités récentes de la fonction SLS entraînent un niveau de déploiement encore faible sur les flottes A320 ou A330.

Boeing n'a, à la date de publication de ce rapport, aucune fonction certifiée sur sa flotte pour réaliser des procédures RNP APCH avec des minima LPV. Contacté au cours de l'enquête, Boeing a indiqué être dans le processus de certification d'une fonction LPV dans le cadre du développement

⁴² En sélectionnant au FMS une procédure RNP APCH avec des minima LNAV ou LNAV/VNAV, un Airbus même équipé de la fonction SLS, réalisera l'approche avec la fonction baro-VNAV et donc avec un guidage vertical barométrique.

et de la certification du 777-9 (qui sera disponible pour l'ensemble de la famille 777X à l'issue), de même dans le cadre de la certification du 737MAX-10 (qui sera disponible pour l'ensemble de la famille 737MAX à l'issue).

Boeing indique être également en train d'étudier la possibilité de fournir la capacité LPV sur les autres modèles de sa flotte.

1.8.4.2.2 État de déploiement de la capacité LPV

Eurocontrol publie chaque trimestre sur son site Extranet un bilan des capacités PBN des aéronefs en Europe sur la base des éléments déclarés sur les plans de vol. Au cours de l'enquête, le BEA a pris connaissance du bilan établi pour le premier trimestre 2023 :

- en Europe⁴³, 26 % des avions étaient déclarés avec une capacité LPV. Ces avions assuraient 10 % des vols (sans forcément qu'ils aient réalisé des procédures RNP APCH avec minima LPV à chaque fois). Ces valeurs étaient déclinées comme suit :
 - 3 % des avions réalisant des vols réguliers étaient équipés, assurant 4 % des vols de ce type réalisés,
 - 49 % des avions effectuant d'autres types d'exploitation civile étaient équipés, assurant 42 % de ces vols,
- les données sont aussi présentées pour les principaux aéroports européens. À titre d'exemple, pour les trois aéroports français pour lesquels le détail est présenté :
 - Paris-Charles de Gaulle (LFPG) : 4 % des avions sont équipés, assurant 9 % des vols,
 - Paris-Orly (LFPO) : 3 % des avions sont équipés, assurant 4 % des vols,
 - Nice-Côte d'Azur (LFMN) : 26 % des avions sont équipés, assurant 21 % des vols.

Ces chiffres tendent à confirmer la différence en matière de capacité LPV entre l'aviation de transport commercial (peu équipée) et l'aviation générale IFR ou d'affaire (plus largement équipée).

1.8.4.2.3 Stratégies d'incitation au déploiement du LPV

En l'état actuel, en Europe, la stratégie consiste à promouvoir l'équipement LPV des aéronefs auprès des exploitants. Les arguments apportés sont l'accessibilité et la sécurité.

- L'Annexe 10 de l'OACI présente la stratégie mondiale relative à l'introduction et à l'utilisation d'aides non visuelles d'approche et d'atterrissage, dont un élément consiste à « *encourager les opérations APV, notamment celles qui utilisent le guidage vertical GNSS, pour améliorer la sécurité et l'accessibilité* ».
- La Commission européenne dans l'attendu du règlement IR-PBN explique que « *l'utilisation de systèmes de renforcement satellitaire (SBAS), en particulier sous la forme du système européen de navigation par recouvrement géostationnaire (EGNOS), devrait être promue, car il apparaît opportun, sur la base de considérations de sécurité et d'efficacité économique, de mettre en place des approches par minima de performance d'alignement de piste avec guidage vertical (LPV)* ». La Commission européenne a également précisé au BEA qu'elle offre des incitations pour que les avions soient équipés SBAS par le biais du programme EGNOS et du dispositif « *Connecting Europe Facility* ».
- L'AESA en 2022, a précisé [sur son site Internet](#) qu'étant donné qu'à partir du 6 juin 2030 les approches ILS CAT I ne seront utilisées qu'en cas d'urgence, les exploitants d'aéronefs devraient envisager d'équiper leurs aéronefs de capacité LPV.

⁴³ Est prise en compte par Eurocontrol la zone CEAC. Selon l'AESA, les valeurs applicables aux États membres AESA auxquels s'applique le [règlement IR-PBN](#) étaient, pour le premier trimestre 2023 : 35 % des avions déclarés avec une capacité LPV, assurant 10 % des vols.

Au moment de la rédaction de ce rapport, il n'existe pas et il n'est pas envisagé de mesure visant à imposer un système permettant de réaliser des procédures RNP APCH avec des minima LPV parmi les équipements de base d'un aéronef nouvellement produit ou nouvellement conçu.

1.9 Télécommunications

Les éléments présents dans ce paragraphe visent à compléter les informations de télécommunications déjà présentes dans le déroulement du vol.

1.9.1 Les échanges lors des premiers contacts avec l'approche initiale

L'équipage du vol NSZ4311 a contacté la contrôleuse d'approche initiale INI à 11 h 22, il est autorisé à l'approche LORNI 6 W pour la RNP27R. Il n'est pas fait mention de l'information d'ATIS à l'INI.

Les exigences règlementaires internationales⁴⁴ demandent pourtant aux équipages d'annoncer l'information ATIS lors du premier contact avec les services d'approche, et aux organismes de services de contrôle d'accuser réception de l'information ATIS.

Or, comme indiqué au § 1.17.1.3.4, le principe de fourniture du calage altimétrique repose sur une double transmission : par l'ATIS d'abord, puis par la première clairance d'altitude en dessous du niveau de transition.

1.9.2 Les différentes erreurs de transmission ou de collationnement

Un certain nombre d'erreurs de transmission ou de collationnement, rattrapées ou non par les contrôleurs aériens sont présentes dans l'incident grave.

- Lors des échanges avec la contrôleuse d'approche INI, le PM n'a pas collationné correctement à plusieurs reprises les instructions d'approche : il est autorisé LORNI 6 W, mais a collationné MOPIL 9 W, il est autorisé approche radar 27R, mais a collationné 26R. Ceci a été détecté et corrigé à chaque fois par la contrôleuse INI.
- De même, lors des premiers échanges avec la contrôleuse d'approche ITM, le PM n'a pas collationné correctement l'instruction d'approche : il est autorisé PG 6 5 0, mais a collationné PG 5 6 0. Ceci a été détecté et corrigé par la contrôleuse ITM.
- S'en suivent les trois erreurs de transmission de QNH erroné par la contrôleuse ITM : deux fois au vol NSZ4311, correctement collationné avec le QNH erroné, et une fois au vol easyJet EZY75VA (avec une erreur d'énonciation de l'indicatif *Mike Alpha vs Victor Alpha*), avec un collationnement du QNH correct, mais différent de celui annoncé, sans que cela ait été relevé par la contrôleuse.
- Lors de la remise de gaz, le contrôleur LOC a demandé à l'équipage du vol NSZ4311 de tourner à droite, cap 360, de monter à 5 000 ft QNH 1 001. Le PM a collationné correctement la première partie du message, il a cependant collationné le QNH des altimètres à 1 011 hPa. Ceci n'a pas été relevé par le contrôleur LOC N, ni par l'assistant LOC N qui était en coordination téléphonique avec l'assistant LOC S (voir ci-après).
- Enfin, lors de la seconde approche, la contrôleuse ITM, qui gérait en regroupement à la fois la position ITM Nord et la position ITM BA, a envoyé par erreur l'équipage du vol NSZ4311 vers la fréquence du Bourget vers laquelle elle venait d'envoyer plusieurs avions. Le PM est ensuite revenu demander la fréquence de la tour Nord qui lui a été correctement transmise.

⁴⁴ Doc 4444 PANS-ATM de l'OACI, SERA 9010, ATS.TR.320.

1.9.3 Les échanges à propos de la rampe d'approche

Lors de la première approche du vol NSZ4311, le contrôleur LOC N avait allumé le balisage lumineux de la piste, il avait cependant oublié d'allumer la rampe d'approche. Plusieurs échanges de radiocommunication et de coordination téléphonique ont eu lieu entre différents équipages et contrôleurs aériens sur le sujet du balisage lumineux.

- Sur la fréquence de la tour Sud tout d'abord, à 11 h 40 min 58, un équipage a demandé au contrôleur LOC S d'allumer le balisage lumineux. L'ensemble du balisage lumineux de la piste 26L a ensuite été allumé par les contrôleurs en tour Sud.
- À 11 h 42 min 06 et pendant l'échange de l'équipage avec le contrôleur LOC N à propos de la remise de gaz, l'assistant LOC S a contacté l'assistant LOC N pour l'informer que le balisage lumineux de la rampe d'approche de la piste 27R n'était pas allumé.
- À 11 h 42 min 30, la rampe d'approche 27R a été allumée par le contrôleur LOC N.
- Le contrôleur LOC N a ensuite demandé à l'équipage du vol easyJet EZY75VA qui suivait le vol NSZ4311 pour la piste 27R s'il voyait les lumières et la piste. L'équipage a répondu : « *Euh negative yet ... visual with the ground but euh ... just euh ... not yet* » puis à 11 h 43 min 19 : « *Okay we have visual now 1 000 feet RA* ».
- Enfin, lors de la deuxième approche, l'équipage du vol NSZ4311 a demandé à la tour si la rampe d'approche était bien allumée.

1.9.4 Utilisation de la langue anglaise et française

Après avoir transmis en anglais les trois informations erronées de QNH, la contrôleuse ITM a autorisé en français un équipage Air France à descendre à 5 000 ft avec le QNH correct 1 001 en utilisant l'expression française « *mille un* ». En France, d'après le règlement (UE) n° 923/2012⁴⁵ « *SERA*⁴⁶ » ainsi que les dispositions françaises particulières (voir § 1.17.1.3.2) SERA FRA.14015 a) Langue à utiliser dans les communications air-sol : « *La langue habituellement utilisée par la station au sol est le français* », il peut y avoir une utilisation mixte des langues anglaise et française lors des radiocommunications.

Il est de plus précisé au SERA FRA.14035 Transmission des nombres que : « *En langue française, un nombre peut être transmis comme on l'énonce dans la vie courante ou comme une suite de nombres. Dès que la lisibilité des transmissions n'est pas satisfaisante ou en cas d'ambiguïté, la règle générale s'applique* ». Ainsi le QNH 1 0 0 1 doit s'énoncer en anglais "*one zero zero one*", mais peut s'énoncer en français « *mille un* », ce qui est fait dans la majeure partie des cas, et non pas « *unité zéro zéro unité* ».

L'équipage d'Air France a collationné correctement le message. Cet échange ne pouvait être compris par l'équipage de l'incident grave qui ne parlait pas français. Toutefois, les deux échanges suivants, réalisés en anglais et à destination de deux autres équipages avant que le vol NSZ4311 ne quitte la fréquence, comprenaient bien le QNH correct énoncé en anglais.

⁴⁵ Règlement d'exécution de la Commission du 26 septembre 2012 établissant les règles de l'air communes et des dispositions opérationnelles relatives aux services et procédures de navigation aérienne ([Version en vigueur le jour de l'incident grave](#)).

⁴⁶ Règles de l'air européennes normalisées.

1.10 Renseignements sur l'aérodrome et la navigation aérienne

L'aéroport Paris-Charles de Gaulle est un aéroport international ouvert au trafic aérien commercial. Il comporte deux doublets de deux pistes parallèles orientées est/ouest (084°/264°). Chaque doublet est généralement exploité de la même manière en opérations spécialisées : les avions atterrissent sur la piste extérieure (piste 09L/27R pour le doublet nord et 08R/26L pour le doublet sud) et décollent depuis la piste intérieure (piste 09R/27L pour le doublet nord et 08L/26R pour le doublet sud).

1.10.1 Balisage lumineux

Chacune des huit extrémités de pistes est équipée d'un balisage lumineux permettant de réaliser des approches de précision de catégories 3, et comporte ainsi une rampe d'approche de 900 m (encastrée sur 600 m en amont des seuils décalés 26R et 27L) en plus du balisage lumineux de piste axial et latéral. Chacune des huit extrémités de piste est également équipée d'un indicateur de pente d'approche (PAPI) réglé à 3°/5.2 %.

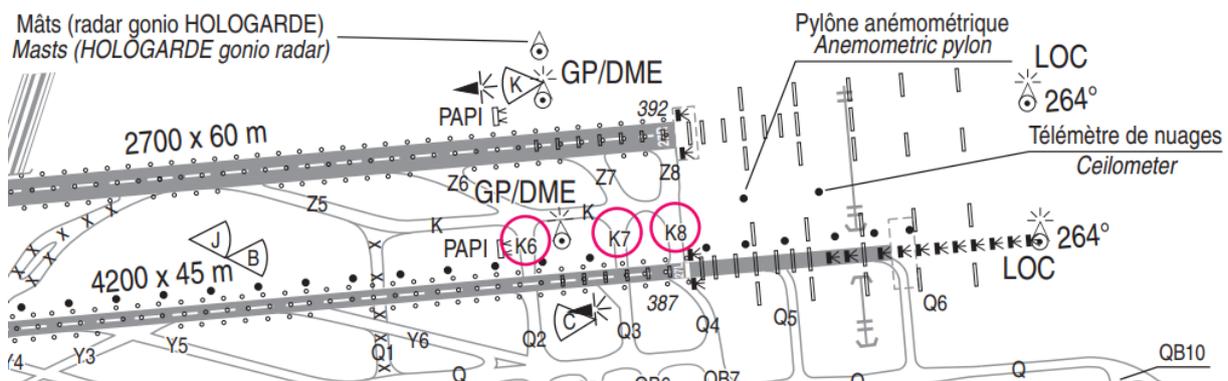


Figure 24 : balisage lumineux de la piste 27R de CDG (Source : SIA)

Les relevés du balisage lumineux de CDG indiquent que le jour de l'incident grave :

- le PAPI de la piste 27R a été allumé avec une intensité de 4/4 à 7 h 31 ;
- le balisage de la piste 27R ainsi que de la zone de toucher (TDZ) a été allumé avec une intensité 2/4 à 11 h 38 min 30, soit environ trois minutes avant l'incident grave ;
- le balisage de la rampe d'approche 27R a été allumé avec une intensité 3/4 à 11 h 42 min 30, soit pendant la remise de gaz du vol NSZ4311.

Le règlement (EU) 2017/373 « [ATM/ANS](#) »⁴⁷, en accord avec le doc 4444 « PANS-ATM » de l'OACI, prévoit que tous les feux aéronautiques de surface soient allumés durant la nuit aéronautique ainsi que « à tout autre moment où, en raison des conditions météorologiques, leur emploi sera jugé souhaitable pour la sécurité de la circulation aérienne ». Il est de plus demandé que « le balisage lumineux d'approche devrait également être allumé :

- a) pendant le jour sur la demande d'un aéronef effectuant une approche ;
- b) lorsque les feux de piste correspondants sont allumés. »

⁴⁷ AMC1 ATS.TR.150.

Le Manex de CDG indique que le balisage lumineux d'approche doit être allumé de nuit ou lors de conditions de faible visibilité Pré LVP et LVP (*Low Visibility Procedures*). La gamme d'intensité du balisage doit être adaptée à la demande des équipages et des conditions météorologiques en temps réel. Les conditions météorologiques associées sont les suivantes :

- les PRE LVP sont mises en œuvre dès que RVR < 800 m ou HBN⁴⁸ < 300 ft ;
- les LVP sont mises en œuvre sur un doublet à CDG dès que RVR ≤ 600 m ou HBN ≤ 200 ft.

Lors de l'incident grave, les conditions météorologiques ne correspondaient pas à un passage en exploitation Pré LVP ou LVP. Aucune obligation réglementaire ou procédurale concernant l'allumage du balisage n'était donc applicable, à l'exception de celle demandant l'allumage simultané du balisage de piste et de la rampe d'approche.

À titre d'exemple et d'après l'AIR OPS⁴⁹, la réalisation d'une approche similaire à celle de l'incident grave (RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV et une DH à 360 ft) sans rampe d'approche (*No Approach Lighting System*, NALS) nécessiterait une portée visuelle de piste (*Runway Visual Range*, RVR) supérieure à 1 600 m. Pour rappel (voir § 1.7.2), la RVR mesurée à CDG lors des deux approches était supérieure à 2 000 m.

1.10.2 Équipements, procédures IFR et cartes d'approche

L'aéroport Paris-Charles de Gaulle (CDG) est équipé d'ILS de catégorie de performance III pour chacune de ses huit extrémités de piste.

Les trois types de procédures PBN (RNP APCH avec des minima LNAV, LNAV/VNAV et LPV) sont publiés sur chacune des huit extrémités de piste. Il y est indiqué que la température minimale pour réaliser les approches baro-VNAV est de -20 °C.

Sur la période incluant le jour de l'incident grave, du 16 mai au 31 mai 2022, les ILS des pistes 09L et 27R étaient hors service pour cause de travaux de remplacement des antennes ILS. Cela était indiqué par NOTAM.

La carte d'approche finale pour les procédures PBN de la piste 27R publiée dans l'AIP par le Service de l'Information Aéronautique (SIA) est la suivante :

⁴⁸ Hauteur de la base des nuages.

⁴⁹ AMC5 CAT.OP.MPA.110 Aerodrome operating minima de l'[AIR OPS](#).

APPROCHE AUX INSTRUMENTS

PARIS CHARLES DE GAULLE

Instrument approach

CAT A B C D

ALT AD : 392, THR : 392 (14 hPa)

FNA RNP RWY 27R

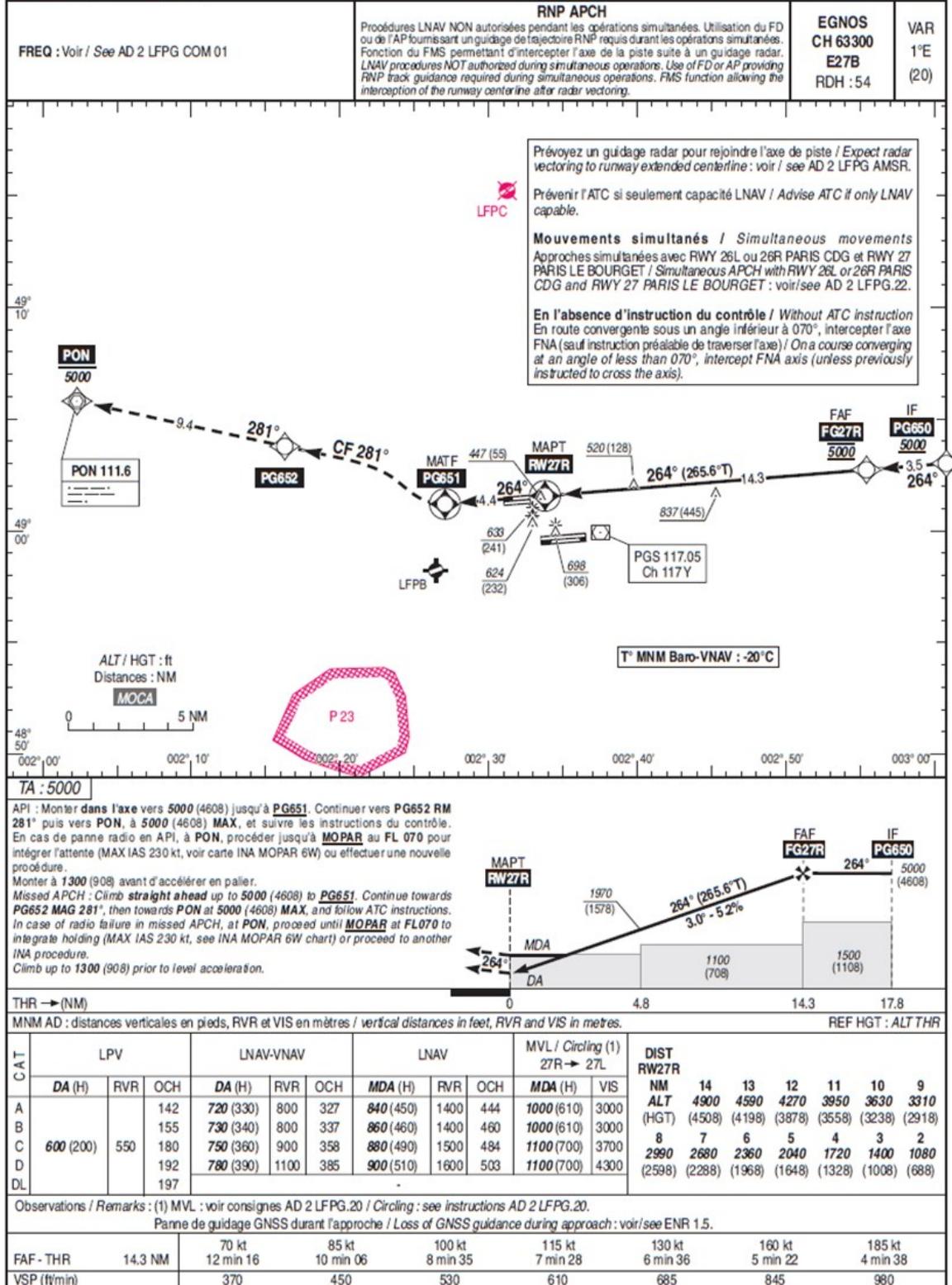


Figure 25 : procédure d'approche PBN piste 27R CDG (Source : SIA)

L'équipage utilisait la carte d'approche fournie par le prestataire de données de navigation NavBlue :

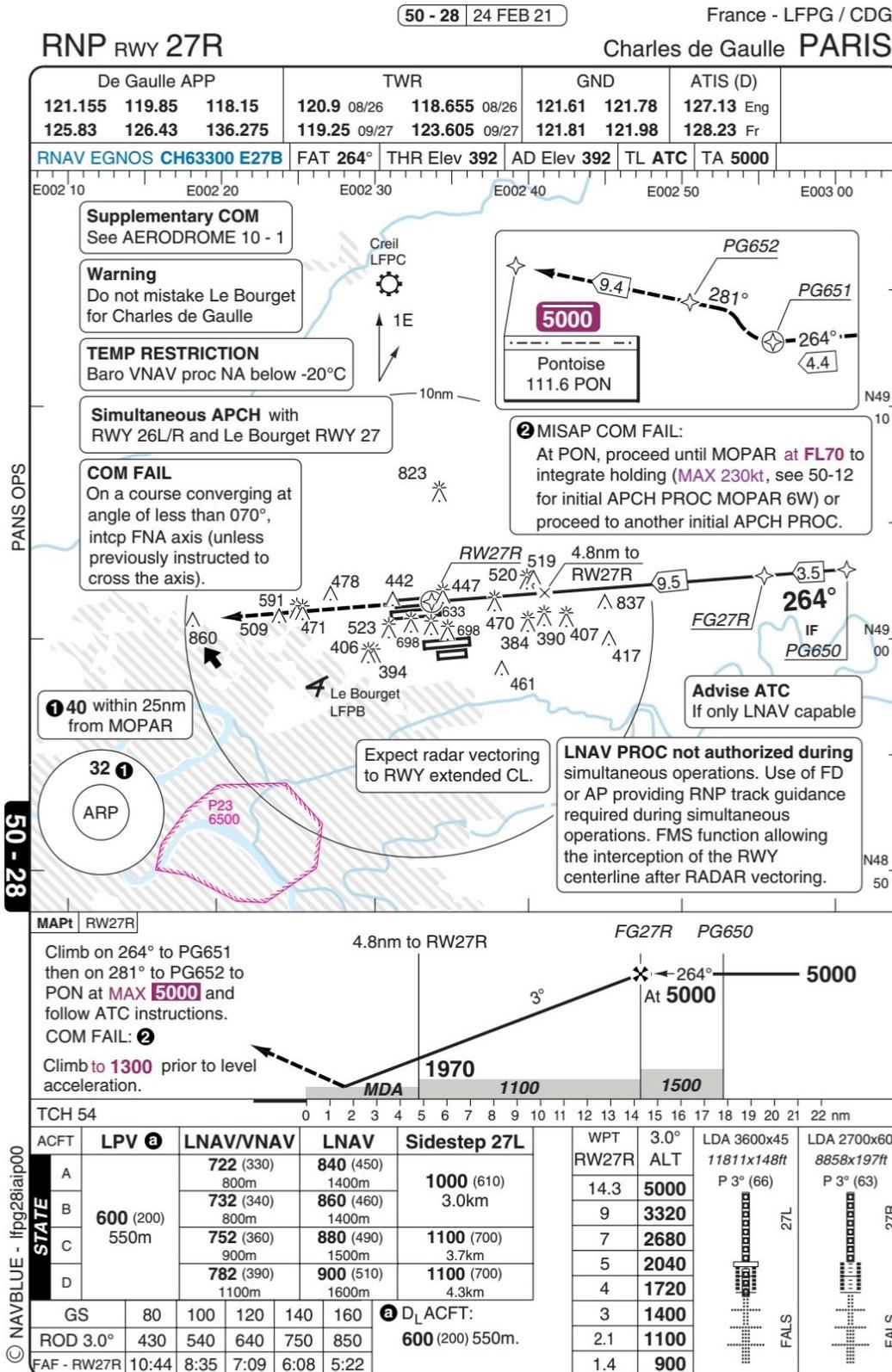


Figure 26 : carte d'approche utilisée par l'équipage (Source : AirHub Airlines)

On peut notamment identifier les différences suivantes :

- la carte NavBlue ne reprend qu'une partie des altitudes-distances de l'AIP ;
- les altitudes-distances de NavBlue, le repère de descente (*Step Down Fix*, SDF) ainsi que les altitudes minimales de sécurité ne reprennent pas les hauteurs indiquées dans l'AIP.

Certaines de ces différences, et notamment le fait que les hauteurs des couples altitude-distance ou du SDF ne sont pas reprises, sont aussi communes à d'autres prestataires de données de navigation comme LIDO ou Jeppesen.

1.10.3 Systèmes du contrôleur aérien à CDG

Différents systèmes sont à la disposition des contrôleurs aériens de CDG. Uniquement ceux en rapport avec l'incident grave sont détaillés ici.

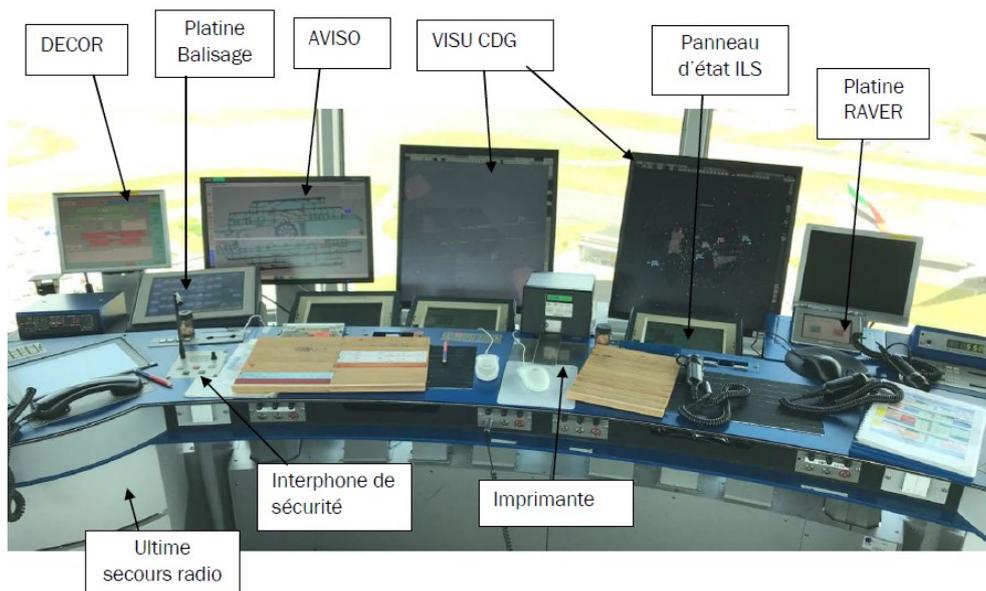


Figure 27 : systèmes à la disposition du contrôleur LOC à CDG (Source : Manex CDG)



Figure 28 : exemple d'une position de contrôle en salle d'approche à CDG (Source : BEA)

1.10.3.1 DECOR, ISATIS et BOREAL

DECOR (Données environnement contrôle pour Paris-Orly et Paris-Charles de Gaulle) est le système de distribution d'informations générales pour les services de navigation aérienne à CDG et Paris-Orly, incluant notamment des informations sur la météorologie, l'ATIS, les moyens de radionavigation et l'occupation des pistes. La même interface est utilisée pour les positions tour et les positions d'approche. C'est sur cet écran DECOR que se basent les contrôleurs pour donner la valeur du QNH.

Les informations météorologiques sont générées automatiquement à partir des serveurs de Météo-France, renouvelées au moins toutes les minutes et transmises automatiquement aux systèmes ATM de CDG. Il ne peut pas y avoir ainsi de problème de retranscription du QNH lié à des erreurs humaines, que ce soit pour les METAR, l'ATIS, ou les informations contenues dans DECOR.

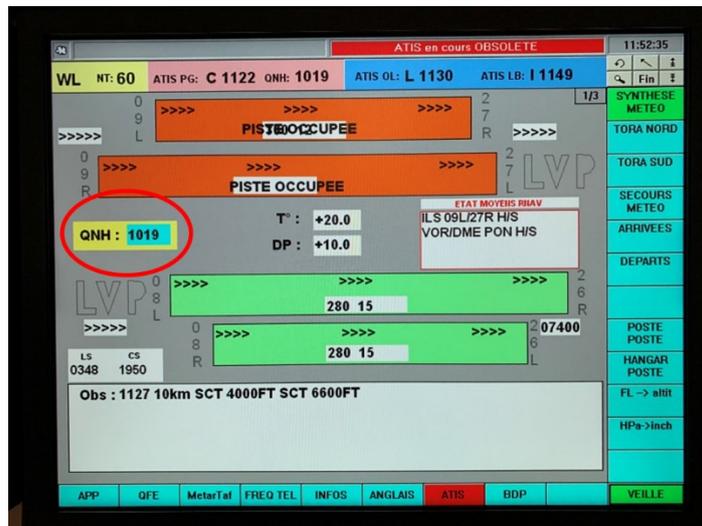


Figure 29 : exemple d'une visualisation de l'écran DECOR avec l'information QNH (Source : BEA)

Le système de saisie et de diffusion des ATIS à CDG, ISATIS, utilise les informations météorologiques directement importées des données de Météo-France. Tout changement d'un hectopascal du QNH doit faire l'objet d'une mise à jour de l'ATIS. Les informations ATIS sont également diffusées par liaison data-link (D-ATIS⁵⁰).

BOREAL (Balisage opérationnel avec retour d'état et d'alarme) est le système de supervision du balisage lumineux de l'aéroport. Il fournit une synthèse en temps réel de l'état du balisage. Le Chef de Tour a la responsabilité de la gestion du balisage lumineux. Il peut déléguer cette responsabilité au contrôleur LOC. Plusieurs fonctions du balisage sont commandables et notamment la piste, la rampe d'approche, le PAPI, etc. Il est possible de sélectionner le niveau de brillance de chacun des éléments.

Pour chacun des QFU, la touche balisage (BAL) peut permettre d'allumer en une seule fois l'ensemble du balisage lumineux disponible et notamment la rampe d'approche, la TDZ, la piste et le PAPI.

⁵⁰ Digital-ATIS. En France, les aéroports possédant un système D-ATIS sont les suivants : CDG, Paris-Orly, Nice, Lyon et Pau.

1.10.3.2 Visualisation des plots radar

Filets de sauvegarde

Différents filets de sauvegarde sont présents à CDG dont :

- STCA (*Short Term Conflict Alert*), système anticipant une perte des séparations minimales radar à court terme. En cas d'alerte, l'indication **STCA** apparaît en ligne 0 de l'étiquette radar pour les appareils concernés, en alternant les couleurs orange et gris ;
- MSAW (*Minimum Safe Altitude Warning*), système de détection d'un risque de collision avec le relief à court terme. En cas d'alerte, l'indication **MSAW** apparaît en ligne 0 de l'étiquette radar, en alternant les couleurs orange et gris (voir § 1.10.4 pour plus de détail sur le fonctionnement du MSAW).

Affichage de l'altitude

Le système de visualisation radar de CDG, ODS (*Operating Display System*), est issu d'un système développé pour les centres en route. Il n'existe pas dans ce système une fonction de changement automatique d'affichage de l'altitude qui permet de passer d'une indication en niveau de vol à une indication en altitude QNH sous le niveau de transition.

Ainsi par défaut, les altitudes des aéronefs sur les écrans ODS des contrôleurs (APP ou LOC) sont affichées en niveau de vol (FL, altitude pression avec une référence à 1 013 hPa) à partir des données du transpondeur mode C de l'avion. Le transpondeur mode C fournissant directement une valeur en niveau de vol, celle-ci ne dépend donc pas du calage altimétrique des instruments des pilotes.

L'outil de visualisation dispose toutefois d'un bouton « Alt » permettant l'affichage temporaire en altitude QNH de tous les avions, tant que ce bouton est maintenu appuyé. Cette altitude QNH est calculée à partir des données du mode C des avions et du QNH fourni par Météo-France aux différents systèmes ATM, elle est donc indépendante du calage altimétrique de l'avion. L'altitude est alors précédée d'un « A » sur l'étiquette radar.

Ce bouton n'a pas été utilisé par les contrôleurs aériens lors de l'incident grave.



Figure 30: affichage à CDG de l'altitude en FL (à gauche) et en altitude QNH par appui maintenu sur « ALT » sur ODS (à droite) (Source : Manex CDG)

Une consigne nationale de la DSNA/DO recommande aux organismes de contrôles qui ne sont pas équipés d'ODS (CDG est donc exclu de cette consigne) d'afficher automatiquement en altitude QNH sous le niveau de transition. Toutefois, plusieurs organismes de contrôle conservent par défaut encore aujourd'hui un affichage en niveau de vol (1 013 hPa). C'est le cas par exemple de Nantes et Paris-Orly.

En l'absence d'une visualisation dans le plan vertical, la détection d'un écart d'altitude est difficile en dehors d'un palier.

Lors de la première approche, le palier d'interception du FAF à 5 000 ft a été très court, de l'ordre d'un demi-nautique rendant très difficile la détection de l'écart.

Lors de la branche vent arrière pour la deuxième approche, l'avion est resté environ sept minutes en palier avec une clairance à 5 000 ft. L'étiquette radar affichait une altitude en niveau de vol « 050 » (ou 051 suivant la précision) au lieu de « 053 » (ou 054) attendu pour une autorisation à 5 000 ft avec un calage altimétrique de l'avion réglé à 1 001 hPa.



Figure 31 : étiquette radar du vol NSZ4311 à 11 h 45 min 58, lors de la branche vent arrière pour la seconde approche (Source : DSNA)

Dans l'hypothèse d'un affichage automatique au QNH sous le niveau de transition, l'étiquette radar du vol NSZ4311 aurait affiché une valeur d'altitude « A047 » avec une altitude sélectionnée à 5 000 ft « @050 » (voir ci-dessous) alors que les étiquettes des autres vols autorisés à 5 000 ft avec un calage altimétrique de l'avion réglé à 1 001 hPa auraient affiché une altitude de « 050 » pour une altitude sélectionnée « @050 ».

Informations de surveillance renforcée en mode S EHS

Le système permet d'afficher des données en mode S EHS. Trois paramètres peuvent être affichés, avec de gauche à droite : le niveau de vol (altitude ou niveau) sélectionné par l'équipage, la vitesse indiquée en nœuds, le cap magnétique instantané.



Figure 32 : données EHS disponibles pour le contrôleur aérien (Source : Manex CDG)

Le calage altimétrique fait partie des informations descendantes via le mode S EHS au travers du paramètre BPS (*Barometric Pressure Setting*). À CDG, ce paramètre n'est pas traité par les systèmes ATM (voir § 1.18.2).

1.10.4 Système sol d'alerte de proximité du relief (MSAW)

1.10.4.1 Principe de base

Le système MSAW, *Minimum Safe Altitude Warning*, est un outil de prévention sol des collisions avec le relief. Ce filet de sauvegarde alerte les contrôleurs aériens du rapprochement dangereux d'un aéronef avec le sol et les obstacles.

En France, le MSAW permet à la fois une protection d'un danger en dessous et d'un danger en face de l'aéronef avec deux types de prédiction. Une certaine marge au relief est considérée pour chacun d'entre eux :

- prévision d'un danger en dessous, par prédiction de l'altitude après un temps d'extrapolation ;
- prévision d'un danger en face, par prédiction de la position après un temps d'extrapolation, en conservant l'altitude courante.

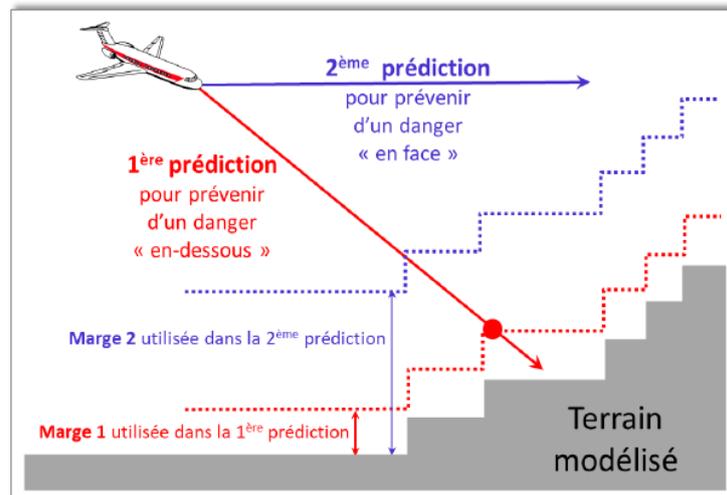


Figure 33 : principe de base MSAW (Source : DSNA)

Le MSAW se base sur :

- la valeur de l'altitude envoyée par le Mode C du transpondeur de l'aéronef (information du niveau de vol, altitude-pression à 1 013 hPa), indépendante du calage altimétrique à bord. Cette valeur est corrigée de la valeur du QNH fourni automatiquement par les stations de Météo-France et incorporée dans les systèmes des services de la navigation aérienne ;
- une base de données du relief et des obstacles à proximité de l'aérodrome.

À CDG, ce système est actif sur un carré de 64 NM de côté centré sur l'aéroport, à l'intérieur duquel le relief est modélisé par des carrés de 0,5 NM de côté incluant les principaux obstacles artificiels isolés.

CDG est le seul site en France pour lequel le service de prévention des collisions avec le sol est rendu avec un pas de quantification de 100 ft, tandis que pour tous les autres sites français dotés d'un MSAW, le calcul est fait avec un pas de quantification de 25 ft.

Pour la prévision de la collision avec le relief situé en dessous de l'aéronef, une alerte est générée si la prédiction de la trajectoire au relief, ou à un obstacle le cas échéant, devient inférieure à une marge fixée à 300 ft.

Le temps d'extrapolation de la position de l'aéronef par le MSAW vise à prendre en compte le temps d'élaboration et de diffusion de l'alerte au contrôleur, le temps de réaction du contrôleur à l'alerte, le temps de transmission de l'information de vol et le temps de réaction du pilote et de l'aéronef. À Paris-Charles de Gaulle, ce temps de prédiction de la position est de 34 s. Au sein de la DSNA, seule la durée d'élaboration/diffusion de l'alerte suivant le cycle de visualisation radar peut varier, entre 4 et 8 s, en fonction de l'organisme où est installé le MSAW.

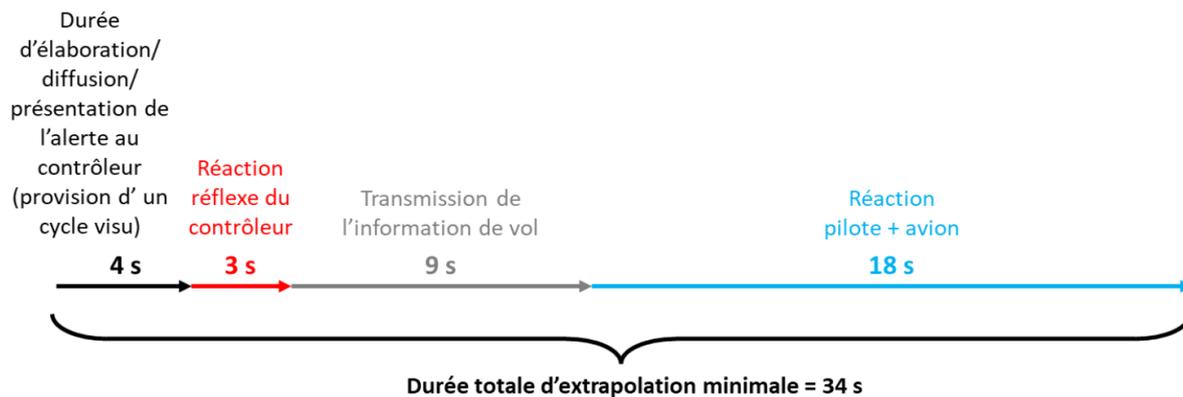


Figure 34 : hypothèses pour la détermination de la durée d'extrapolation (Source : DSNA)

Une alerte MSAW se traduit par :

- l'affichage de la piste radar de l'aéronef sur les écrans des contrôleurs dans le cas où elle n'était pas affichée ;
- un libellé « MSAW » clignotant en ambre et complétant l'étiquette radar de l'aéronef ;
- une alerte sonore « Bip bip, alerte relief ».

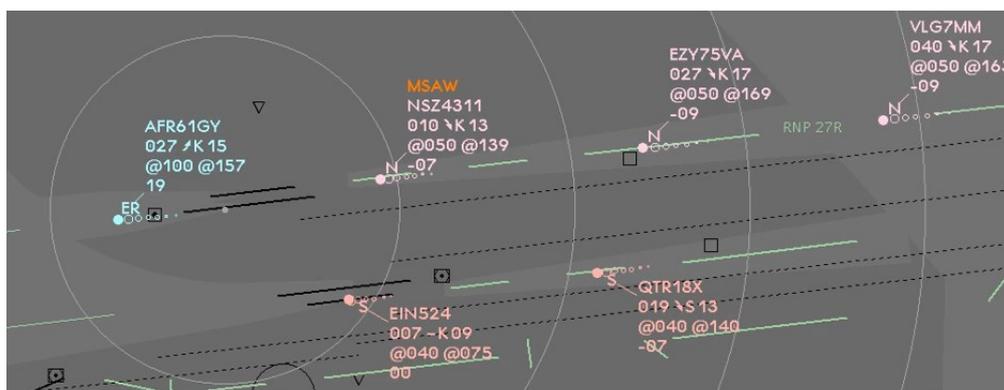


Figure 35 : rejetu réel de l'écran radar ODS du contrôleur LOC N lors du déclenchement du MSAW de la première approche (Source : DSNA)

Ces alertes sont visibles et audibles sur toutes les positions radar des contrôleurs aériens. L'alerte MSAW se déclenche sans délai dès que les conditions de prédiction sont remplies, et reste affichée tant que les conditions d'activation sont présentes.

1.10.4.2 MSAW en approche finale

Afin de limiter les alertes intempestives, en France, un filtre spécifique est mis en place pour les approches finales avec la création d'un Plan de Descente (PdD). Dans ce volume de traitement, une alerte MSAW est générée uniquement si les conditions précédentes sont remplies (trajectoire de l'avion extrapolée à 34 s qui pénètre dans la marge de 300 ft) et que l'avion se situe sous le PdD. Au-dessus de ce plan de descente, toute alerte de prédiction de collision est inhibée.

Le jour de l'incident grave, le paramétrage des zones d'alerte MSAW, incluant le paramétrage du filtrage par PdD, était la V6R1, version opérationnelle à CDG depuis 2009. Le volume des PdD des MSAW sont notamment définis par :

- un point à leur base (P1), situé à une altitude de 390 ft à CDG ;
- une pente (α), de 2,85° à CDG ;
- une largeur (L), de 0,09 NM à CDG ;
- une hauteur (Hmax) à partir de laquelle le filtrage est effectué, de 1900 ft à CDG.

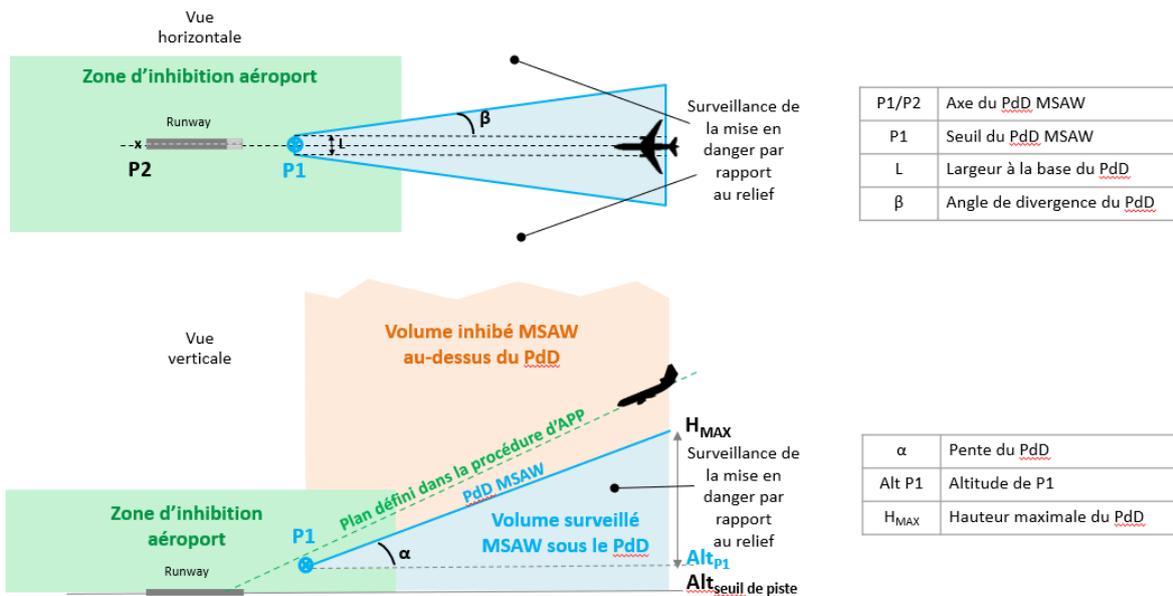


Figure 36 : surveillance MSAW en approche finale (Source : DSNA)

La pente α est déterminante pour le filtrage. Son choix doit permettre à la fois d'éliminer les alertes intempestives (ne pas déclencher d'alerte pour un avion proche de l'atterrissage s'il est bien sur le plan attendu), tout en conservant les alertes pour prévenir d'une collision avec le sol. Le choix du point P1 doit permettre d'éviter des alertes intempestives dues aux véhicules sol et à la circulation des aéronefs sur l'aéroport.

1.10.4.3 Étude du comportement du système MSAW

Lors de l'incident grave

Les données radar du jour de l'incident grave ont montré que trois alertes MSAW ont été générées : deux lors de la première approche et une lors de la deuxième.

Bien que les deux approches de l'avion aient été réalisées sur un plan de descente quasi identique, l'alerte MSAW s'est déclenchée au cours de la première approche lorsque l'avion avait une hauteur radio-altimètre de 239 ft RA, alors qu'elle était de 842 ft RA au cours de la deuxième.

L'étude du comportement du système MSAW réalisée avec les services de la DSNA/DTI a montré que le plan d'approche à 3° suivi par le 9H-EMU, du fait du calage altimétrique erroné, était quasiment tangent, dans les cinq derniers nautiques de chaque approche, au PdD du MSAW de 2,85°.

L'incertitude et l'imprécision dans l'altitude de l'avion du point de vue radar, combinée à la quasi-tangentialité de la trajectoire de l'avion au PdD du MSAW ainsi que le codage de l'altitude à 100 ft près, permettent d'expliquer la différence dans la génération des alertes MSAW entre les deux approches.

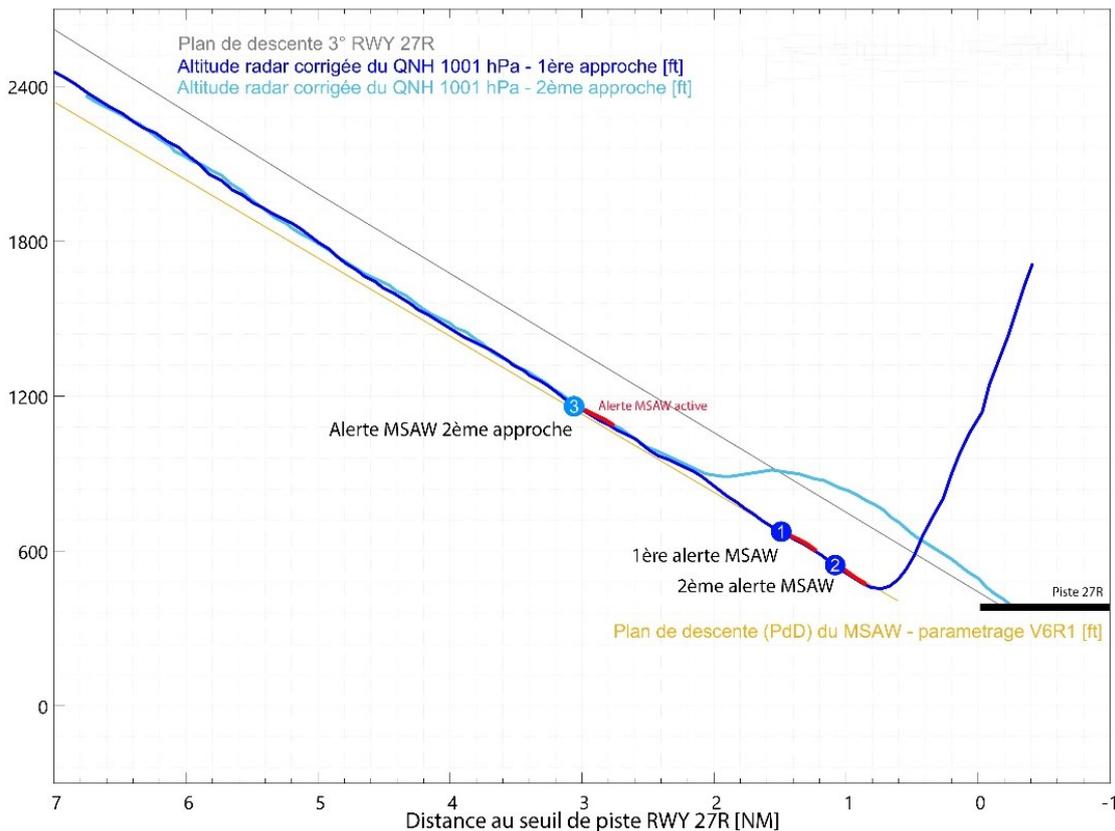


Figure 37 : trajectoire verticale du 9H-EMU lors des deux approches et alertes MSAW
(Source : BEA)

Historique du versionnage MSAW à CDG

En 2013 et à la suite d'identification de plusieurs fausses alertes MSAW, ainsi que d'une alerte MSAW manquante lors d'une situation le nécessitant, l'organisme de CDG a exprimé à la DSNA/DTI une demande de modification du paramétrage MSAW.

Cela a été l'occasion pour la DSNA/DTI de réaliser une profonde révision du paramétrage MSAW (et particulièrement des PdD). On peut noter par exemple que :

- pour les doublets Sud 08 et Nord 09 (arrivées face à l'est), un seul PdD était défini pour les deux pistes du doublet, sachant que les pistes ont un seuil de piste décalé l'une par rapport à l'autre. Ainsi, le PdD n'était correct que pour une seule piste du doublet et trop permissif pour l'autre ;
- les PdD étaient parfois trop permissifs car de pente trop faible ;
- certaines zones d'inhibition étaient à corriger ;
- la base de données des obstacles n'était pas à jour.

En 2017, la DSNA/DTI a livré à CDG un nouveau paramétrage V7R1. Parmi les nombreux changements, la position du point d'origine, la pente ainsi que la largeur des PdD ont notamment été modifiées dans cette nouvelle version.

Une succession et une accumulation de dysfonctionnements techniques et d'implémentation, de manque de ressources, ainsi que la génération de nombreuses alertes intempestives lors de la phase de test de cette nouvelle version V7R1 ont empêché sa mise en service opérationnelle avant le jour de l'incident grave.

Les simulations réalisées par la DTI avec la V7R1 à partir des données de l'incident grave du 9H-EMU ont montré qu'avec le paramétrage du PdD de cette version, l'alerte MSAW de la première approche se serait déclenchée dès que la marge au relief prévue dans 34 s serait devenue inférieure à 300 ft, vers 11 h 41 min 01 (soit environ 30 s plus tôt que lors de l'incident grave avec la V6R1), à une altitude d'environ 1 265 ft QNH 1 011 (992 ft QNH 1 001, 665 ft RA) à 2,6 NM du seuil de piste.

En avril 2023, à la suite de l'incident grave du 9H-EMU, une nouvelle version V7R1 a été mise en service opérationnel. En septembre 2023, la DNSA a indiqué au BEA que le nouveau paramétrage MSAW V7R1 avait été abandonné et que le paramétrage V6R1 avait été rétabli. Ce recul a été motivé par de nombreuses alertes intempestives durant l'été 2023 dues à l'effet cumulé de conditions météorologiques particulières correspondant à des températures élevées combinées à un QNH faible et des erreurs d'arrondi liées au pas de quantification de 100 ft, qui entraînaient un positionnement des avions vu par le système MSAW très en dessous de leur positionnement réel. Depuis, la DSNR travaille sur un paramétrage V8, en évaluation avec CDG depuis octobre 2023 et dont la mise en service est prévue à l'été 2024.

Standardisation

Il n'existe aucune obligation réglementaire au niveau européen pour implémenter les systèmes de détection de risque de collision avec le relief de type MSAW, ni d'exigence ou d'élément de standardisation officiel pour le paramétrage de tels systèmes. Les éléments concernant les procédures et la phraséologie MSAW sont développés dans le paragraphe 1.17.1.3.6.

Eurocontrol a toutefois développé en coopération avec certains prestataires de services de la navigation aérienne et particulièrement la DSNR, un guide en trois parties sur le système MSAW afin de promouvoir son implémentation ainsi qu'une certaine standardisation. Ce guide, sans valeur réglementaire, [est disponible en ligne](#).

Il est également important de noter que le système MSAW décrit dans ce guide ne s'applique pas vraiment pour l'approche finale, pour laquelle une fonction spécifique doit être mise en place pour éviter des alertes intempestives à chaque atterrissage. Ainsi le guide III indique au § 2.7 Zones d'exclusion MSAW : « *le système MSAW n'est pas très adapté pour se protéger contre les déviations par rapport à la trajectoire d'approche finale prévue. Il est recommandé de supprimer le fonctionnement du MSAW à proximité immédiate des aéroports et d'installer un Approach Path Monitor (APM) pour couvrir l'approche finale* ».

Ceci est cohérent avec les définitions d'Eurocontrol, à savoir :

- *Minimum Safe Altitude Warning, MSAW* : « *un filet de sauvegarde sol destiné à alerter le contrôleur aérien d'un risque d'accidents d'impact sans perte de contrôle (CFIT) en générant, en temps opportun, une alerte de proximité de l'aéronef avec le relief ou des obstacles* » ;
- *Approach Path Monitor, APM* : « *un filet de sauvegarde sol destiné à alerter le contrôleur aérien d'un risque d'accidents d'impact sans perte de contrôle (CFIT) en générant, en temps opportun, une alerte de trajectoire de vol dangereuse de l'aéronef pendant l'approche finale* ».

Approach Path Monitor (APM)

L'OACI ou l'AESA ne font pas référence aux systèmes APM, qui n'ont donc pas de définition réglementaire et encore moins de standardisation.

Un [guide](#) similaire à celui développé pour le MSAW est mis à disposition par Eurocontrol pour l'APM. La définition d'Eurocontrol n'implique pas la détection d'un écart au plan d'approche finale comme pourrait le sous-entendre son nom. Les guides incluent des descriptions conceptuelles, mais ils n'incluent pas de spécificités techniques pour la définition des volumes de surveillance ou de méthode unique pour la détection.

L'absence de critères précis dans la définition de l'APM induit des disparités dans les fonctionnalités développées en Europe. En France, la DSNA indique que la fonctionnalité APM est en partie rendue par le MSAW, car il permet la prévention des CFIT pour la phase d'approche finale. Elle indique également réfléchir à l'intégration d'une fonctionnalité APM au sens propre de l'acronyme, c'est-à-dire à une fonctionnalité de surveillance de la position de l'avion par rapport au plan d'approche théorique. Une telle fonctionnalité permettrait également la détection d'approche non stabilisée.

1.11 Enregistreurs de vol

L'incident grave a été identifié quelques jours après sa survenue et les données des enregistreurs de vol FDR et CVR n'étaient plus disponibles.

Les données de l'enregistreur non-protégé DAR (*Direct Access Recorder*), similaires aux données FDR, les données audios et radar des services de la navigation aérienne de CDG ont pu être récupérées et synchronisées sur la base de temps du DAR.

Plus de 500 paramètres étaient enregistrés dans les données de vol du DAR. Un certain nombre de paramètres ne l'étaient pas tels que la position des directeurs de vol (FD), la déviation verticale (V/DEV), ou les alertes de type *master caution*.

1.12 Renseignements sur l'épave et sur l'impact

Sans objet.

1.13 Renseignements médicaux et pathologiques

Sans objet.

1.14 Incendie

Sans objet.

1.15 Questions relatives à la survie des occupants

Sans objet.

1.16 Essais et recherches

Sans objet.

1.17 Renseignements sur les organismes et la gestion

1.17.1 Service de la navigation aérienne en France

1.17.1.1 Responsabilité pour la prévention de la collision avec le sol

Selon les standards internationaux⁵¹ et européens⁵², le service du contrôle de la circulation aérienne a pour but d'assurer la séparation entre les aéronefs et les obstacles sur l'aire de manœuvre. Au-delà, il appartient aux pilotes de s'assurer que les clairances émises par l'organisme de contrôle de la circulation aérienne ne compromettent pas la sécurité, sauf lorsque l'aéronef en vol IFR est guidé ou lorsqu'il reçoit une instruction de parcours direct qui dévie cet aéronef de la route ATS prévue.

1.17.1.2 Généralités sur la formation des contrôleurs

En Europe, la formation des contrôleurs de la circulation aérienne doit répondre aux exigences du règlement (UE) 2015/340⁵³ déterminant les exigences techniques et les procédures administratives applicables aux licences et certificats de contrôleur de circulation aérienne. Elle se décline selon les trois types de formation suivants :

- la formation initiale, qui en France est réalisée à l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) et donne lieu à la délivrance d'une licence de contrôleur de la circulation aérienne stagiaire ;
- la formation en unité, qui est effectuée sur le lieu d'affectation et donne lieu à la délivrance d'une licence de contrôleur de la circulation aérienne et/ou d'une mention de qualification. L'organisation de la formation en unité, le programme de formation par mention d'unité et les modalités de réalisation des évaluations théoriques et pratiques sont définis dans un Plan de Formation en Unité (PFU)⁵⁴ ;
- la formation continue, qui est effectuée sur le lieu d'affectation. Elle est destinée à maintenir la validité des mentions de la licence. L'organisation de la formation continue, le programme de formation par mention d'unité et les modalités de réalisation des évaluations théoriques et pratiques sont définis dans un Plan de Compétence en Unité (PCU).

Le PCU est cadré de manière générale par des notes d'information techniques émises par la DSNA. En revanche le contenu en lui-même est largement laissé à la charge de chaque organisme. Les consignes nationales se limitent aux éléments relatifs aux conditions minimales d'exercice, ainsi qu'aux conditions de prorogation des mentions d'unité. En particulier, ces notes prévoient pour la formation continue une durée minimale de six jours (qui peuvent être fractionnés et répartis sur les trois années de validité de la mention d'unité ou regroupés dans le cas de prorogation anticipée) ainsi que les axes généraux sur lesquels doit porter la formation, à savoir :

- les pratiques et procédures standards (PPS) élaborées en s'appuyant au besoin sur des retours d'expérience locaux ou nationaux ;
- les facteurs humains (FH) ;
- les situations anormales et d'urgence (FSAU) (ce sujet est d'une durée minimale de trois demi-journées et doit contenir au moins trois exercices pratiques).

⁵¹ Doc 4444 PANS-ATM et doc 8168 PANS-OPS de l'OACI.

⁵² Règlements ATM/ANS et [SERA](#).

⁵³ Règlement de la Commission du 20 février 2015 déterminant les exigences techniques et les procédures administratives applicables aux licences et certificats de contrôleur de la circulation aérienne ([Version en vigueur le jour de l'incident grave](#)).

⁵⁴ Le PFU de Paris-Charles de Gaulle définit huit mentions d'unité (4 intermédiaires, 1 finale, 1 partielle, 2 restreintes). Les quatre mentions intermédiaires correspondent aux différents paliers de qualification séparant le contrôleur nouvellement affecté de la mention finale ZZ.

Le PCU de l'unité de formation de Paris-Charles de Gaulle décrit une formation de maintien de compétences d'une durée de six jours sur trois ans. La quasi-intégralité des PCU des organismes de contrôle de la DSNA appliquent également cette durée de six jours sur trois ans pour couvrir la formation continue des contrôleurs, sans considération de volume de trafic, de complexité des espaces ou d'autres facteurs pouvant influencer sur le niveau de compétence requis.

Les situations anormales et d'urgence

Une durée minimale de 1,5 jour pour les formations aux situations anormales et d'urgence (FSAU) est prescrite par l'échelon central de la DSNA. Chaque organisme de contrôle définit le contenu de ces formations. En effet, la DSNA estime que ceux-ci sont les plus à même de déterminer les situations anormales et d'urgence susceptibles de survenir dans leur environnement spécifique. Ils ont de plus accès aux retours d'expérience concernant des événements de sécurité survenus au sein de l'organisme ce qui leur permet de les exploiter afin, le cas échéant, de les intégrer à la formation continue.

Aucune liste exhaustive de situations anormales et d'urgence n'est éditée par les échelons nationaux de la DSNA et il revient également à chaque organisme d'établir – ou non – une telle liste.

L'échelon national propose toutefois des supports de formation concernant certains sujets de sécurité identifiés. À la date de l'incident grave, il n'y avait pas de tels supports concernant la phraséologie à employer en cas d'alerte MSAW ou concernant l'importance du QNH pour les approches barométriques.

En l'absence de liste officielle de situations anormales et d'urgence, il n'existe pas de moyen permettant de s'assurer de la revue périodique de ces situations et des procédures associées. Ainsi, il est possible que certains thèmes, sujets, ou procédures d'urgence, ne fassent l'objet d'aucune formation récurrente dans un organisme donné, s'ils ne sont pas identifiés comme pertinents lors de l'élaboration du programme de la FSAU pour un cycle triennal donné.

1.17.1.3 Tâches opérationnelles : réglementations, procédures et formations

1.17.1.3.1 Approches RNP

Règlementation et procédures

Les textes OACI⁵⁵ et la réglementation européenne⁵⁶ applicable prescrivent que le contrôleur d'approche indique, lors du premier contact avec un aéronef à l'arrivée, le type de procédure d'approche auquel il faut s'attendre (ILS, RNP, VOR, etc.). Lorsqu'il s'agit d'une approche RNP, le pilote n'a pas l'obligation d'indiquer les minima utilisés (LNAV ou LNAV/VNAV ou LPV). De même, lorsque le contrôleur délivre la clairance pour une approche RNP, les minima associés ne sont pas précisés.

Les approches RNP ont initialement été mises en place à Paris-Charles de Gaulle afin de bénéficier d'approches aux instruments en cas d'indisponibilité des ILS. Elles offrent des minima compris entre ceux d'une approche de non-précision conventionnelle et ceux d'une approche ILS CAT I, et peuvent donc être utilisées tant qu'il n'y a pas de dégradations importantes des conditions météorologiques. Elles ont été implémentées sur le doublet nord en 2016 après une étude de sécurité. Elles ont ensuite été mises en place sur le doublet sud en 2017.

⁵⁵ Doc 4444 PANS-ATM de l'OACI et Doc 9432 Manuel de radiotéléphonie de l'OACI.

⁵⁶ Règlement [SERA](#).

Le Manuel d'exploitation (Manex) des services de la navigation aérienne de Paris-Charles de Gaulle prévoit que les procédures RNP sont utilisées en secours en cas de problème sur les ILS. À la date de l'incident, il y est par ailleurs indiqué que des entraînements aux approches finales RNP sont planifiés tous les vendredis après-midi sur un doublet entre 13 h 30 et 17 h locales. Ces entraînements peuvent toutefois être annulés si les conditions météorologiques sont dégradées et/ou si le trafic est particulièrement dense ou complexe.

Le Manex de CDG précise les particularités suivantes des approches RNP par rapport aux ILS :

- bien que les axes radar de ces approches soient rigoureusement identiques à ceux des ILS (pentes à 3° et NTZ/NOZ⁵⁷ identiques), la zone où l'axe doit avoir été capturé par l'équipage peut être différente de celle associée aux procédures ILS ;
- il n'existe qu'une seule altitude d'interception pour les approches RNP (5 000 ft pour la piste 27R à CDG). Ce point fait l'objet d'une attention particulière de la part des contrôleurs car il entraîne des contraintes spécifiques d'interception différentes des ILS ;
- une légère augmentation des changements de trajectoire dans l'espace géré par les approches liée aux aéronefs sans capacité LNAV/VNAV ;
- en cas d'approche interrompue suivie d'une procédure RNP en seconde approche, l'équipage a besoin d'un temps de préparation plus long nécessitant un guidage adapté ;
- une phraséologie spécifique aux RNP.

Il n'est rien indiqué de particulier dans le Manex concernant le profil de descente barométrique de certaines approches RNP et l'importance du QNH pour ce type d'approche en lien avec un possible risque de CFIT.

En dehors des particularités énumérées ci-dessus, les procédures pour une approche RNP sont identiques à celles pour une approche ILS, en particulier pour le contrôleur LOC, pour qui le type de procédure d'approche est presque transparent.

Formation

Le volet formation de la mise en place du PBN n'a, à la date de l'incident grave, pas fait l'objet d'une coordination nationale des programmes à la DSNA. Un comité de pilotage sur cette thématique a été créé en 2017 et un retour d'expérience a été commandé sur l'impact du PBN sur les méthodes de travail. Cette action n'a pas eu de suite concrète sur la coordination des actions de formation.

La formation initiale des contrôleurs ingénieurs du contrôle de la navigation aérienne à l'ENAC traite les approches RNP de manière approfondie depuis le début des années 2010, tant pour ce qui concerne la classification et la conception de ces procédures, que pour les aspects opérationnels côté bord et côté sol.

Depuis l'événement du 9H-EMU, la formation des techniciens supérieurs des études et de l'exploitation de l'aviation civile (qui peuvent être amenés à travailler en tant que contrôleur aérien sur certains aérodromes) intègre également cette thématique.

Les risques associés sont également traités, en particulier ceux liés aux erreurs altimétriques dues aux problèmes d'insertion du QNH ou à la température.

⁵⁷ Zone de non-transgression (NTZ)/zone d'évolution normale (NOZ).

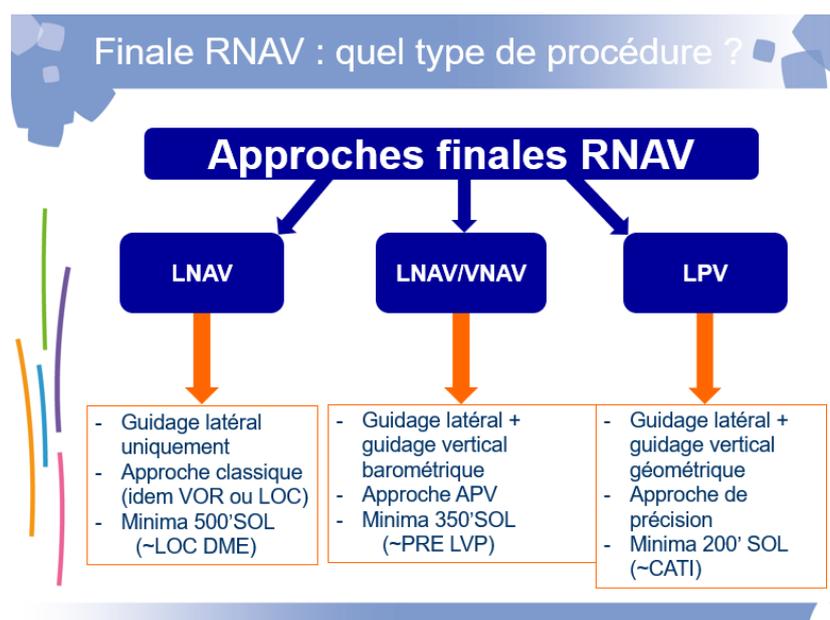
La phraséologie enseignée est basée strictement sur le Manuel de Phraséologie à l'usage de la circulation aérienne générale, à la conception duquel l'ENAC est associée. Ces programmes et la réglementation qui les encadre n'étaient pas en vigueur lors de la formation initiale des contrôleurs impliqués dans l'incident grave, à l'exception du contrôleur Ass LOC N lors de la première approche devenu contrôleur LOC N pour la seconde.

Lors de la formation en unité, les caractéristiques et procédures associées aux approches PBN sur Paris-Charles de Gaulle (ainsi que pour les aérodromes périphériques) sont enseignées de façon théorique et appliquées en simulation lors des stages dits « pré-OJT » pour l'acquisition des mentions d'unité successives. Elles sont abordées en théorie et en simulation dès le stage « Initiation à la Salle IFR, secteurs ARRIVEE » et ont pour vocation de présenter les interactions qui existent entre le travail du LOC et celui de la salle IFR et en particulier du secteur ITM.

Lors de la formation continue aux PPS, le programme de la période 2021-2024 inclut une partie intitulée « Procédures RNAV » qui avait été suivie par les trois contrôleurs impliqués dans l'incident grave. Cette formation traitait des généralités sur les concepts PBN et RNAV ainsi que des approches RNP pour Paris-Charles de Gaulle et les terrains satellites concernés. Des rappels sur les différences entre approches LPV, LNAV/VNAV et LNAV sont également abordés, avec comme points de vigilance : la similitude entre approche LPV et approche ILS CAT I, ainsi que les risques liés à la réalisation de certaines de ces approches avec un QNH incorrect.

Par ailleurs, en marge de la formation, des briefings des équipes de contrôleurs sur le PBN ont été régulièrement organisés par les subdivisions Contrôle afin d'accompagner le déploiement du PBN sur le territoire français. Cela a en particulier été le cas à Paris-Charles de Gaulle. La participation à ces briefings était obligatoire dans le cadre de la formation d'adaptation aux changements.

Le support du dernier briefing RNAV réalisé avant l'incident grave a été transmis au BEA et mentionne les différentes procédures d'approche RNP et leurs particularités, ainsi que l'importance du QNH :



IMPORTANCE DU QNH

Erreur d'affichage de 10 HPa (ex : 996 HPa au lieu de 1006 HPa) trajectoire décalée de 300 ft vers le haut : risque de déstabilisation d'approche au passage à vue

QNH correct (par ex 1006 HPa)

Erreur d'affichage de 10 HPa (ex 1016 HPa au lieu de 1006 HPa) trajectoire décalée de 300 ft vers le bas : risque de CFIT

DONNER (ET CORRIGER SI BESOIN) LE QNH
« autorisé approche finale RNAV XX L/R, QNH XXXX »

MANEX :

Au plus tard 2 NM avant le point de descente (FAF), le contrôleur ITM autorise à l'approche finale (avec confirmation du QNH si différent de celui précédemment donné).

En effet, pour ces finales, le contrôleur ITM doit dissocier l'interception de l'axe de l'autorisation d'approche finale, en deux messages distincts.

RNP APCH – 3 minimas

CAT	LPV			LNAV-VNAV			LNAV			MVL / Circling (1) 26L → 26R	
	DA (H)	RVR	OCH	DA (H)	RVR	OCH	MDA (H)	RVR	OCH	MDA (H)	VIS
A			139	630 (310)	700	309	740 (420)	1200	414	1000 (680)	3000
B			149	640 (320)	700	319	740 (420)	1200	414	1000 (680)	3000
C	520 (200)	550	172	660 (340)	800	340	740 (420)	1200	414	1100 (780)	3700
D			183	690 (370)	1000	367	750 (430)	1300	429	1100 (780)	4300
DL			189								



= ILS CAT I



« Glide » par Altimètre

 QNH



Interdit sauf si quinconce

 Vitesse QNH

11

Figure 38 : extraits de supports de formation sur les RNP à CDG (Source : DSNA)

Au cours des différents entretiens avec des contrôleurs de CDG réalisés au cours de l'enquête, il est apparu que le danger et la gravité que représente un QNH erroné pour les approches RNP n'étaient pas forcément perçus et compris, bien que vus en formation et lors des briefings. Les contrôleurs n'avaient pas forcément conscience que cela pouvait mener à une collision avec le sol. Au cours de ces entretiens, il a également été régulièrement évoqué que les approches RNP étaient présentées comme des approches ILS à quelques différences près.

1.17.1.3.2 Communication sol-bord

Règlementations et procédures

L'Annexe 10–Volume II de l'OACI, le règlement « SERA » (Règles de l'air européennes normalisées) et l'arrêté du 11 décembre 2014 relatif à la mise en œuvre de ce règlement⁵⁸ sont les textes qui définissent les exigences applicables en matière de phraséologie, notamment les expressions conventionnelles de phraséologie en anglais et en français. Ces mêmes expressions se retrouvent aussi dans le doc 4444 PANS-ATM de l'OACI. De ces textes découlent des manuels qui indiquent comment utiliser les expressions conventionnelles et donnent des exemples d'utilisation.

Le Manuel de phraséologie à l'usage de la circulation aérienne générale publié par la Direction des Opérations (DO) de la DSNA, applicable lors de l'incident grave dans sa neuvième édition du 15 mai 2021, définit le collationnement comme : l'action par le pilote consistant à « *répéter tout ou partie d'un message afin que le contrôleur à l'origine de ce message vérifie qu'il a été correctement reçu.* »

Le Manuel de radiotéléphonie (Doc 9432) de l'OACI indique quant à lui que « *les dispositions relatives au collationnement ont été introduites pour des raisons de sécurité. Ces dispositions doivent être respectées d'autant plus rigoureusement qu'une erreur d'interprétation dans la transmission ou la réception des autorisations et des instructions ATC pourrait avoir des conséquences graves. Le strict respect des procédures de collationnement garantit non seulement que l'autorisation a été reçue correctement, mais aussi que l'autorisation voulue a été transmise.* »

Le Manex de Paris-Charles de Gaulle insiste sur l'importance du collationnement dans les fonctions de contrôleurs SOL et LOC. Il est de plus précisé que, bien que le contrôleur Ass LOC puisse assurer une veille visuelle de la situation de contrôle ainsi qu'une veille de la fréquence LOC, lorsque ses autres tâches lui en laissent le temps, cette surveillance du trafic ne supplée pas celle du contrôleur LOC qui reste seul responsable de la vérification des collationnements et de la transmission de la version correcte des éléments concernés.

Formation

Le règlement européen (UE) [2015/340](#), dans les modules relatifs à la communication prescrits dans l'AMC1 ATCO.D.010(a)(2)(vi) relatif à la composition de la formation initiale, mentionne le sous-sujet « techniques de communication, collationnement et vérification du collationnement ». Ce sous-sujet est abordé à de nombreuses reprises et est transverse aux diverses matières présentées dans cette réglementation.

Le collationnement ainsi que la détection des erreurs de collationnement sont traités et évalués dans les formations initiales d'un point de vue théorique et pratique. Ceci se justifie tant pour des raisons règlementaires que pédagogiques liées aux bonnes pratiques de l'exercice du métier de contrôleur aérien.

Lors des échanges avec le BEA, la subdivision instruction de l'organisme de contrôle de Paris-Charles de Gaulle a indiqué que le collationnement et la vérification de celui-ci sont des sujets importants, apparaissant tout au long de la formation en unité. Cependant, il est considéré que les principes de base ont été enseignés lors de la formation à l'ENAC et il n'y a donc pas de présentation formelle du collationnement au cours de cette formation.

⁵⁸ [Version en vigueur le jour de l'incident grave.](#)

Les compétences d'écoute et de détection de mauvais collationnement sont ainsi testées en simulation et lors des examens validant l'acquisition des mentions d'unité. Il a ainsi été indiqué lors des entretiens que la non-détection d'une erreur de collationnement en séance de simulation donnait lieu à une appréciation négative et à un échec systématique lors d'une évaluation. Toutefois, il a également été indiqué qu'aucun échec lié à une erreur de collationnement en évaluation pour l'obtention ou la prorogation d'une mention d'unité n'avait été recensé à Paris-Charles de Gaulle.

En formation de maintien des compétences, les sujets relatifs au collationnement peuvent être abordés dans le cadre des formations facteurs humains. Dans le cadre de ces formations, la DSNA propose des supports au niveau national, qui sont implémentés par les organismes au niveau local. On peut ainsi noter que les supports pour les périodes 2009-2011, 2012-2014, 2015-2018 et 2021-2023 abordaient des problématiques impliquant les mécanismes associés au collationnement, à différents niveaux.

Études sur les erreurs de communication sol - bord

Les communications entre pilote et contrôleur s'appuient sur une chaîne de communication : autorisation du contrôleur – collationnement du pilote (*read-back*) – vérification du collationnement par le contrôleur (*hear-back*). En situation normale, et plus spécifiquement en présence de facteurs adverses pouvant affecter les communications, le processus de confirmation/correction est une ligne de défense contre les erreurs liées aux communications. De nombreuses études se sont penchées sur les erreurs de communication.

Une étude réalisée sous l'égide d'Eurocontrol indique qu'une absence d'accusé de réception ou de correction de la part du contrôleur peut être perçue implicitement par le pilote comme une confirmation du collationnement⁵⁹.

Dans la publication EVAIR Bulletin n° 21 d'Eurocontrol publié en août 2020, 13 000 rapports d'occurrence liés à la gestion du trafic aérien (ATM) et collectés au cours des périodes estivales (1^{er} avril – 30 septembre) entre 2015 et 2019, pour environ 20 millions de vols, ont été étudiés. L'un des contributeurs les plus importants aux événements ATM est la communication sol/bord : verbale (confusion d'identification, langue et accent, bruits et interférences, etc.) et opérationnelle (erreur de collationnement, phraséologie, transferts, etc.) avec environ 1,4 événement rapporté pour 10 000 vols. Les erreurs d'écoute de collationnement représentent entre 0,1 et 0,2 événement rapporté pour 10 000 vols.

Une [étude](#) réalisée par le NLR⁶⁰ en 2004 pour Eurocontrol avait montré, sur la base de l'analyse d'un échantillon de 444 incidents⁶¹ liés aux communications pilote-contrôleur que l'erreur de *read-back/hear-back* était la plus commune (31 %) parmi les erreurs identifiées. Les conséquences de ces erreurs de *read-back/hear-back* résultent en un écart d'altitude dans 38 % des cas.

La FAA a également réalisé plusieurs études relatives aux erreurs de communication entre pilotes et contrôleurs de la circulation aérienne. En particulier, une étude publiée en 1998 identifie les erreurs dites « *Hearback type II* », qui sont décrites comme des situations dans lesquelles le pilote

⁵⁹ European Action Plan for Air Ground Communications Safety, Ed 1.0 Mai 2006

⁶⁰ Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, centre aérospatial néerlandais.

⁶¹ Incidents survenus en 2002-2003, en Europe, impliquant des avions de masse maximum au décollage supérieure à 5,7 t et exploités en transport commercial.

collationne correctement le message qui lui a été transmis, mais où le contrôleur ne détecte pas que cette information n'était pas celle qu'il avait l'intention de transmettre. Les auteurs de cette étude analysent ce type d'erreur en notant qu'il est commun de dire autre chose que ce que l'on comptait exprimer. C'est pourquoi ils recommandent que les contrôleurs traitent les collationnements comme n'importe quelle autre information entrante. Ils préconisent également une écoute active et la vérification des informations sur la base de celles notées sur le *strip*.

La DSNA a également identifié la communication sol/bord comme vecteur d'amélioration. Ce sujet a fait l'objet d'une demande de travaux de l'Instance de Traitement des Événements de Sécurité (ITES) lors de son instance du 7 avril 2021. Les experts ayant participé à ces travaux ont en particulier rappelé les principaux mécanismes de communication et notamment celui de « l'écoute dirigée ». Ils évoquent ainsi que l'écoute du collationnement peut être réalisée selon deux « modes » :

- lorsque l'écoute du collationnement est la tâche principale, l'écoute est dite « dirigée », avec une disponibilité cognitive maximale. Cette situation est idéale et permet d'entendre une éventuelle erreur et de la corriger. Ce fonctionnement est conditionné par une situation permettant un enchaînement de tâches en série et non en parallèle, sans interruption ni anticipation de la suite du trafic ;
- lorsque l'écoute du collationnement est réalisée en tâche de fond, l'écoute est « semi-attentive » et le contrôleur compte sur ses habitudes et sa familiarité avec certains messages (fréquences, points géographiques, etc.), ou sur le fait que si la sonorité des messages diffère de l'attendu, cela éveillera son attention.

La DSNA détaille dans cette étude plusieurs facteurs contributifs à l'altération de la détection d'un mauvais collationnement, notamment la fatigue, les suites du contexte COVID, le faible trafic ou le stress sur position.

Enfin dans son bulletin Sécurité #68, la DSNA évoque la boucle de récupération que peut constituer la présence d'un contrôleur Ass LOC ou COOR LOC, à même de détecter un lapsus du radariste. Toutefois, il est bien spécifié que cette tâche d'écoute de rattrapage n'est pas identifiée comme prioritaire. Similairement, il est noté que l'écoute de la fréquence radiophonique par les autres équipages peut également constituer une boucle de rattrapage dans certaines conditions.

1.17.1.3.3 Altitude/niveau de transition

L'altitude de transition est définie dans le Doc 8168⁶² « PANS-OPS » de l'OACI comme l'altitude à laquelle ou en dessous de laquelle la position verticale d'un aéronef est contrôlée par référence à l'altitude. Le niveau de transition est quant à lui le plus bas niveau de vol utilisable au-dessus de l'altitude de transition. Cette définition est transposée au niveau européen dans le règlement (UE) n° 923/2012 « [SERA](#) ».

Le PANS-OPS volume 3 indique pour l'altitude de transition : « 2.1.2.4 la hauteur de l'altitude de transition au-dessus de l'aérodrome sera aussi faible que possible, mais pas normalement inférieure à 900 m (3 000 ft) ».

⁶² Procedures for air navigation services Aircraft Operations – Volume III – Aircraft Operating Procedures. Première édition, 2018.

En effet, l'augmentation du trafic et l'arrivée des avions à réaction à la fin des années 1950 ont amené l'OACI à élaborer une politique concernant notamment les altitudes de transition et qui est toujours en vigueur aujourd'hui. À l'époque, plusieurs raisons justifiaient ce principe. L'une des principales raisons était le manque d'installations de services de navigation aérienne. Certains organismes ne disposaient pas des installations nécessaires pour fournir des informations sur la pression actuelle au trafic en route. C'est pourquoi des dispositions telles que l'utilisation du QNH standard de 1 013,25 hPa et d'une altitude de transition relativement basse ont été adoptées dans le monde entier, fournissant une référence commune pour la séparation verticale pendant le vol.

Depuis, l'organisation des services de la navigation aérienne et des informations météorologiques a fortement évolué. Ainsi, de nombreux États ont établi des altitudes de transition élevées. Aux États-Unis, l'altitude de transition a été fixée dès le début à 18 000 ft. Aujourd'hui, une altitude de transition égale ou supérieure à 10 000 ft est utilisée non seulement aux États-Unis et au Canada, mais aussi en Australie (10 000 ft), Nouvelle-Zélande (13 000 ft), Japon (14 000 ft) ou aux Philippines (11 000 ft).

En Europe, une grande variété d'altitudes de transition est utilisée. La France, en cohérence avec la réglementation internationale a historiquement mis en place des altitudes de transition basses, généralement entre 3 000 ft et 6 000 ft selon les aérodromes.

L'établissement du ciel unique en Europe dans les années 2010 a mis en avant la question et la pertinence d'harmoniser et de relever l'altitude de transition. Divers groupes de travail ont été commissionnés par l'AESA et Eurocontrol sur ce sujet et n'ont pas conclu sur un gain évident d'une telle harmonisation⁶³. Il n'y a pas eu de changement de politique sur l'altitude de transition. Il a cependant été pointé que les exigences de l'OACI en la matière étaient obsolètes. La problématique des approches barométriques n'a pas été prise en compte dans ces études ni par la suite lors de la rédaction du [règlement IR-PBN](#).

Les travaux d'Eurocontrol sur la charge de travail dans le cockpit selon l'altitude et l'étude de sécurité réalisée sur les approches baro-VNAV en 2010 concluent qu'un changement de l'altitude de transition serait préférable pour la porter au-dessus de 10 000 ft afin de permettre aux équipages de conduite de mener les actions critiques sans interférence liée aux tâches secondaires, que cela réduirait le risque d'omission ou d'erreur lors du changement de calage altimétrique, et que de plus cela laisserait plus de temps pour l'équipage et les contrôleurs d'identifier une éventuelle erreur de calage altimétrique.

1.17.1.3.4 Communication de l'information du calage altimétrique

Le doc 4444 PANS-ATM de l'OACI ainsi que les règlements (UE) 2017/373 « [ATM/ANS](#) » et (UE) n° 923/2012 « [SERA](#)⁶⁴ » prévoient que :

« *SERA.8015 Autorisations du contrôle de la circulation aérienne :*

Sauf lorsque l'on sait que ce renseignement a déjà été communiqué à un aéronef dans une transmission dirigée, un calage altimétrique QNH est indiqué dans :

- i) la clairance de descente lors de la première clairance vers une altitude au-dessous du niveau de transition ;*
- ii) les clairances d'approche ou les clairances d'entrée dans le circuit de circulation ;*
- iii) les clairances de roulage données aux aéronefs au départ. »*

⁶³ Voir par exemple le document Network Operations Team NETOPS/12 IP04 d'Eurocontrol, ou les résultats de l'A-NPA 2012-01 Harmonised Transition Altitude de l'AESA.

⁶⁴ Règles de l'air européennes normalisées.

Ainsi, les procédures appliquées par la DSNA et l'organisme de CDG au travers de son Manex en ce qui concerne la transmission du calage altimétrique pour les arrivées sont :

- 1) de transmettre le calage altimétrique par ATIS comme vu précédemment au § 1.9.1 ;
- 2) de transmettre par échange radio le calage altimétrique lors de la première clairance vers une altitude en dessous du niveau de transition.

Comme le calage altimétrique est systématiquement transmis lors de cette clairance, il n'est pas redonné lors des clairances d'approches ou d'entrée dans le circuit de circulation. La DSNA considère en effet que comme le QNH est donné lors de la clairance de descente sous le niveau de transition, la mention « sauf... » du point SERA.8015 permet de s'affranchir de l'exigence du ii) et de ne pas répéter le QNH dans la clairance d'approche ultérieure.

Certains des contrôleurs interrogés dans le cadre de l'enquête ont indiqué préciser quasi-systématiquement le QNH lorsqu'ils transmettent une clairance contenant une altitude. Il s'agit d'habitudes individuelles.

La fiche réflexe « APPROCHES FINALES RNP CDG pour ITM » indique la phraséologie suivante pour la clairance d'approche : « *AFR023, QNH 1018, autorisé finale RNP piste 08R* »/« *ACA870, QNH 1018, cleared RNP final runway 08R* ». Cette phraséologie diffère du Manex en prévoyant la fourniture du QNH dans la clairance d'approche et n'est que peu utilisé en pratique.

1.17.1.3.5 Surveillance de l'altitude

Le doc 4444 PANS-ATM de l'OACI⁶⁵ et le règlement (UE) n° 2017/373 « [IR-ATM/ANS](#)⁶⁶ » indiquent que la valeur de tolérance utilisée pour établir la précision de l'indication de niveau obtenue à partir de l'altitude-pression et affichée au contrôleur doit être de ± 60 m (± 200 ft) en ce qui concerne l'espace aérien couvert par le minimum de séparation verticale réduit (*Reduced Vertical Separation Minimum, RVSM*). Dans tous les autres espaces aériens, elle doit être de ± 90 m (± 300 ft). C'est notamment le cas pour ce qui concerne les approches telles que celle de Paris-Charles de Gaulle.

Il est de plus spécifié dans ces réglementations que la vérification de l'indication de niveau obtenue à partir de l'altitude-pression et affichée au contrôleur doit être effectuée par chaque organisme ATC doté des équipements nécessaires lors du premier contact avec l'aéronef intéressé ou, en cas d'impossibilité, le plus tôt possible après ce contact. Cette vérification doit être faite par comparaison simultanée avec l'indication de niveau altimétrique communiquée en radiotéléphonie par le même aéronef. Le pilote de l'aéronef dont l'indication de niveau obtenue à partir de l'altitude-pression se situe dans les limites de tolérance approuvées n'a pas besoin d'être informé de cette vérification.

Les critères de surveillance de la position d'un aéronef par le contrôleur de la circulation aérienne concernent un aéronef :

- maintenant un niveau ;
- libérant un niveau ;
- franchissant un niveau en montée ou en descente ;
- atteignant un niveau.

⁶⁵ 8.5.5.1 Vérification de l'indication de niveau.

⁶⁶ AMC 1 ATS/TR.155(f) TOLERANCE VALUE FOR PRESSURE-ALTITUDE-DERIVED LEVEL INFORMATION.

Pour ces situations, les critères vont déterminer l'occupation ou non d'un niveau donné par l'aéronef. Il n'existe en revanche pas de critère de surveillance d'un plan de descente.

S'il détecte une situation où un aéronef ne respecte pas une consigne d'altitude au regard des critères susmentionnés, le contrôleur aérien doit le signaler au pilote.

Le système de visualisation de l'altitude à CDG sur les écrans radar est décrit au § 1.10.3.2.

1.17.1.3.6 MSAW

Comme indiqué au § 1.10.4, le *Minimum safe altitude warning* (MSAW) est un filet de sauvegarde d'alerte de proximité du relief qui prévient lorsqu'un appareil a une trajectoire telle qu'il risque d'entrer en collision avec le relief à court terme.

Procédures, phraséologies et réglementations

L'enquête sur [l'incident grave de l'avion BOMBARDIER CL-600-2E25 \(CRJ-1000\) immatriculé F-HMLD survenu le 20 octobre 2021 à l'approche de Nantes-Atlantique \(44\)](#) contient une étude des documents relatifs aux procédures, aux phraséologies et aux réglementations internationales applicables aux systèmes de prévention des collisions avec le sol. Il apparaît ainsi que le MSAW n'est quasiment jamais défini dans les textes internationaux⁶⁷, qu'il y a deux procédures applicables selon que l'aéronef soit en guidage radar ou non, et qu'il existe deux phraséologies possibles et distinctes sans qu'il ne soit précisé dans quels cas elles s'appliquent :

- Avertissement altitude basse : (indicatif d'appel d'aéronef) AVERTISSEMENT ALTITUDE BASSE, VÉRIFIEZ VOTRE ALTITUDE IMMÉDIATEMENT, QNH (nombre) [(unité)]. [ALTITUDE MINIMALE DE VOL (altitude)]⁶⁸
- Alerte proximité du relief : (indicatif d'appel d'aéronef) ALERTE RELIEF (suggestion de manœuvre du pilote, si possible).

Cette étude a conduit le BEA à émettre des recommandations de sécurité à la DSNA (dont la réponse a été jugée adéquate et close par le BEA), ainsi qu'à l'OACI et l'AESA, dont le traitement était toujours en cours en avril 2024, relatives au besoin de :

- clarifier dans quels cas ces deux phraséologies doivent être utilisées ;
- de mentionner systématiquement l'urgence de la situation ; et
- de rappeler systématiquement le QNH dans le message.

Formation

En formation initiale à l'ENAC, les élèves contrôleurs ingénieurs du contrôle de la navigation aérienne reçoivent environ une heure d'enseignement théorique dédiée aux principes de fonctionnement du MSAW. Ce cours s'appuie principalement sur le règlement SERA et utilise en support de cours les vidéos publiées par Eurocontrol sur ce sujet. Ils sont par la suite régulièrement confrontés à des situations impliquant un déclenchement de cette alerte en simulation, six occurrences étant prévues au programme de ces simulations. Des déclenchements spontanés peuvent être demandés par les instructeurs en cas de besoin pédagogique.

⁶⁷ Le MSAW est toutefois encadré par la réglementation nationale française, qui indique les types de vols éligibles à la génération d'avertissements ainsi que les mesures à appliquer par les contrôleurs selon que l'aéronef est en guidage ou non (FRA.11002 de l'arrêté du 11 décembre 2014 relatif à la mise en œuvre du règlement SERA).

⁶⁸ Une portion de texte entre crochets est, par convention, facultative.

Lors de la formation en unité à CDG, la théorie sur le sujet du MSAW était abordée lors du stage « pré-OJT » pour la mention d'unité correspondant aux fonctions de contrôleur tour, dans le cadre de la présentation sur les filets de sauvegarde utilisés à Paris-Charles de Gaulle. La présentation traitait des principes de fonctionnement du MSAW ainsi que des méthodes de travail associées. Le MSAW était abordé parmi les autres filets de sauvegarde, à savoir le RIMCAS (pour la détection de potentielles des incursions de pistes), le STCA (pour la prévention des pertes de séparations) et l'APW (pour la prévention des intrusions de certains volumes). La thématique « filets de sauvegarde » représentait elle-même une partie des enseignements d'une matinée où sont également traitées les procédures VFR ainsi que la gestion des hélistations.

Au cours de l'après-midi suivant la formation théorique susmentionnée, une simulation était prévue afin d'illustrer les différents thèmes abordés, cette simulation étant choisie parmi un catalogue de trois simulations. Sur ces trois simulations, une seule présente un scénario impliquant un déclenchement du MSAW. Ce déclenchement est simplement joué par l'instructeur, le système logiciel ne permettant pas d'implémenter le MSAW en simulation.

Concernant la formation continue au sein de l'organisme de contrôle de Paris-Charles de Gaulle, bien que le déclenchement d'une alerte de proximité du relief fasse partie des situations d'urgence, celle-ci n'a pas été abordée lors des sessions de formation sur les situations anormales et d'urgence (FSAU) précédentes. De plus, en raison des limitations du système de simulation à CDG, il n'est pas possible de s'y entraîner dans un cadre opérationnel.

Bien qu'il ne s'agisse pas de formation, le déclenchement en situation réelle du MSAW en approche sur l'aéroport Paris-Charles de Gaulle est rare selon les témoignages des contrôleurs interrogés.

1.17.1.4 Système de management de la sécurité et de la conformité

1.17.1.4.1 Cadre réglementaire

À la date de l'incident grave, le règlement (UE) 2017/373 modifié dit « IR-ATM/ANS »⁶⁹, relatif aux services de la navigation aérienne, établit les exigences communes relatives aux prestataires de services de gestion du trafic aérien et de services de navigation aérienne. Parmi les exigences applicables à la DSNA au titre de ce règlement figurent celles relatives :

- au système de gestion (ATM/ANS.OR.B.005), incluant notamment une surveillance de la conformité en interne, et
- au système de management de la sécurité (ATS.OR.200), qui peut faire partie intégrante du système de gestion et qui incorpore notamment les processus relatifs à la gestion des risques pour la sécurité, l'assurance de la sécurité et la promotion de la sécurité.

1.17.1.4.2 Système de management intégré de la DSNA

Le « Manuel de management de la DSNA » en vigueur à la date de l'incident grave⁷⁰ présentait le système de management intégré (SMI) de la DSNA qui comporte quatre composantes thématiques : sécurité, sûreté, environnement et qualité. Le manuel de management présentait la structure hiérarchique et un ensemble de processus sur lesquels s'appuyait le SMI de la DSNA. Ce manuel ne tenait pas compte des évolutions d'organisations récentes et en cours à la date de l'incident grave avec notamment la création récente de la Direction de la Sécurité (DSEC) au 1^{er} janvier 2022.

⁶⁹ Règlement d'exécution 2017/373 de la Commission du 1^{er} mars 2017 établissant des exigences communes relatives aux prestataires de services de gestion du trafic aérien et de services de la navigation aérienne ainsi que des autres fonctions de réseau de la gestion du trafic aérien, et à leur supervision ([Version en vigueur le jour de l'incident grave](#)).

⁷⁰ Version 10, avril 2018

La description des processus dans le manuel de management DSNA, renvoyait notamment vers les deux procédures suivantes :

- procédure pour l'évaluation et l'atténuation des risques (PRO-002)

Cette procédure décrit l'organisation de la DSNA pour la gestion des changements du système fonctionnel. Elle est complétée par une méthodologie pour l'évaluation et l'atténuation des risques des changements du système ATM (MET-001) ;

- procédure de traitement des constats et des actions (PRO-003)

Cette procédure a pour objet d'identifier les sources de constats gérés par la DSNA et de décrire le traitement des constats et la gestion des actions pouvant en découler. Parmi les constats figurent les « dysfonctionnements avérés » (événements de sécurité notifiés ou détectés, écarts par rapport aux exigences réglementaires ou aux normes internes).

Le traitement des événements sécurité fait l'objet d'une méthodologie dédiée (MET-009) ainsi que d'un manuel mis à la disposition des subdivisions QS/S. Un événement de sécurité peut faire l'objet d'une analyse locale, par la subdivision QS/S seulement ou par le Comité Local de Sécurité (CLS), voire éventuellement d'une analyse nationale par l'Instance de Traitement des Événements Sécurité (ITES).

La détection des écarts est assurée, selon la procédure PRO-003, par le biais d'audits et d'inspections, mais aussi par les constats des agents eux-mêmes.

La procédure PRO-003 fait aussi référence aux « dysfonctionnements potentiels » détectés au travers d'observations, à savoir « des situations qui, bien que conformes aux exigences réglementaires, méritent d'être portées à l'attention de l'entité concernée et/ou justifient une action d'amélioration ».

Le manuel de management de la DSNA ne faisait mention d'aucun processus global de gestion des risques pour la sécurité, au-delà du traitement des constats et des études de risques conduites préalablement à un changement. À la date de l'incident grave, la DSNA n'avait pas développé de modèle national de représentation des risques sur lequel aurait pu s'appuyer un tel processus. Depuis plusieurs années, dans l'aviation civile, il est courant d'utiliser des modèles de représentation des risques faisant apparaître les barrières de sécurité de telle manière qu'il soit possible de vérifier leur niveau de fiabilité. La DSNA avait élaboré une cartographie des risques sommaire en 2010, déclinée selon les composantes « technique » et « exploitation ». La DSNA n'utilisait pas cette cartographie des risques dans ses processus en lien avec le management de la sécurité, elle n'était pas mise à jour sur la base du retour d'expérience et ne servait pas de support à l'analyse des événements ou aux études de risques préalables à un changement.

Le manuel de management de la DSNA indiquait que la diffusion des enseignements se faisait au niveau local et au niveau national. La formation initiale et continue était mentionnée pour ce qui concerne la diffusion locale tandis qu'il était évoqué l'utilisation de campagnes de sensibilisation ciblées pour le retour d'expérience national. Au cours de l'enquête, la DSNA a confirmé qu'il n'y avait pas d'entité à compétence nationale ayant pour mission de dégager les priorités en matière de formation initiale et continue sur la base des risques identifiés, notamment au travers du retour d'expérience.

Bien que la notion « d'observation » ait été définie dans la procédure PRO-003⁷¹, à la date de l'incident grave, aucune des procédures ou des méthodes citées précédemment ne faisait référence

⁷¹ Avec pour sens celui d'une situation observée.

ou ne décrivait une démarche visant à observer les pratiques des contrôleurs sur position afin de détecter d'éventuelles difficultés (par exemple sous la forme d'écarts aux procédures pouvant avoir un impact sur la sécurité) et d'en comprendre les causes. Au cours de l'enquête, la DSNA a précisé que :

- dans le cadre d'un changement impliquant la transformation des méthodes de travail, des observations sur position avaient par le passé été effectuées afin de mesurer si les méthodes de travail prescrites en amont du changement étaient réalisées comme attendu ;
- elle avait récemment développé, post-incident, une méthodologie d'observation et de collecte d'informations en opérations normales, et met en place une première expérimentation au CRNA de Reims en 2024.

La notion d'observation de l'activité des contrôleurs aériens en opérations normales a été introduite par l'OACI en 2008. Le Doc 9910 développe la méthodologie de collecte et d'analyse des données, dans le cadre plus général de la gestion des menaces et des erreurs (*Threat and Error Management*, TEM).

Différentes campagnes d'observations sur positions ont déjà été effectuées dans le monde : aux États-Unis, en Australie, au Canada, en Irlande, en Italie, en Nouvelle-Zélande, en Arabie Saoudite, en Afrique du Sud, en Corée du Sud, en Thaïlande et aux Émirats arabes unis par exemple. Un tel processus se rapproche de ce qui est réalisé à large échelle depuis des années pour les exploitants aériens au travers des audits de sécurité des opérations en ligne (*Line Operations Safety Audit*, [LOSA](#)).

1.17.1.4.3 Exemple de la gestion du risque de CFIT

Le passage sous une altitude minimale de sécurité publiée d'un aéronef en fréquence est considéré par la DSNA comme un événement de type « quasi CFIT ». Comme pour tous les événements de sécurité, il est exigé des contrôleurs de rédiger une fiche de notification d'événement (FNE) pour les événements en lien avec un risque de collision avec le sol.

Ces événements peuvent donner lieu au déclenchement du MSAW si l'aérodrome en est équipé. Le déclenchement n'est toutefois pas exploité systématiquement par le système de gestion de la sécurité de la DSNA. Ainsi, en l'absence d'une FNE, le déclenchement d'un MSAW n'est pas un moyen alternatif permettant de détecter de manière systématique un événement « quasi CFIT ». On peut d'ailleurs noter que l'incident grave n'a été connu que grâce à la rédaction d'une FNE par le contrôleur LOC N. Sans cette FNE, aucun des organismes impliqués n'aurait eu connaissance de l'incident grave.

Selon la DSNA, de nombreuses activations de MSAW sont considérées comme intempestives ou ne sont pas comprises par les contrôleurs, qui ne les notifient alors pas systématiquement.

Dans la cartographie des risques « exploitation » élaborée par la DSNA en 2010, le « quasi CFIT » est identifié parmi les événements indésirables. Le MSAW y est associé en tant que plan d'action déjà mis en œuvre. Au-delà de ce document figé, à la date de l'incident grave, la DSNA n'avait pas développé de grille d'analyse des événements « quasi CFIT » et n'avait pas mis en place localement (SNA-RP/CDG) ou nationalement de processus de gestion du risque de CFIT tel qu'attendu au titre de l'ATS.OR.200 et des moyens de conformité acceptables (AMC) associés, en particulier s'appuyant sur l'analyse des événements de sécurité. La DSNA se privait ainsi d'une appréciation globale et nationale du risque CFIT au-delà de l'analyse ponctuelle et/ou locale de chaque événement et du possible dénombrement des événements « quasi CFIT » enregistrés dans sa base de données.

Au cours de l'enquête, à la demande du BEA, la DSNA a transmis une liste de 89 événements qualifiés « Quasi CFIT », dont 64 en phase d'approche, survenus entre 2019 et 2022 (voir § 1.18.1.3). Parmi les points de fragilité que fait apparaître l'analyse de ces événements de sécurité, figurent :

- des faiblesses concernant l'écoute du collationnement, plusieurs événements faisant apparaître la non-détection d'un mauvais collationnement ;
- la faible fiabilité de la barrière MSAW, de nombreux événements mettant en évidence une phraséologie incorrecte, des délais de réaction possiblement élevés, voire une absence de réaction de la part de certains contrôleurs.

Par ailleurs, la DSNA ne disposait pas de méthodes d'observation sur position susceptibles de mettre à jour ou d'analyser différemment certains de ces points de fragilité en particulier.

De plus, la DSNA n'avait pas mis en place de processus définissant comment les enseignements tirés de ce type d'analyse de risque pouvaient être exploités pour mettre en place les mesures d'atténuation adaptées, notamment sur le plan national. À titre d'exemple, après l'incident grave de l'avion CRJ-1000 immatriculé F-HMLD survenu le 20 octobre 2021 à l'approche de Nantes-Atlantique (44), le service local de la navigation aérienne a identifié l'intérêt de renforcer l'entraînement relatif au MSAW pour ses équipes. En revanche, aucune instance n'avait et n'a eu la charge d'étudier l'intérêt d'étendre cette démarche au niveau national.

1.17.2 Airhub Airlines, Exploitant aérien

1.17.2.1 Organisation

La compagnie Airhub Airlines a été créée en le 17 juillet 2019. C'est une compagnie charter qui fournit également des services d'affrètement avec équipage. Son siège social se situe à Malte.

La compagnie a commencé ses opérations avec des Airbus A320, puis des A330/340.

À la date de l'incident grave du 9H-EMU, la flotte comprenait 9 avions : 3 A320, 3 A330 et 3 A340. La compagnie employait 25 salariés permanents et 450 personnels navigants en contrat d'indépendant. Les bases opérationnelles se situent à Vilnius (Lituanie), Amsterdam (Pays-Bas) et Thiès (Sénégal).

1.17.2.2 Procédures

L'exploitant indique dans sa documentation appliquer des procédures opérationnelles standards (*Standard Operating Procedures*, SOP), basées sur celles du FCOM Airbus (voir § 1.6.5.2 notamment).

L'exploitant indique que les SOP spécifiques d'Airhub Airlines sont complémentaires aux procédures Airbus, et leur objectif est d'améliorer et/ou clarifier certaines phases de vol spécifiques. Il y est mentionné que toute déviation des procédures Airbus est fondée sur des contraintes opérationnelles identifiées par l'exploitant aérien.

1.17.2.2.1 Consignes altimétriques de l'exploitant

Procédures de calage altimétrique

Il est indiqué dans le Manex partie A que les altimètres sont réglés sur le QNH comme seule référence d'altitude barométrique pour les phases de décollage, d'approche et d'atterrissage.

En descente si autorisé en altitude, les deux pilotes doivent afficher le dernier QNH sur l'aéroport de destination.

En opération RNAV, les deux pilotes doivent actualiser leur calage altimétrique en le réglant au QNH de l'aéroport de destination au plus tard au niveau de transition.

Calage altimétrique pour les opérations baro-VNAV

L'équipage doit régler le calage altimétrique, puis vérifier que les valeurs d'altitude ne diffèrent pas de plus de 100 ft au maximum au repère d'approche finale (FAF).

L'équipage effectue la procédure avec une source de calage altimétrique en QNH locale à jour. Une source de calage altimétrique régionale ou éloignée ne doit pas être utilisée.

1.17.2.2.2 Majoration des minima en approche de non-précision (NPA)

Selon le Manex partie B de l'exploitant, afin d'éviter de descendre en dessous des minima publiés en cas de remise de gaz, les minima pour les approches NPA sont majorés de 50 ft, excepté lors d'une manœuvre à vue.

Dans le Manex partie A sur les approches, l'exploitant définit une approche de non-précision (NPA) comme une approche aux instruments avec une MDH ou une DH supérieure à 250 ft et une RVR d'au moins 750 m. Les approches « GNSS/baro-VNAV (LNAV/VNAV) » remplissent donc les critères des NPA et sont considérées comme des NPA par l'exploitant. La majoration citée au-dessus s'applique donc pour les procédures RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV et c'est pourquoi les pilotes de l'incident grave ont majoré l'altitude de décision de 50 ft.

Toutes les approches de non-précision sont effectuées selon la technique des approches finales en descente continue (CDFA).

Il est à noter que d'après les PANS-OPS, les procédures RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV se font en 3D et ne nécessitent donc pas l'application d'une technique CDFA. Il n'est pas non plus nécessaire de descendre jusqu'à une altitude/hauteur minimale de descente (MDA/H) en dessous de laquelle la protection contre les obstacles n'est pas assurée. Les LNAV/VNAV sont conçus avec une DA/H.

1.17.2.2.3 Briefings et procédures spécifiques RNP

Briefings avant descente

Avant la descente, en cas d'approche RNP, les équipages réalisent deux briefings : un briefing normal, commun à toute approche, et un briefing complémentaire spécifique aux approches RNP.

Briefing normal

APPROACH BRIEFING		<i>(Ref OM-B 2.2.16.5)</i>
A/C Tech Status	Review	
NOTAM	Review relevant - affecting flight	
Weather	Review Destination and Alternate Airports	
TEM	Identify Threats / Potential Errors / Differences	
Charts (Brief)	Title: Airport / Chart Page / APP Type / Date App Info: FREQ / FAT ⬤ / AD Elevation (Check LDG ELEV) ⬤ / TA Plan View – Profile View – Minima – Lights – MSA ⬤	
FMGS	F-PLN	STAR – APP – RWY – Missed Approach – ALT Airport ⬤ Check altitude/speed constrains - MSA
	RAD-NAV	Set of confirm radio – aids ⬤
	PROG	Accuracy check (HIGH GPS PRIMARY (if applicable)) ⬤
	PERF	DESC: check speed ⬤ APP: Config FULL or 3 Speeds - MDA(DH) GA: confirm or change THR RED / ACC Altitude
	FUEL PRED	Check fuel predictions and EXTRA fuel / time ⬤ Holding (if expected)
	SEC F-PLAN	Prepare as desired (other RWY or alternate STAR) ⬤
Airport	Runway Data: Length, surface, threshold, lights, exits, Weather info: Runway Conditions, braking action, expected wind Landing Performance versus runway data Tail strike awareness Use of Reverse, Auto brake selection Taxi route, Parking	
Approach Mode	Type of approach – Brief how to fly the approach Use of AP / FD / ATHR	
SUPPL PROC	Supplementary and /or non-normal procedures	
AWO / CAT II/III	Use All Weather Operations Briefing Guise (Checklist/Highlights) (CM2)	
Normal briefing: the PF to use the MCDU with his ND in PLAN view selected as main source for the briefing with the EFIS Constraint pushbutton selected. PM to crosscheck against the Aerodrome Chart and to verify the FMGS data insertion.		
Note: Items with the symbol (⬤) are to be cross checked with associated displays (PFD/ND/MCDU).		

Figure 39 : briefing approche (Source : Manex B Airhub Airlines)

Briefing complémentaire RNAV

RNP Approaches	
GJM is approved for: RNP APCH – RNP 0.3 (This guide may be used also for VOR/NDB approaches in FINAL APP)	
CHECKLIST (Perform after Normal Briefing)	HIGHLIGHTS
<p>PREPARATION</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ A/C EQUIPMENT, STATUS, MEL, limitations <ul style="list-style-type: none"> ➢ 1 FMS, 1 GPS, 2 IRS, 1 MCDU, 1 FD, 1 PFD on PF side, 2 ND, 2 FCU channels ➢ NOTAMS, GPS PRIMARY, ground equipment ➢ WEATHER <ul style="list-style-type: none"> ➢ Check minima OAT on the applicable chart ➢ Apply OAT compensation for LNAV only ➢ Do not use remote QNH ➢ LDG MINIMA (LNAV/VNAV or LNAV) determine ➢ F-PNL A page CHECK <ul style="list-style-type: none"> ➢ 0.1-degree max diff. between CHART and MCDU vertical path ➢ 1.0-degree max diff. between CHART and MCDU inbound track (*) ➢ PROG page <ul style="list-style-type: none"> ➢ Insert RWY threshold for distance monitoring ➢ GO AROUND review <ul style="list-style-type: none"> ➢ Review contingency procedure for RNP GA 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ AT 10,000 ft ➢ GPS PRIMARY CHECK ➢ ALTIMETERS check (max diff. 100 ft) ➢ PRESS APPR pb when cleared for approach and TO waypoint is the final descent point ➢ ON FINAL <ul style="list-style-type: none"> ➢ Check that the V/DEV scale is displayed on the PFD ➢ Check the blue arrow on ND at FDP ➢ Monitor XTK error on ND (PM call if > 0.1 NM) ➢ Monitor V/DEV error on PFD (PM call if > ½ dot) ➢ AT MINIMUM <ul style="list-style-type: none"> IF VISUAL REFERENCES ARE SUFFICIENT (*) <ul style="list-style-type: none"> ➢ A/P OFF ➢ FD OFF ➢ TRK FPA SELECT ➢ RWY TRACK CHECK/SET IF NO VISUAL <ul style="list-style-type: none"> ➢ GO AROUND <p>*(Visual references must be the primary reference until landing)</p> <p>FAILURES</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ USE THE REMAINING AP/FD in case of: <ul style="list-style-type: none"> ➢ GPS PRIMARY LOST on one ND ➢ NAV ACCUR DOWNGRADE on one FMGS ➢ DISCONTINUE THE APPROACH or proceed visually in case of: <ul style="list-style-type: none"> ➢ GPS PRIMARY LOST on both ND ➢ XTK > 0.3 NM ➢ NAV FM/GPS POSITION DISAGREE on ECAM ➢ NAV ACCUR DOWNGRADE on both FMGS ➢ VDEV>3/4 dot (VNAV/LNAV minima)
<p>(*) 3.0-degree max diff. for conventional radio NAVAID approach</p>	<p>For detailed information refer to: FCOM/PRO/NOR/SOP/18/C/APPROACH USING FINAL APPROACH GUIDANCE</p>

Figure 40 : briefing complémentaire RNAV (Source : Manex B Airhub Airlines)

Durant l'approche, et comme mentionné au § 1.6.5, des actions, contrôles et précautions spécifiques sont prévus. Ainsi, l'équipage doit notamment réaliser les contrôles d'altitude-distance lors de la finale chaque fois que ceux-ci sont précisés sur la carte d'approche et notamment au FDP.

1.17.2.3 Formation

1.17.2.3.1 Stage d'adaptation à l'exploitant

Après avoir été engagé fin 2021, l'équipage a suivi un stage d'adaptation à l'exploitant (SADE). Ce stage comprenait :

- une formation théorique, effectuée sur ordinateur, aux travers de différents modules « *Computer Based Training (CBT)* ». Ces derniers recouvrent une variété de thèmes, dont notamment les approches PBN et les risques de collisions avec le sol (CFIT) ;
- une séance de simulateur d'entraînement (FSTD) de quatre heures ;
- une séance de contrôle au simulateur « *Operator Proficiency Check (OPC)* » de quatre heures, combiné avec un « *Licence proficiency check (LPC)* » ;
- un contrôle en ligne « *Line Check (LC)* » où le pilote est évalué en conditions opérationnelles.

Formation théorique de l'équipage aux approches PBN/RNP réalisée par ordinateur.

La formation réalisée par la compagnie est basée sur un support CBT (*Computer Based Training*) développé par FLYCO TRAINING SOLUTIONS. Elle comprend trois modules sur les approches PBN, ainsi qu'un module sur le CFIT :

- CBT "PERFORMANCE BASED NAVIGATION PROCEDURES" (14 pages)

Le module explicite des termes techniques et règlementaires, un historique de la navigation PBN, les principes de la navigation en route et en approche ainsi que des procédures normales et anormales liées à la dégradation de la navigation latérale ;

- CBT "GENERAL RNP APPROACH PROCEDURES" (11 pages)

Le module passe en revue 56 points comprenant des descriptions et des procédures.

Le point 34 décrit les dangers d'un QNH erroné, la nécessité de procédures d'affichage et de contrôle des altimètres efficaces. Il mentionne spécifiquement que le plan de descente étant calculé à partir de la valeur de QNH affichée, toute erreur affecterait le calcul de celui-ci. Il précise qu'un QNH erroné de 10 hPa au-dessus de la valeur réelle positionnerait l'avion 300 ft au-dessous du plan de descente théorique, entraînant un risque de collision avec le sol. Enfin, il préconise la nécessité d'utiliser le radio-altimètre et l'EGPWS comme moyen d'atténuation du risque ;

- CBT "AIRBUS RNP APPROACH PROCEDURES" (7 pages)

Le module décrit les procédures opérationnelles sur Airbus et mentionne la problématique du QNH au point 6 : « *Pilots must have a local altimeter setting and the temperature must be within limits* ». Le point 14 mentionne la nécessité de réaliser les contrôles altitude-distance tels que publiés sur la carte d'approche « *PNF Cross check Altitude versus Distance to Runway Threshold using the Approach Chart and the runway entered in the Progress Page* » ;

- CBT "CONTROLLED FLIGHT INTO TERRAIN" – CFIT (14 pages)

Ce module met en garde contre les erreurs de communication entre les contrôleurs et les équipages, les erreurs de QNH et précise que 60 % des CFIT se produisent lors d'approches de non-précision.

La formation précise enfin que les erreurs de calage altimétrique peuvent se produire dans les pays où le niveau de transition est bas, alors que la charge de travail lors de l'approche est importante.

Séances de simulateur lors du stage d'adaptation

Lors des entraînements et contrôles au simulateur, le programme comprend la réalisation systématique d'approches RNP en opérations 2D et 3D (avec ou sans guidage automatique sur le plan de descente).

1.17.2.3.2 Entraînements et contrôles périodiques

Les entraînements et contrôles périodiques suivent un cycle de trois ans décrit dans l'annexe 4 du Manex partie D de l'exploitant.

Ces entraînements et contrôles sont effectués à la fois au simulateur et en ligne :

- au simulateur, tous les six mois, les pilotes effectuent une séance d'entraînement (FSTD) suivi d'une séance de contrôle de type OPC. Une fois par an, la séance OPC est combinée avec un contrôle LPC. Lors des contrôles au simulateur, le programme comprend la réalisation systématique d'approches RNP en opérations 2D et 3D ;
- en ligne, lors d'un vol avec un instructeur au travers d'un « *Line Check* » (LC) qui vérifie les compétences des pilotes en conditions opérationnelles.

Les évaluations des deux pilotes n'ont fait ressortir aucune particularité dans l'exécution du programme.

1.17.2.4 Système de management de la sécurité et de la conformité

Le règlement (UE) n° [965/2012](#) modifié, dit « AIR OPS », exige des exploitants de transport aérien commercial la mise en place d'un système de gestion incluant la gestion de la sécurité⁷².

Le système de gestion de la sécurité de l'exploitant Airhub Airlines est décrit dans son manuel de gestion. Y sont notamment décrits :

- les obligations en matière de notification des événements de sécurité⁷³ ;
- les méthodes pour l'identification, l'analyse, l'évaluation et la gestion des dangers et des risques, ainsi que leur enregistrement dans une base de données (« *hazard log* ») ;
- le fonctionnement du programme d'analyse des données de vol (FDM).

La base de données « *hazard log* » de l'exploitant est décomposée en domaines d'activité : opérations aériennes, maintenance, opérations d'assistance en escale, organisation, etc. Pour chacun de ces domaines d'activité, les entrées correspondent au résultat d'une étude (approche proactive ou prédictive) ou à un événement d'exploitation. À chacune de ces entrées sont associées un danger, un événement indésirable, les conséquences les plus probables, un niveau de risque ainsi que les éventuelles mesures d'atténuation et le niveau de risque réévalué le cas échéant.

À la date de l'incident grave, Airhub Airlines n'avait pas formellement identifié de dangers spécifiques concernant les approches baro-VNAV ou l'utilisation d'un calage altimétrique erroné en approche. De plus, les erreurs de calage altimétrique ne faisaient pas l'objet d'une surveillance par le biais du FDM.

Note : un sondage informel des exploitants de transporteurs aériens commerciaux au cours des Journées Sécurité des Vols France (JSVF) organisé par la DSAC a confirmé que la détection en analyse des vols (FDM) des erreurs de calages altimétriques n'était que très faiblement implémentée à la date de l'incident grave.

1.18 Renseignements supplémentaires

1.18.1 Événements de sécurité résultant d'un calage altimétrique erroné et/ou ayant fait l'objet d'une activation du MSAW

Les événements présentés au § 1.18.1.1 sont ceux identifiés par le BEA et qui ont fait ou font l'objet d'une enquête de sécurité conduite par une autorité ou une commission d'enquête indépendante et impliquant des avions de masse maximale au décollage supérieure à 5 700 kg et/ou exploités en transport aérien commercial.

Les parties §§ 1.18.1.2 à 1.18.1.5 présentent une synthèse des résultats transmis par quatre autorités ou organisations (DSAC, DSNA, AESA et Eurocontrol) en réponse à une demande du BEA d'extraire de leur base de données des événements en lien avec une erreur de calage altimétrique (QNH) et/ou une activation du MSAW en phase d'approche.

⁷² ORO.GEN.200 ainsi que les AMC et GM associés.

⁷³ Exigences relevant du règlement (UE) n° 376/2014.

1.18.1.1 Accidents ou incidents ayant fait/faisant l'objet d'une enquête de sécurité consécutifs à une erreur de calage altimétrique

Incident grave du De Havilland DHC-8 immatriculé LN-WIP survenu le 22 décembre 2022 à l'approche de Svolvær (Norvège), enquête en cours

L'équipage a réalisé une approche LOC/DME sans référence visuelle alors que les altimètres étaient restés calés par erreur à la pression standard (1 013 hPa) au lieu du QNH de 987 hPa, entraînant une descente décalée vers le bas d'environ 730 ft. L'alerte du TAWS « TOO LOW TERRAIN » a retenti pendant la descente. L'équipage a interrompu l'approche puis s'est dérouteré.

Incident grave du CRJ 1000 immatriculé F-HMLD exploité par Hop!, survenu le 20 octobre 2021 à l'approche de Nantes (France)

Lorsque l'équipage a été autorisé à descendre à la première altitude sous le niveau de transition et à réaliser la procédure RNP APCH avec des minima LNAV pour la piste 21, le PM a collationné le QNH de manière erronée en mentionnant un QNH de 1 021 au lieu de 1 002 hPa. Cette erreur n'a pas été relevée par le contrôleur d'approche ni par la PF. Au moment du changement de calage altimétrique, l'équipage a omis de confirmer la valeur du QNH fourni par le contrôleur avec une autre source d'information, comme demandé par les procédures de l'exploitant. En raison de cette erreur de QNH, la trajectoire pendant l'approche était environ 530 ft plus bas que la trajectoire publiée. Lorsque l'alerte MSAW s'est déclenchée, la contrôleur LOC a informé l'équipage de cette alerte, sans rappeler initialement le QNH et sans inclure le mot « immédiatement ». Les échanges entre l'équipage et la contrôleur ont duré près de trente secondes avant que l'équipage ne comprenne son erreur et corrige la trajectoire verticale.

Incident grave du Boeing 787 immatriculé A6-BMD exploité par Etihad, survenu le 6 juin 2020 à l'approche d'Abu Dhabi (Émirats arabes unis)

En descente vers le niveau de transition, l'équipage était concentré sur la gestion de l'énergie élevée, si bien que la sélection du QNH a été effectuée de manière incorrecte : en passant du standard au QNH, le calage est resté à la valeur pré-réglée de 1 009 hPa, correspondant à la valeur au départ de Pékin au lieu de 999 hPa. Cela a entraîné une descente décalée vers le bas d'environ 280 ft. Le contrôleur d'approche n'a pas fourni d'informations sur le QNH local lors de l'autorisation initiale de descente, ni lors de l'autorisation pour la procédure RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV. Lorsque l'équipage a remarqué que le PAPI affichait quatre feux rouges, il a interrompu l'approche à une distance d'environ 1,3 NM du seuil et à une hauteur d'environ 210 ft RA alors que l'altitude indiquée était de 570 ft. Le contrôleur n'a pas donné l'instruction de vérifier le réglage du QNH ni l'altitude de l'avion lorsque l'alerte MSAW s'est déclenchée sur son écran de visualisation radar.

Incident grave du Boeing 737-300 immatriculé VH-NLK exploité par Nauru Airlines, survenu le 12 juin 2015 à l'approche de Kosrae (États fédérés de Micronésie)

L'équipage n'a pas réalisé l'ensemble des vérifications prévues avant d'entreprendre une approche NDB/DME de nuit sans référence visuelle. Les altimètres sont restés réglés à la pression standard au lieu du QNH de 1 007 hPa en vigueur, entraînant une descente décalée vers le bas d'environ 170 ft. L'équipage est descendu jusqu'aux minima puis a remis les gaz car il avait perdu de vue la piste. Avant d'interrompre l'approche, l'équipage n'avait pas tenu compte de deux alertes EGPWS « TOO LOW TERRAIN », considérant qu'elles résultaient d'un défaut de précision du système de navigation.

[Incident grave de l'Airbus A320 immatriculé VH-VGT exploité par Jetstar Airways, survenu le 31 mars 2014 à l'approche de Gold Coast \(Australie\)](#)

L'équipage a réalisé une approche RNP après avoir saisi par erreur une valeur de QNH de 1 025 hPa au lieu de 1 018, entraînant une descente décalée vers le bas d'environ 200 ft. À 159 ft RA, une alerte EGPWS « TERRAIN » a retenti et l'approche a été interrompue. L'enquête a montré qu'il y a possiblement eu confusion du QNH avec les informations relatives à la nébulosité (025) ou à la température (25) retranscrites dans l'ATIS, qu'il n'y a pas eu de comparaison avec le QNH entré dans le FMS, et que les contrôles d'altitude-distance n'ont pas permis à l'équipage d'identifier l'erreur.

[Incident grave de l'ATR 42-500 immatriculé OH-ATB exploité par Finncomm Airlines, survenu le 1^{er} janvier 2007 à l'approche de Seinäjoki \(Finlande\)](#)

L'équipage n'a pas réalisé l'ensemble des vérifications prévues par l'exploitant avant d'entreprendre une approche NDB. Il a notamment oublié de modifier le calage altimétrique pour passer de la pression standard au QNH 978 hPa. Par conséquent, l'équipage a évolué 950 ft trop bas au cours de trois tentatives d'approche successives, toutes interrompues à la suite de l'activation de l'EGPWS. D'autres alarmes, comme l'alarme de décrochage, ont retenti lors des évolutions avant que l'équipage ne décide de se dérouter.

[Accident du Learjet 35 immatriculé C-GPUN exploité par Canada Jet Charters, survenu le 11 janvier 1995 à l'approche de Masset \(Canada\)](#)

Lors d'un vol médicalisé de nuit, l'équipage a effectué une approche NDB avec un calage altimétrique erroné de 30,17 inHg au lieu de 29,17 (soit environ 34 hPa de différence), entraînant une descente environ 950 ft plus bas que le plan d'approche publié. L'avion est entré en collision avec la surface de l'eau à 8 NM de l'aéroport. Les deux membres d'équipage et les trois passagers sont décédés.

1.18.1.2 Extraction par la DSAC des événements qui lui ont été notifiés

Une recherche a été effectuée dans la base de données nationale⁷⁴ sur la période 2020-2022. Elle intégrait uniquement les comptes rendus obligatoires et les comptes rendus volontaires d'événements relatifs à la sécurité issus des exploitants de transport aérien commercial français et de la DSNA. Pour cette recherche, la DSAC a utilisé des expressions régulières sur l'attribut « narration » (texte libre) et certaines valeurs de la liste disponible pour l'attribut « type d'événement ». Seuls les événements en approche ont été sélectionnés.

Il ressort de cette recherche un total de 382 événements notifiés survenus en approche dont :

- 236 relèvent de la thématique MSAW (activation du MSAW)⁷⁵ ;
- 138 relèvent de la thématique QNH (erreur de calage altimétrique) ;
- 8 relèvent des deux thématiques précédentes à la fois.

Sur la période de l'étude, un seul exploitant français (Air France) avait mis en place un programme d'analyse des vols (*Flight Data Monitoring*, FDM) permettant la détection systématique des erreurs de calage altimétrique et favorisant ainsi la notification de ces événements au-delà de la seule démarche individuelle des pilotes.

⁷⁴ Voir règlement (UE) n° [376/2014](#), Article 6, paragraphe 6.

⁷⁵ Voir au § 1.18.1.3 les limites exprimées par la DSNA concernant les recherches sur la thématique MSAW.

Répartition par type d'approche :

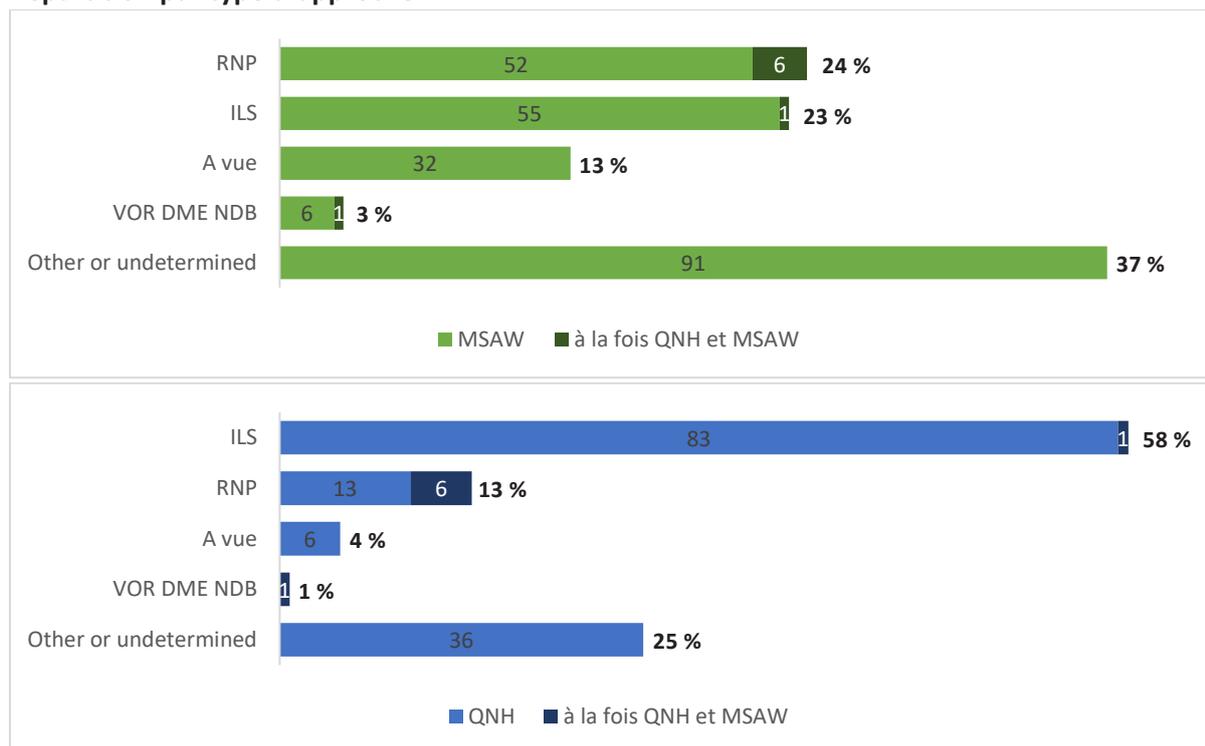


Figure 41 : répartition des événements « MSAW » en vert et « QNH » en bleu par types d'approche (Source : DSAC)

Les comptes rendus relatifs au MSAW sont principalement associés à des approches RNP (24 %) et ILS (23 %). Les erreurs de QNH notifiées sont majoritairement associées à des approches ILS (58 %) ; les approches RNP concernent 13 % de ces comptes rendus relatifs à une erreur de calage altimétrique. Dans les deux cas, les données disponibles ne permettent pas de distinguer les types d'approche RNP dont il s'agit.

Remarque : en Europe et en France en particulier, la majeure partie des approches IFR des exploitants de transport aérien commercial sont réalisées sur des ILS et beaucoup plus faiblement en RNP. Toutefois, que ce soit à une échelle locale ou plus globale, aucun organisme n'est chargé de dénombrer les approches réalisées par type d'approche. Ainsi, le BEA n'a pas pu estimer précisément le taux d'exposition aux différentes approches.

On peut également noter que les approches RNP représentent 13 % des comptes rendus et six des huit événements correspondant aux analyses « QNH » et « MSAW ». À l'inverse les approches ILS représentent 58 % des comptes rendus, mais ne représentent qu'un des huit événements correspondant aux analyses « QNH » et « MSAW ».

Répartition des altitudes/niveaux de vol auxquels l'erreur de QNH est détectée :

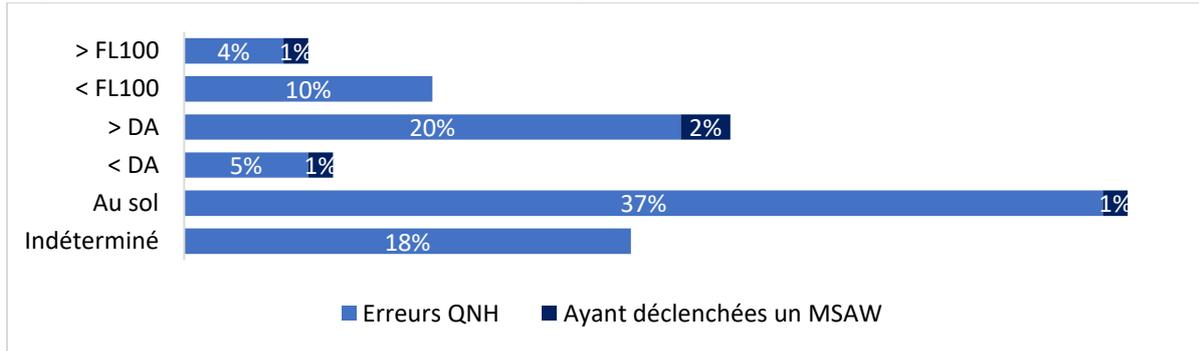


Figure 42 : répartition des altitudes/niveaux de vol auxquels l'erreur de QNH a été détectée (Source : DSAC)

Il apparaît qu'une grande partie des événements relatifs à une erreur de QNH ne sont pas détectés pendant la phase de vol ou alors à une hauteur inférieure à celle des minima (respectivement 38 % et 6 %, soit 44 % des approches, sachant qu'il y a 18 % de cas supplémentaires pour lesquels la hauteur à laquelle l'erreur a été détectée est inconnue).

Répartition des erreurs en fonction des valeurs QNH :

Sur les deux graphiques suivants, la couleur des événements varie graduellement :

- du bleu foncé au bleu clair lorsque la différence entre le QNH utilisé à bord et le QNH réel est négative (altitude affichée inférieure à l'altitude vraie, pour une altitude donnée l'avion est donc au-dessus de l'altitude vraie) ;
- de l'orange clair au brun lorsque la différence entre le QNH utilisé à bord et le QNH réel est positive (altitude affichée supérieure à l'altitude vraie, pour une altitude donnée l'avion est donc en dessous de l'altitude vraie, rapprochement avec le sol) ;
- le gris indique une valeur de QNH vrai inconnue.

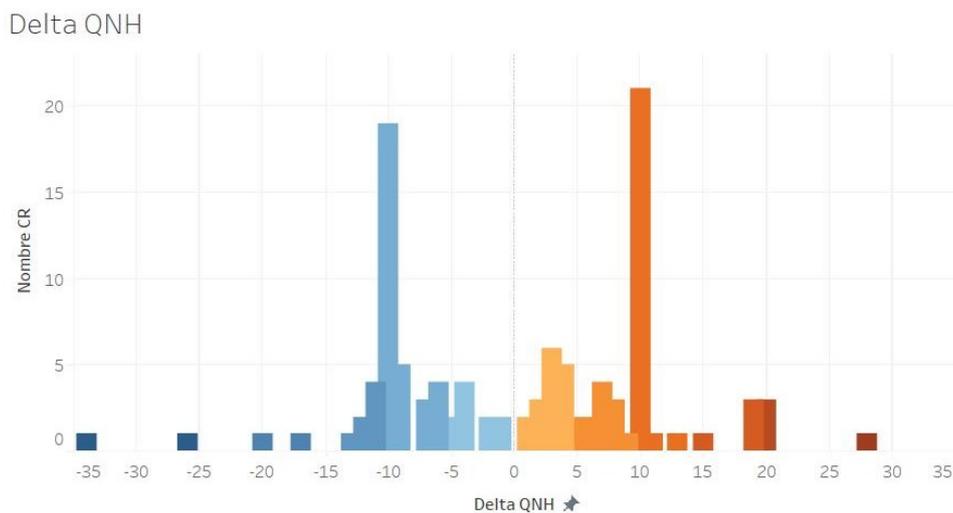


Figure 43 : nombre de comptes rendus d'événements en fonction de la valeur de l'écart par rapport au QNH réel (Source : DSAC)

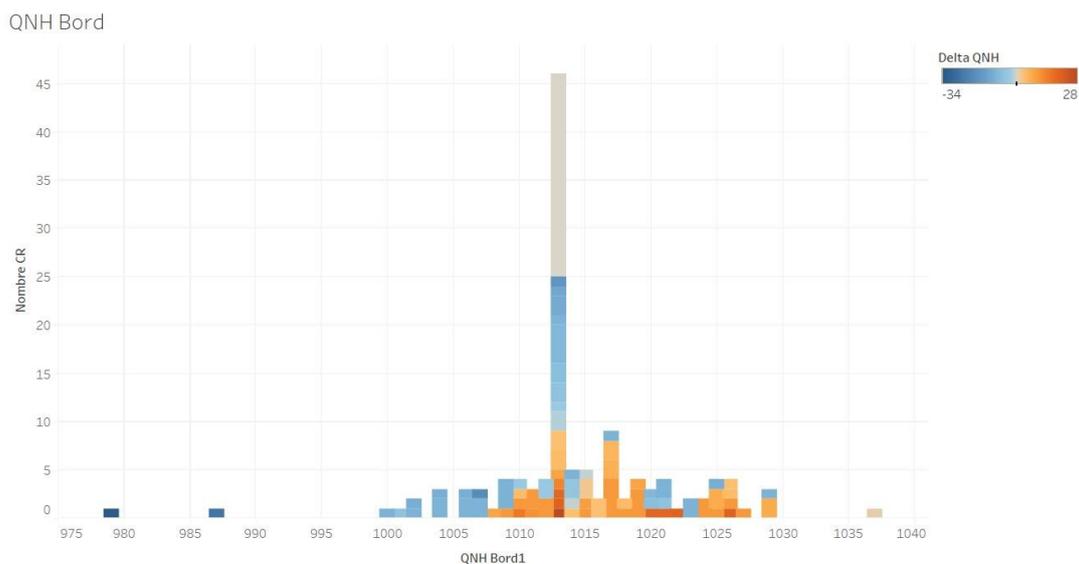


Figure 44 : nombre de comptes rendus d'événements en fonction de la valeur du QNH saisie (Source : DSAC)

L'analyse de la DSAC fait ressortir la proportion conséquente des événements au cours desquels :

- le calage était de plus ou moins 10 hPa par rapport au QNH réel (erreur d'un digit sur la dizaine) représentant 36 % des cas ;
- le calage a été maintenu à la valeur standard (1 013 hPa), représentant 36 % des cas.

Origine des erreurs altimétriques :

L'étude de la DSAC met également en évidence que la majeure partie des origines des erreurs sont concentrées au niveau des équipages (69 % des événements QNH) avec :

- l'insertion d'un QNH erroné après transmission et collationnement correct du QNH (41 %) ;
- le maintien du calage altimétrique au standard par l'équipage sans contribution ATC (28 %).

La lecture de ces comptes rendus fait toutefois apparaître qu'une partie non négligeable des événements ont une contribution ATC (27 % des événements QNH) avec :

- le collationnement erroné du QNH par l'équipage, non relevé par le contrôle aérien (14 %) ;
- la transmission d'une valeur de QNH erronée de la part du contrôle aérien (10 %) ;
- l'absence de transmission du QNH par le contrôle aérien (3 %).

Enfin parmi les incidents classés « autres ou indéterminés » (4 %) figurent des erreurs de mesure des instruments météorologiques ou encore des erreurs d'enregistrement de l'ATIS.

1.18.1.3 Extraction par la DSNA des événements qu'elle a répertoriés

La DSNA a expliqué au BEA ne pas être en mesure de fournir des extractions fiables concernant :

- les événements au cours desquels une alerte MSAW s'est activée, car l'activation n'est pas enregistrée automatiquement. Par ailleurs, de nombreuses activations sont considérées comme intempestives ou ne sont pas comprises par les contrôleurs, qui ne les notifient alors pas à la DSNA bien que la consigne opérationnelle dédiée à l'utilisation et l'exploitation du MSAW le prévoit ;
- les événements résultants ou faisant apparaître une erreur de calage altimétrique, car en l'absence de valeur codée prédéfinie pour retranscrire ce facteur, seule une recherche d'expressions régulières dans le texte serait efficace, recherche que la DSNA n'a pas été en mesure de réaliser.

À la place, la DSNA a proposé d'extraire les événements codés « quasi CFIT » dans sa base de données. La DSNA dénomme ainsi tous les événements IFR au-cours desquels un aéronef, avec ou sans alerte MSAW, est passé ou évolué, sans perte de contrôle, sous l'altitude minimale publiée à l'endroit considéré. Cette situation correspond au passage non intentionnel sous les altitudes minimales publiées à l'endroit considéré. La recherche a été réalisée au début de l'année 2023 et a porté sur la période 2019-2022. Il apparaît que parmi les 89 événements codés « quasi CFIT », 64 sont survenus en phase d'approche. Les caractéristiques présentées ci-après ne concernent que ces événements en approche. La DSNA a construit une typologie ad hoc pour rendre compte de l'origine de l'événement. Le graphique suivant s'appuie sur cette typologie⁷⁶.

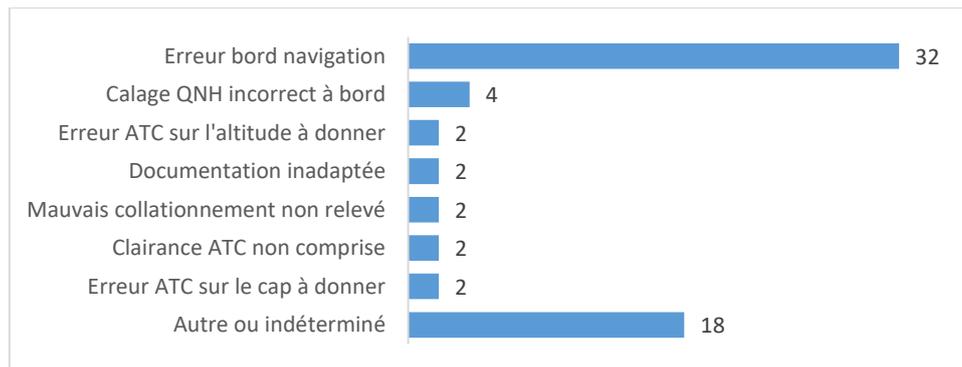


Figure 45 : Origine des événements « quasi CFIT » en approche selon la typologie ad hoc de la DSNA

Pour au moins la moitié, ces événements résultent d'une erreur de navigation côté bord, c'est-à-dire le suivi d'une trajectoire horizontale et/ou verticale différente de celle publiée et/ou instruite par le contrôleur. Quatre événements sont identifiés comme étant consécutifs à une erreur de calage altimétrique, quelle qu'en soit l'origine⁷⁷.

Deux de ces calages erronés font suite à un collationnement erroné de l'équipage, non détecté par le contrôleur. Dans ces deux cas, une alerte MSAW s'est activée.

Dans un peu moins de la moitié des cas (30), une alerte MSAW s'est activée et a été jugée valide. Parmi ces 30 événements, 19 ont donné lieu une réaction inappropriée de la part du contrôleur au MSAW, sous la forme :

- d'une absence de message (4 cas) ; ou
- d'un message non conforme à la phraséologie standard (15 cas).

Quarante-et-un événements « quasi CFIT » sont survenus au cours d'approches ILS tandis que 16 sont survenus au cours d'approches RNP⁷⁸.

⁷⁶ Pour cette typologie, la DSNA a rempli la grille de lecture en attribuant une unique valeur pour chaque événement. En réalité, plusieurs valeurs pourraient caractériser un même événement (par exemple : « calage QNH incorrect à bord » et « mauvais collationnement non relevé »).

⁷⁷ En raison du codage au moment de l'extraction, l'incident grave objet du présent rapport n'est pas ressorti.

⁷⁸ Le type d'approche RNP réalisé par les équipages est inconnu des contrôleurs (voir § 1.17.1.3.1).

Extraction par les services de CDG des événements qu'elle a répertoriés

Avec les mêmes contraintes que celles de la DSNA au niveau national, les services de CDG ont répertorié 15 événements d'erreur de calage altimétrique entre 2019 et 2022 en approche :

- sept pour des oublis de passage au QNH sous le niveau de transition ;
- huit pour des erreurs de collationnement non relevées, ou d'insertion de QNH erroné après transmission et collationnement d'une valeur de QNH correcte. Six de ces huit cas concernent des erreurs de 10 hPa.

1.18.1.4 Extraction par l'AESA des événements enregistrés dans le répertoire central européen

Le répertoire central européen⁷⁹ est la base de données vers laquelle sont normalement transférées toutes les occurrences enregistrées dans les bases de données nationales des États membres de l'Union européenne, elles-mêmes alimentées par les prestataires (exploitants d'aéronefs, PSNA, etc.).

L'AESA a réalisé les extractions correspondant à la demande du BEA à la fin de l'année 2022. Les données transmises par l'AESA n'ont pas été exploitées par le BEA au vu des différences avec les extractions effectuées par la DSAC et la DSNA. À titre d'exemple, seulement trente-deux événements relatifs à une erreur de QNH proviennent de la France sur cette période 2011-2021 (à comparer aux 146 événements relevés par la DSAC sur la période 2020-2022). Plusieurs paramètres peuvent influencer sur la qualité d'une extraction dans le répertoire central européen, tels que l'exhaustivité du transfert des données depuis les bases nationales, la construction de la requête ou encore la prise en compte de la langue utilisée lors de la notification pour les recherches d'expressions régulières sur les attributs en texte libre.

Remarque :

En 2022, l'AESA a finalisé l'évaluation de la thématique de sécurité intitulée « *Approach path management* » (Safety Issue [SI-0007]) dans le cadre du programme européen pour la sécurité de l'aviation civile (EPAS). Le rapport de cette évaluation ne traite pas la possibilité d'une utilisation d'un QNH erroné lors d'une approche avec guidage vertical barométrique ainsi que ses conséquences. L'AESA a expliqué au BEA que ce type d'évaluation nécessitant des ressources conséquentes, celle-ci ne serait mise à jour qu'après que d'autres thématiques de sécurité, également prioritaires, aient été à leur tour évaluées.

1.18.1.5 Extraction par Eurocontrol des événements qui lui ont été notifiés

Eurocontrol administre un système de notification volontaire d'incidents⁸⁰, indépendamment des dispositions du règlement (UE) n° 376/2014⁸¹ qui s'imposent aux organisations et aux États. Les données proviennent principalement de prestataires de services de la navigation aérienne (ANSP) et d'exploitants d'aéronefs européens sur la base du volontariat.

Eurocontrol a réalisé une recherche au début de l'année 2023. Elle a porté sur la période allant de 2016 à janvier 2023. Le terme « QNH » a été cherché dans le texte du compte rendu. Les résultats ont été analysés puis une typologie ad hoc a été créée pour rendre compte de la nature de l'anomalie rencontrée en lien avec le QNH. Au total, toutes phases de vol confondues, 54 comptes rendus ont été sélectionnés et triés selon cette typologie.

⁷⁹ Voir règlement (UE) n° [376/2014](#), Article 8, paragraphe 2.

⁸⁰ Eurocontrol Voluntary ATM Incident Reporting (EVAIR).

⁸¹ Règlement (UE) du Parlement européen et du Conseil du 3 avril 2014 concernant les comptes rendus, l'analyse et le suivi d'événements dans l'aviation civile ([Version en vigueur le jour de l'incident grave](#)).

Selon cette typologie, les principales anomalies relatives au QNH sont :

- la sélection d'une valeur incorrecte par l'équipage (dans 20 % des cas) ;
- une différence entre la valeur du QNH mentionnée dans l'ATIS et celle transmise à l'équipage par le contrôleur (15 %) ;
- une valeur erronée du QNH dans l'ATIS (13 %) ;
- ou encore le collationnement par l'équipage d'une valeur de QNH erronée, non détectée par le contrôleur (11 %).

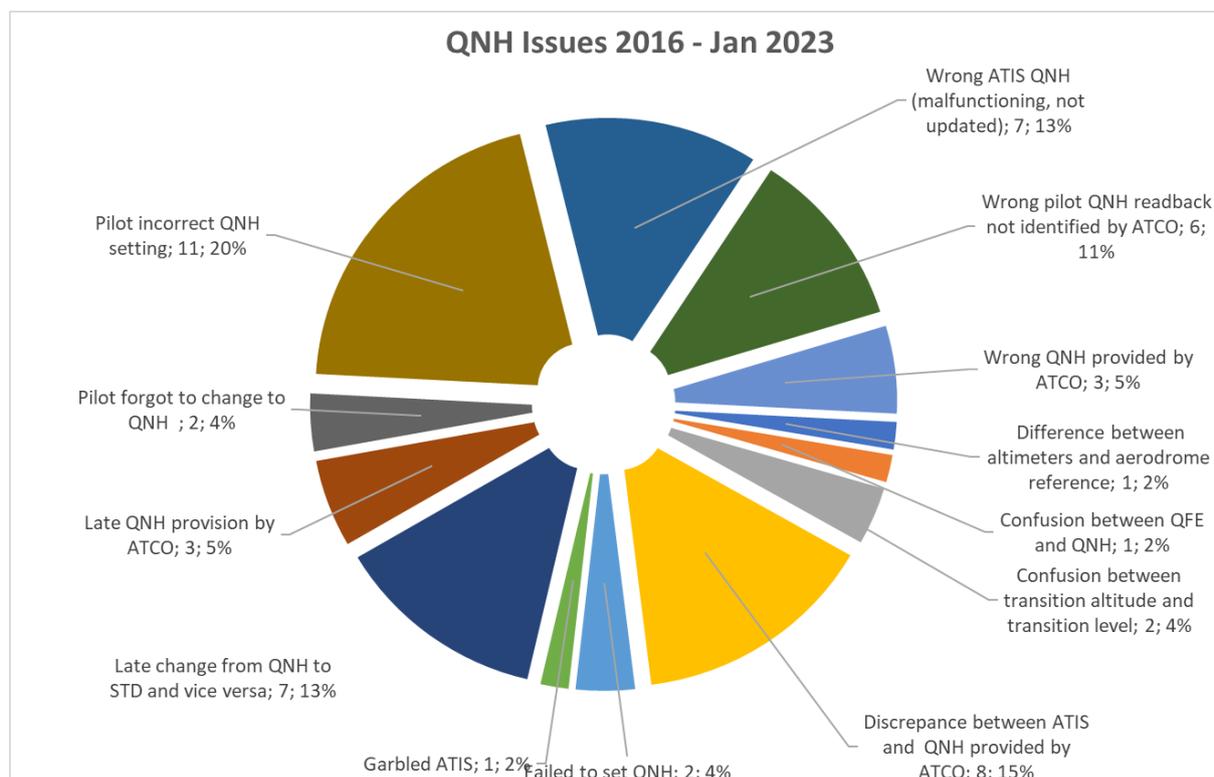


Figure 46 : origine des événements « QNH » en approche selon la typologie ad hoc
(Source : Eurocontrol)

1.18.2 Systèmes sol de détection d'une erreur de calage altimétrique

Exigences réglementaires

Certains prestataires de service de la navigation aérienne, comme le NATS aux Royaume-Uni ou le LVNL aux Pays-Bas, ont mis en place un système sol qui compare le calage altimétrique transmis par certains avions à la valeur du QNH en vigueur localement, afin d'informer le contrôleur aérien d'une potentielle référence altimétrique erronée à bord d'un avion.

En effet côté avion, le [règlement \(UE\) n° 1207/2011⁸²](#), puis [le règlement \(UE\) 2023/1770⁸³](#) abrogeant ce dernier et fixant les exigences relatives à la performance et à l'interopérabilité des activités de surveillance pour le ciel unique européen et ses amendements, exige que les aéronefs volant dans l'espace aérien européen de masse supérieure à 5700 kg ou ayant une vitesse de

⁸² Règlement d'exécution de la Commission du 22 novembre 2011 fixant les exigences relatives à la performance et à l'interopérabilité des activités de surveillance pour le ciel unique européen).

⁸³ Règlement d'exécution de la Commission du 12 septembre 2023 établissant des dispositions relatives aux équipements d'aéronef nécessaires pour l'utilisation de l'espace aérien du ciel unique européen, ainsi que des règles d'exploitation relatives à l'utilisation de l'espace aérien du ciel unique européen.

croisière maximale supérieure à 250 kt, soient équipés d'un transpondeur qui transmette les informations des protocoles Mode S enrichi (*Enhanced Surveillance Mode S*, EHS) et ADS-B. Les exigences de certification associées sont définies dans les spécifications de certification [CS-ACNS](#) (*Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Airborne Communications, Navigation and Surveillance*). Parmi les informations transmises (*Downlink Aircraft Parameters*, DAP) et exigées figurent le calage altimétrique à bord de l'avion au travers du BPS (*Barometric Pressure Setting*).

En revanche, côté prestataires de service de la navigation aérienne, il n'existe pas d'obligation d'implémentation de système sol qui utiliserait ce paramètre BPS pour alerter le contrôleur dans le cas où un aéronef aurait un réglage QNH erroné. Il n'y a pas d'exigence non plus pour les autres DAP pouvant être utilisés dans une démarche plus globale par les services de navigation aérienne. L'OACI a publié en 2021 la troisième édition du guide « [Mode S downlink aircraft parameters implementation and operations guidance document](#) ».

Implémentation en Europe et en France

Les données fournies par Eurocontrol montrent qu'actuellement en Europe, parmi les 41 [États membres d'Eurocontrol](#), 6 disposent d'un système alertant le contrôle qu'un aéronef transmet un calage altimétrique incorrect et 11 disposent d'un système permettant l'affichage du calage altimétrique des aéronefs sur l'écran des contrôleurs aériens.

En France, aucun organisme en route, d'approche ou tour n'affiche le BPS, ou ne transmet une alerte en cas de calage altimétrique erroné. De même, aucun organisme de la DSNA en France métropolitaine mis à part Ajaccio n'utilise les données ADS-B transmises par les aéronefs et qui incluent également le BPS. Un projet est en cours pour obtenir la couverture ADS-B pour les centres en route sur la métropole.

Seuls les centres de contrôle en route reçoivent les transmissions Mode S EHS des aéronefs. À Paris-Charles de Gaulle, le système de contrôle étant similaire à ceux des centres en route, les paramètres Mode S EHS sont également reçus. En revanche et pour l'ensemble de ces centres, seuls les paramètres de niveau de vol sélectionné, cap instantané et vitesse indiquée transmis par Mode S EHS sont disponibles pour l'affichage sur l'écran du contrôleur. Le paramètre BPS du calage altimétrique n'est pas traité par le système.

1.18.3 Systèmes bord de détection d'une erreur de calage altimétrique

1.18.3.1 Systèmes générant une alerte pour l'équipage

Le jour de l'incident grave et à bord de l'avion, la détection de l'erreur de calage altimétrique reposait uniquement sur l'équipage. Aucun système bord n'en permettait la détection automatique, et aucune réglementation ne l'exigeait.

Plusieurs systèmes ont pourtant été développés pour permettre d'alerter l'équipage d'une erreur de calage altimétrique. En particulier :

- **Système CAM-BTA d'Honeywell et ALTSM step 1 d'Airbus**

Honeywell a développé dans les années 2010 une fonction (CAM-BTA, *Corrected Altitude Monitor Below Transition Altitude*) permettant de fournir une alerte sonore « *Altimeter setting* » lorsqu'une incohérence entre l'altitude barométrique corrigée de la température et l'altitude géométrique GNSS est détectée. Cette fonction est disponible au travers du package RAAS (*Runway Awareness and Advisory System*).

La fonction est active en dessous de 5 000 ft AAL ou en dessous de l'altitude de transition. L'alerte sonore est répétée une fois, huit secondes plus tard si l'incohérence est toujours présente. Cette fonction est disponible au travers d'un *Supplemental Type Certificate* (STC) pour les avions équipés d'un EGPWS Honeywell avec la version logicielle -230-230 ou supérieure.

Airbus a repris la fonctionnalité CAM-BTA et l'a certifiée en 2018 au travers du système ALTSM Step 1 (*Altimeter Setting Monitor*), uniquement compatible avec les EGPWS Honeywell MARK V de P/N Airbus 965-1676-006 (comprenant donc une version logicielle Honeywell -230-230 ou supérieure de l'EGPWS) et les EGPWS MARK VA de P/N Airbus 69000942 (-151/-251).

L'EGPWS MARK V de P/N 965-0976-003-206-206 à bord du 9H-EMU n'était pas compatible avec le CAM-BTA et l'ALTSM Step 1. Pour pouvoir bénéficier de cette fonctionnalité sur un A320 à partir d'une version logicielle de l'EGPWS inférieure à -218-218 (comme c'est le cas pour le 9H-EMU avec une version -206-206), il est nécessaire de faire des modifications logicielles et matérielles potentiellement importantes.

Honeywell a conclu qu'à la suite des simulations qu'il a réalisées dans des conditions similaires à l'incident grave, la fonction CAM-BTA aurait déclenché une alerte sonore « *Altimeter setting* » à 1 843 ft RA, soit 2 minutes et 22 secondes avant la hauteur radio-altimètre minimale enregistrée et corrigée de 6 ft lors de l'incident grave.

Il n'a pas été possible de déterminer combien d'avions étaient équipés de la fonctionnalité CAM-BTA. Fin 2022, moins de 200 avions Airbus étaient équipés de la fonctionnalité ALTSM Step 1. À l'heure actuelle, Boeing n'a pas certifié de système similaire, mais le CAM-BTA d'Honeywell reste disponible sous STC.

- **Système Airbus ALTSM Step 2**

Airbus développe actuellement une évolution du système, appelé ALTSM Step 2. Ce système devrait être compatible avec l'ensemble des TAWS équipant les différents modèles d'avions actuellement produits par Airbus. ALTSM Step 2 devrait permettre d'avoir une alerte visuelle au PFD avec la valeur du QNH flashant en ambre en plus de l'alerte sonore « *ALTIMETER SETTING* ». La surveillance de la cohérence entre l'altitude barométrique et l'altitude GNSS serait réalisée entre 600 ft RA et 6 000 ft AAL. L'objectif affiché d'Airbus est de certifier cette fonction en 2024. Pour le 9H-EMU, cela nécessiterait en plus des modifications nécessaires pour l'ALTSM Step 1, de changer d'équipement TAWS (*hardware*).

Le tableau suivant donne un aperçu prévisionnel à fin 2022 de la disponibilité de l'ALTSM sur les avions Airbus :

Function	A220	A300/A310	A320 family	A330/A340	A350	A380
ALTSM (Audio only)	Not available	Under consideration	Honeywell EGPWS	Honeywell EGPWS	Not Available	Not available
ALTSM v2 (Audio + visual indication)	Under consideration	Under consideration	2024 EGPWS and T3CAS	2024 EGPWS and T3CAS (A330 Only)	2027 Similar function on new aircraft	Under consideration

Figure 47 : disponibilité et prévisions à fin 2022 des fonctions ALTSM step 1 et step 2
(Source : Airbus, *Safety first* magazine novembre 2022)

1.18.3.2 Systèmes améliorant la conscience de la situation de l'équipage

Plusieurs systèmes bord peuvent permettre d'augmenter la conscience de la situation de l'équipage vis-à-vis des conséquences d'une erreur de calage altimétrique. Ces systèmes ne sont pas conçus pour détecter ce type d'erreur et ne sont donc pas suffisamment robustes pour en faire une barrière efficace et suffisante. Toutefois, suivant le moment où l'équipage s'aperçoit d'une incohérence, cela peut permettre à ce dernier d'éviter une collision avec le sol, voire dans certains cas d'identifier en amont une erreur de calage altimétrique.

Représentation du profil de descente

La visualisation du profil de descente fait partie de ces systèmes augmentant la conscience de la situation et pouvant permettre à l'équipage de détecter indirectement un calage altimétrique erroné. Cet affichage n'est pas exigé règlementairement par les normes de certification, y compris sur les aéronefs les plus récents, mais de nombreux constructeurs d'avions en proposent désormais. Sur la flotte Airbus, le *Vertical Display* (VD) est disponible uniquement sur A350 et A380 (par défaut sur les deux modèles). Sur la flotte Boeing, le *Vertical Situation Display* (VSD) est disponible en option sur certaines versions du 737 et par défaut sur le 787.

Sur Airbus, lorsque la hauteur radio-altimètre est inférieure à 5 000 ft RA, le plan de descente de l'avion, la piste et le profil du relief devant l'avion sont affichés sur le VD. La hauteur de l'avion calculée par le radio-altimètre correspond à l'écart d'altitude entre celle de l'avion et celle de la barre orange « *True terrain symbol* ». Cette représentation est similaire à celle du PFD. La valeur d'altitude affichée sur le VD correspond à celle du PFD et est donc dépendante du calage altimétrique du FCU.

L'équipage peut détecter une incohérence dans la représentation en comparant attentivement le *True terrain symbol*, la modélisation du relief devant l'avion et la piste. En particulier dans le cas d'un réglage QNH erroné et surestimé, la piste sera représentée sous le niveau du sol, et le *True terrain symbol* sera en décalage par rapport à la modélisation du relief. Suivant le niveau d'échelle utilisé pour le VD, ce décalage peut ne pas être identifiable facilement par l'équipage.

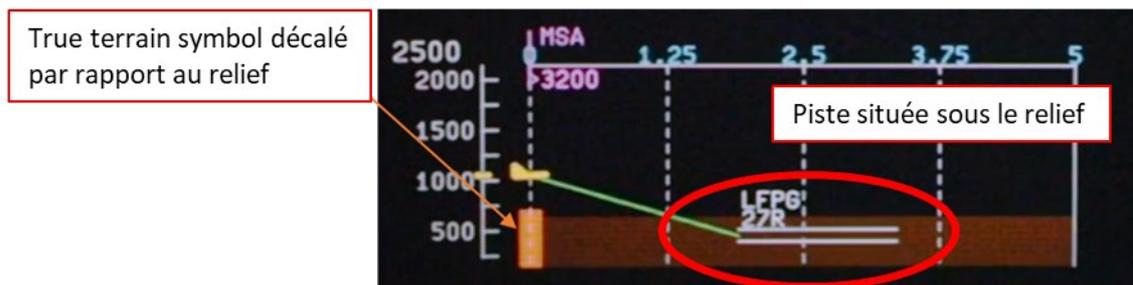


Figure 48 : Vertical Display A350 dans le cas d'un QNH erroné (1 011 hPa au lieu de 1 001 hPa)
(Source : Airbus)

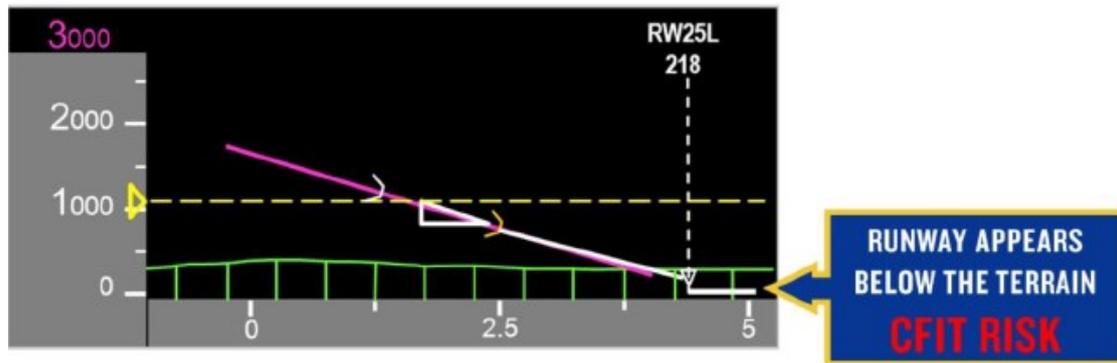


Figure 49 : VSD Boeing 737 avec un réglage QNH > QNH réel
(Source : communication sécurité des vols Ryanair)

Systèmes de vision augmentée

Les systèmes de vision augmentée EFVS (*Enhanced Flight Vision System*) ou CVS (*Combined Vision System*) fournissent une image de l'environnement extérieur à partir de données de capteurs infrarouges et permettent d'améliorer la visibilité de nuit ou par conditions météorologiques dégradées.

Toujours dans le cas d'une approche barométrique réalisée avec un QNH erroné et lorsque l'équipage n'a pas encore la vue directe de la piste, ces systèmes peuvent permettre de prendre conscience d'un plan de descente incorrect ou de la faible hauteur par rapport au relief.

De tels systèmes équipent principalement des avions d'affaire.



Figure 50: Dassault Falcon Eye (Source : Dassault Aviation)

1.19 Techniques d'enquête utiles ou efficaces

Non applicable.

2 ANALYSE

2.1 Introduction

L'équipage réalisait le vol NSZ4311 depuis l'aéroport Stockholm Arlanda (Suède) à destination de l'aéroport Paris-Charles de Gaulle (CDG) le 23 mai 2022.

À CDG, l'ILS de la piste 27R était hors service depuis plusieurs jours pour travaux et les procédures RNP étaient en vigueur sur cette piste. La pression barométrique locale ramenée au niveau moyen de la mer (QNH) était de 1 001 hPa et une averse de pluie était en cours sur la trajectoire d'approche finale, dégradant fortement la visibilité. Le balisage lumineux de la piste d'atterrissage avait été allumé avec l'arrivée de l'averse de pluie alors que la rampe d'approche ne l'avait pas été, par oubli du contrôleur tour.

L'avion n'étant pas équipé pour effectuer une procédure RNP APCH avec des minima LPV (approche offrant un guidage latéral et vertical satellitaire), l'équipage a réalisé une procédure RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV, procédure d'approche avec un guidage vertical barométrique.

En approche intermédiaire, l'équipage a reçu à deux reprises de la part de la contrôleuse aérienne d'approche une valeur de QNH erronée de 10 hPa (1 011 hPa au lieu de 1 001) qu'il a utilisé pour le calage des chaînes altimétriques de l'avion. Or, une erreur de calage altimétrique engendre une différence entre l'altitude réelle de l'avion et l'altitude affichée. Pour les approches avec guidage vertical barométrique, le plan de descente et le guidage vertical sont affectés. Ainsi, en utilisant une valeur de QNH supérieure de 10 hPa à sa valeur réelle, l'approche a été effectuée sur un plan de descente décalé vers le bas d'environ 280 ft, sans que l'équipage en ait conscience et sans qu'il ait de références visuelles extérieures.

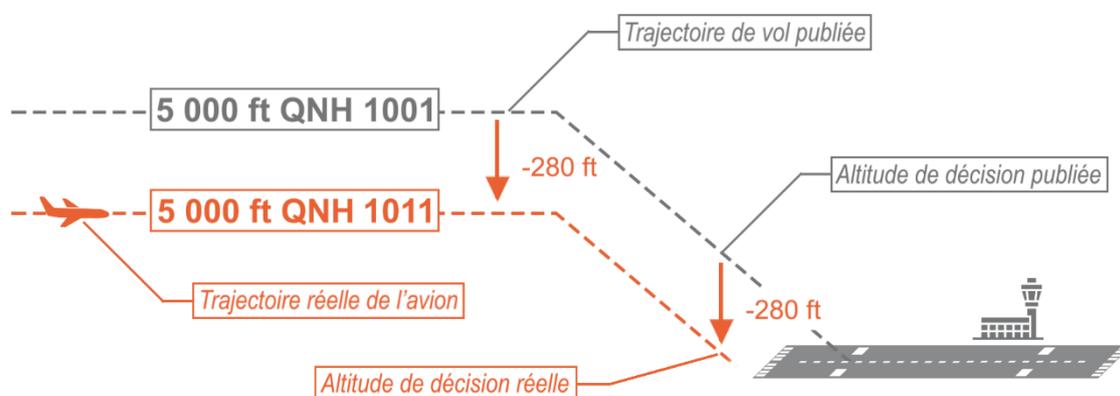


Figure 51 : impact d'un QNH erroné sur le plan de descente (Source : BEA)

La conception des procédures IFR ne prend pas en compte une erreur de calage altimétrique, les procédures opérationnelles des équipages et celles des contrôleurs aériens n'ont pas permis de prévenir l'usage d'un calage altimétrique erroné. De plus, ni les instruments de l'avion, ni les outils du contrôleur aérien n'étaient conçus pour détecter ce type d'erreur.

À une hauteur de 239 ft RA, peu de temps avant que l'avion n'atteigne l'altitude indiquée correspondant à l'altitude de décision retenue, une alerte sol de proximité avec le relief (MSAW) s'est déclenchée dans la tour de contrôle. Neuf secondes plus tard, le contrôleur aérien de la tour alors en fréquence avec l'équipage l'a informé de la situation en utilisant une phraséologie incorrecte et inadaptée. L'équipage n'a pas entendu cette annonce et a continué la descente.

Quelques secondes après que l'altitude indiquée a passé l'altitude de décision (majorée de 50 ft par l'exploitant), l'équipage a remis les gaz car il n'avait pas acquis de référence visuelle avec le sol. Au cours de la manœuvre, la hauteur radio-altimètre minimale enregistrée et corrigée était de 6 ft, soit environ 2 m, alors que l'avion était à environ 0,9 NM du seuil de piste, en dehors des limites de l'aéroport Paris-Charles de Gaulle. Conformément aux spécifications du système installé dans l'avion, aucune alerte bord de proximité avec le sol (TAWS) n'a été déclenchée. L'équipage a indiqué dans son témoignage qu'il n'avait pas eu conscience de ce rapprochement avec le sol.

Au cours de la remise de gaz, la valeur du QNH local a été correctement fournie à l'équipage par le contrôleur tour. En revanche le copilote a collationné l'information erronée qui était utilisée à bord de l'avion. Cette erreur n'a pas été relevée par le contrôleur aérien et l'équipage s'est présenté pour une deuxième approche sur la piste 27R, avec de nouveau une trajectoire de vol à une altitude inférieure de 280 ft à celle prévue.

Lors de cette seconde approche, l'alerte MSAW s'est déclenchée à une hauteur d'environ 850 ft RA, bien plus haute que lors de la première approche. Le contrôleur aérien qui avait pris la relève du contrôleur tour en position lors de la première approche a averti l'équipage de la situation en utilisant lui aussi une phraséologie incorrecte et inadaptée. L'équipage a répondu qu'il était sur la bonne trajectoire et qu'il avait visuel sur la piste. La rampe d'approche avait cette fois-ci été allumée et les conditions météorologiques s'étaient améliorées. L'équipage a corrigé la trajectoire et a atterri sans autre incident.

À la fin du vol et d'après les différents témoignages recueillis, aucun des acteurs de première ligne n'a eu conscience de ce qui s'était passé et de la gravité de l'événement.

L'analyse porte sur les points suivants :

- la communication et l'insertion de l'information de calage altimétrique ;
- la conscience de la situation de l'équipage ;
- l'activité des contrôleurs aériens ;
- les systèmes sol (MSAW) et bord (TAWS) de prévention des collisions avec le sol (CFIT) ;
- les systèmes sol et bord de détection d'un calage altimétrique erroné ;
- la prise en compte insuffisante de la menace d'un calage altimétrique erroné ;
- la mise en place du [règlement IR-PBN](#) et ses potentielles conséquences.

2.2 Communication et insertion de l'information de CALAGE ALTIMÉTRIQUE

2.2.1 ATIS et préparation de l'approche

Lors de la préparation de l'approche, les pilotes ont successivement écouté les informations de l'ATIS à la radio puis ont comparé leurs données. Ils avaient tous les deux noté sur un papier la valeur correcte du QNH transmise par l'ATIS, qui était de 1 001 hPa.

Les informations météorologiques de l'ATIS à CDG sont directement issues des données de Météo-France, ce qui limite les erreurs de retranscriptions. Il est diffusé par fréquence radio (Voice-ATIS) et aussi par transmission de données numériques (Data link-ATIS), ce qui permet aux équipages des avions équipés Data link-ATIS⁸⁴ d'éviter également des erreurs de retranscription lors de la prise en compte de ce dernier et de bénéficier d'une plus grande disponibilité mentale. L'étude de Météo-France a montré qu'en 30 minutes, les variations importantes de QNH sont

⁸⁴ Ce n'était pas le cas du 9H-EMU.

extrêmement rares (voir § 1.7.3). On peut ainsi considérer que la valeur de QNH récupérée en croisière avant la descente lors de la prise de l'ATIS est fiable pour l'approche et proche de la valeur réelle.

L'équipage n'a pas pré-affiché le QNH sur les chaînes altimétriques de l'avion lors de la prise de l'ATIS car le système n'est pas prévu pour ça et que les procédures du constructeur et de l'exploitant ne le demandaient pas. Le pré-affichage du QNH lors de la préparation de l'approche aurait pu aider l'équipage à identifier un écart important entre le QNH fourni par l'ATIS et celui erroné fourni par la contrôleuse aérienne.

2.2.2 Transmission du QNH par le contrôle aérien

Lors de la première approche

La contrôleuse d'approche intermédiaire (ITM) a fourni à l'équipage du vol NSZ4311, lors de la première clairance en altitude en dessous du niveau de transition, une information de QNH erronée : 1 011 hPa au lieu de 1 001.

Elle a indiqué dans son témoignage avoir pour habitude de regarder l'écran DECOR sur lequel est indiqué le QNH avant de le transmettre à un équipage. Elle ne sait plus si elle l'a fait lors de l'incident grave.

Cette erreur sur le chiffre de la dizaine et sa non-récupération peuvent probablement s'expliquer par une combinaison des facteurs suivants :

- une transposition des deux derniers chiffres de l'indicatif de vol NSZ4311 « *four three one one* » sur celui du QNH « *one zero one one* » ;
- une musicalité similaire entre « *one zero zero one* » et « *one zero one one* », avec uniquement des « *one* » et des « *zero* » ;
- le dernier chiffre et donc la dernière sonorité « *one* » identique dans les deux cas.

Ce dernier point, la sonorité identique sur le dernier chiffre, pourrait être un des facteurs expliquant la fréquence élevée des erreurs de ± 10 hPa observées dans les événements similaires (voir § 1.18.1.2).

Par la nature de son travail, la fourniture du QNH par la contrôleuse a pu devenir une action de routine, et en l'absence de prise de conscience du rôle fondamental du QNH pour les approches barométriques (comme indiqué par de nombreux contrôleurs dans leurs témoignages), l'attention de la contrôleuse ITM n'a pas été particulièrement portée sur l'exactitude de cette information, à la fois lors de sa transmission et lors de l'écoute du collationnement.

Par la suite, le même QNH erroné a été transmis en anglais à deux reprises par la contrôleuse ITM :

- une deuxième fois au vol NSZ4311 lors de la clairance d'approche, car celle-ci comprenait une instruction d'altitude et que la contrôleuse d'approche ITM avait pour habitude d'assortir un QNH à une altitude ;
- à un équipage easyJet lors de la première clairance en altitude sous le niveau de transition. En revanche, cet équipage a collationné le QNH correct de 1 001 hPa, sans que cet écart soit relevé.

La contrôleur a ensuite redonné le QNH correct à un équipage d'Air France en employant le français et la locution « *mille un* ». Cet échange ne pouvait pas être compris par l'équipage du 9H-EMU qui ne parlait pas français. Néanmoins, les deux échanges suivants, réalisés en anglais et à destination de deux autres équipages avant que le vol NSZ4311 ne quitte la fréquence, comprenaient bien le QNH correct énoncé en anglais et auraient éventuellement pu permettre à l'équipage de détecter l'erreur.

Lors du passage avec le contrôleur tour et lors de la clairance d'atterrissage, conformément aux procédures opérationnelles en vigueur, aucune information de QNH n'a été transmise à l'équipage.

Lors de la remise de gaz et la seconde approche

Après l'annonce à la fréquence par le PM de la remise de gaz, le contrôleur tour (LOC) n'a pas demandé à l'équipage de réaliser la procédure publiée d'approche interrompue, préférant optimiser la trajectoire en l'absence de trafic conflictuel. Il lui a donné plusieurs instructions pendant environ 12 s, nécessitant le collationnement de cinq éléments : tourner à droite, cap 3 6 0, montée, 5 000 ft, QNH 1 0 0 1.

Le PM a collationné correctement quatre des cinq éléments, puis, sans doute par la combinaison d'un biais d'anticipation sur la valeur du QNH qui était déjà utilisée et d'une charge de travail élevée pendant la remise de gaz, il a incorrectement collationné le 5^e, à savoir le QNH « 1 0 1 1 », ce qui n'a pas été relevé par le contrôleur LOC. L'assistant contrôleur tour (Ass LOC) n'a probablement pas entendu le message du PM car il était en coordination téléphonique pour la remise de gaz.

Après les échanges liés à la remise de gaz, aucune information de QNH n'a été transmise à l'équipage jusqu'à son atterrissage. En effet, ni la clairance d'approche, ni le premier contact avec le contrôleur tour, ni la clairance d'atterrissage n'exigent un rappel du QNH. Cela a pu priver l'équipage de l'information lui permettant de détecter l'erreur de QNH. Il a réalisé une nouvelle fois son approche sur un plan de descente décalé vers le bas.

Procédures et réglementations

Les règles internationales sur la transmission des informations de calage altimétrique par les services de contrôle, lorsque l'aérodrome est équipé d'un ATIS (ce qui est la très grande majorité des cas en transport aérien commercial), demandent que celui-ci soit transmis à l'équipage au minimum à deux reprises (voir § 1.17.1.3.4) : via l'ATIS et lors de la première clairance en altitude en dessous du niveau de transition.

À partir du moment où l'information de calage altimétrique a déjà été transmise, il n'y a pas d'exigence d'un rappel de cette valeur. Aucune distinction n'est faite dans les exigences entre les approches barométriques et les autres approches.

2.2.3 Réception et insertion du QNH côté équipage

Le premier message de collationnement du PM de l'information de QNH erroné fait apparaître une certaine hésitation pour la valeur du QNH, qui est répétée : « *6,000 feet 1 0 1 1 ... 1 ... 0 1 1 ... Red Nose 4 3 1 1* ». Pour autant, il n'y a pas eu de levée de doute par demande de confirmation explicite de la valeur du QNH.

Le PM a mentionné qu'il avait tendance à faire confiance aux informations fournies par le contrôle. Il pensait que si lui-même avait commis une erreur, le contrôleur l'aurait corrigé.

L'équipage de l'easyJet qui avait également reçu l'information du QNH erroné, a quant à lui collationné la valeur correcte du QNH. La contrôleuse n'a pas relevé cette incohérence. Aucun lever de doute n'a été fait par l'équipage ou la contrôleuse alors qu'ils annonçaient chacun un QNH différent, cette différence n'ayant pas été identifiée.

Eurocontrol et les autres organismes impliqués dans la production d'un plan d'action européen sur la sécurité des communications (voir § 1.17.1.3.2) ont identifié qu'une absence de correction de la part du contrôleur pourrait être perçue implicitement par les équipages comme une confirmation du collationnement.

Par ailleurs, en France et généralement en Europe, le niveau de transition est relativement bas, entre 3 000 et 6 000 ft. Ainsi, l'information de calage altimétrique, transmise lors de la première clairance sous le niveau de transition, est très généralement donnée à l'équipage dans une phase d'approche à forte charge de travail et propice aux erreurs. De plus, en cas d'erreur de calage altimétrique et étant donné que l'avion est déjà relativement bas, cela laisse moins de temps et de possibilité aux pilotes et aux contrôleurs pour identifier et corriger l'erreur.

Insertion, vérification, confirmation du QNH

Les procédures de l'exploitant, basées sur celles du constructeur, demandaient à chaque pilote lors du passage du calage altimétrique du standard vers le QNH, d'insérer le QNH dans la chaîne altimétrique et de vérifier la valeur d'altitude avec l'autre pilote. Il n'était pas demandé de confirmer la valeur du QNH transmis avec la valeur d'une source extérieure (ATIS, METAR, dossier de vol, ACARS, confirmation ATC, etc.). Plusieurs procédures de plusieurs exploitants et de plusieurs constructeurs ont été analysées lors de l'enquête, et la plupart ne demandaient pas une confirmation du QNH inséré avec une source extérieure.

Les pilotes du 9H-EMU ont indiqué dans leurs témoignages qu'ils avaient pour habitude de confirmer la valeur du QNH avec leurs notes de l'ATIS, même si ce n'était pas demandé par les SOP, mais qu'en l'occurrence ils ne l'ont pas fait car ils n'avaient pas eu le temps, probablement en raison de la gestion de la situation météorologique dégradée et de son impact sur la charge de travail.

2.3 Conscience de la situation de l'équipage

2.3.1 Éléments confortant une conscience de la situation erronée

Plusieurs facteurs déjà évoqués précédemment peuvent expliquer que l'équipage avait une conscience de la situation erronée dans laquelle l'avion était en approche stabilisée sur un plan de descente nominal :

- l'absence de références visuelles extérieures ;
- l'absence de pré-affichage du QNH dans les chaînes altimétriques de l'avion lors de la prise d'ATIS (les systèmes n'étant pas prévu pour et les procédures ne le demandant pas) ;
- l'absence de confirmation de la valeur de QNH reçue lors de la clairance en altitude sous le niveau de transition avec une source extérieure (ATIS, METAR, QNH entré au FMS, etc.), les procédures ne le demandant pas ;
- les échanges avec le contrôle au cours de l'approche qui contenaient de nouveau l'information de QNH erroné et qui ont pu conforter l'équipage dans l'idée que le calage altimétrique utilisé était le bon.

De plus, la comparaison de la valeur du QNH ou de l'altitude entre les deux altimètres PF/PM demandée par les procédures est inefficace pour détecter une erreur de calage altimétrique commune aux deux altimètres.

Également, puisque l'information de calage altimétrique, pour les approches barométriques, sert à la fois pour le réglage des chaînes altimétriques et la génération par les systèmes de l'avion du plan de descente et des informations de guidage vertical (voir § 1.6.5), un calage altimétrique erroné ne fait pas apparaître d'anomalie susceptible d'attirer l'attention de l'équipage. En particulier, lors de la réalisation d'une approche stabilisée sur un plan de descente erroné, les barres de tendances des directeurs de vol (FD) restent centrées, l'indicateur de déviation verticale (V/DEV) reste à zéro, et les contrôles d'altitude-distance fournissent des valeurs égales à celles attendues et indiquées sur les cartes d'approches.

Ainsi, dans une phase de vol caractérisée par une charge de travail élevée, avec en particulier une répétition de contrôles d'altitude-distance cohérents, les instruments de l'avion et les procédures de vol ne permettaient pas aux membres d'équipage d'identifier une anomalie. Au contraire, ils confortaient l'équipage dans sa conscience erronée de la situation avec une approche stabilisée sur un plan de descente correct.

Par ailleurs, l'enveloppe de protection du TAWS installé à bord du 9H-EMU ne permettait pas de déclencher d'alerte pour l'équipage sur le risque imminent d'une collision sol (voir § 2.6).

2.3.2 Éléments favorables à la détection d'une incohérence de position verticale et difficultés de mise en œuvre

Informations visuelles des radio-altimètres

En l'absence de référence visuelle extérieure, le radio-altimètre était le seul moyen pour l'équipage d'identifier une incohérence sur la position verticale de l'avion. L'équipage pouvait comparer les valeurs de hauteur du radio-altimètre affichée sur le PFD sous diverses formes (voir § 1.6.3) avec l'altitude de l'aérodrome et l'altitude affichée, et éventuellement en déduire qu'il y avait une anomalie de position verticale.

Cependant, ces différents paramètres secondaires visent à donner une meilleure compréhension de la situation par l'équipage dans le contexte d'opérations CATII/CATIII et ne sont pas directement applicables dans le contexte de l'incident grave avec une approche LNAV/VNAV.

En pratique, ces éléments ne font généralement pas l'objet d'une surveillance spécifique de la part des pilotes à l'approche des minima et ils n'ont pas été conçus pour alerter les pilotes d'un positionnement vertical incorrect de l'avion dans une situation de forte charge de travail. Il n'est ainsi pas surprenant que l'équipage n'ait pas détecté ou tenu de compte de ces indices, car cette démarche n'est pas requise par les procédures et n'est généralement pas réalisée par les équipages. Elle nécessiterait de mobiliser des ressources cognitives complexes, difficiles à mettre en œuvre au cours de l'approche, phase avec une forte charge de travail à l'approche des minima. De plus, cette méthode ne peut être entièrement généralisée car elle ne peut fonctionner que si le relief est relativement plat et sans obstacle avant la piste.

On peut enfin noter qu'une vérification hauteur-distance à partir d'informations publiées dans les cartes aéronautiques aurait pu aider l'équipage à détecter une incohérence d'altitude. Cependant, aucune procédure ne prévoit ce type de contrôle. L'information de hauteur disponible sur la carte d'approche publiée dans l'AIP France n'est généralement pas reprise sur les cartes d'approches de la plupart des fournisseurs de carte (voir § 1.10.2) et ce type de contrôle n'est généralement pas réalisé par les pilotes.

Annonces sonores et surdité attentionnelle

L'approche a été réalisée sous une averse de pluie soutenue nécessitant le réglage des essuie-glaces sur la vitesse la plus élevée et occasionnant ainsi un bruit de niveau sonore élevé dans le cockpit.

Les membres d'équipage ont indiqué dans leur témoignage qu'ils n'avaient pas entendu le message du contrôleur aérien les informant du déclenchement d'une alerte de proximité avec le sol (MSAW) lors de la première approche. Cette communication a eu lieu au passage de l'altitude de décision, moment où la charge de travail de l'équipage était particulièrement élevée. Ceci peut expliquer que le message n'ait pas été perçu. De plus, la conscience de la situation erronée de l'équipage, associée à une phraséologie et un ton employé par le contrôleur ne permettant pas à l'équipage de saisir l'urgence de la situation, a pu favoriser l'absence de traitement cognitif de cette information par les pilotes.

Les pilotes ont également indiqué qu'ils n'ont pas entendu les annonces sonores des radio-altimètres autres que celles émises à 2 500 ft RA et 1 000 ft RA : 500 ft, 200 ft, 100 ft, 50 ft, 40 ft, 30 ft, 20 ft, 10 ft. Les annonces sonores auraient pu permettre à l'équipage d'identifier un positionnement incorrect de l'avion dans le plan vertical. Les tests réalisés sur les calculateurs de l'avion n'ont pas mis en évidence de dysfonctionnement dans leur déclenchement (voir à 1.6.4).

Ces annonces, émises à chaque atterrissage, ne sont pas des alertes et ne nécessitent normalement pas d'action de la part de l'équipage. Il est ainsi probable, dans le contexte de forte charge de travail où une part importante, voire la totalité, des ressources mentales des membres d'équipage étaient mobilisées sur des tâches liées à la gestion de l'approche, à la recherche visuelle de la piste dans des conditions de visibilité réduite, puis à l'exécution de la remise de gaz que les informations auditives transmises via les annonces sonores automatiques des radio-altimètres ont pu être considérées inconsciemment comme des « distracteurs », c'est-à-dire des informations non pertinentes pour la tâche en cours. Ce phénomène aussi appelé « surdité attentionnelle » survient préférentiellement en cas de surcharge de travail mental (Causse, Imbert, Giraudet, et al., 2016).

Il est à noter que la séquence des annonces sonores « FIFTY, FORTY, THIRTY, TWENTY, RETARD » est intervenue à partir de l'initiation de la remise de gaz à 52 ft RA, occasionnant une forte charge de travail pour l'équipage. Ceci a pu contribuer au fait que l'équipage n'a pas perçu ces annonces sonores.

Lors de la deuxième approche, l'annonce de l'alerte MSAW par le contrôleur tour avec le message « *I've just got a ... a terrain alert are you okay* » a cette fois été entendu par l'équipage qui n'en a pas compris la raison. De même, lors de la correction de trajectoire et de la visualisation du plan de descente incorrect au PAPI, il n'y a pas eu de questionnement sur la raison de cet écart. Ces éléments illustrent bien la difficulté rencontrée par l'équipage à remettre en cause la représentation de la situation erronée qu'il s'était constituée.

2.4 Analyse de l'activité des contrôleurs aériens

2.4.1 Une succession d'erreurs

Tout au long de la séquence de l'incident grave, des erreurs en particulier de communication, ont été observées à la fois au sol et à bord (voir   1.9.2) :

- les contrôleuses d'approche initiale (INI) et intermédiaire nord (ITM N) ont identifié et corrigé plusieurs collationnements incorrects du PM ;
- la contrôleuse ITM a transmis trois fois un QNH erroné ;

- le contrôleur LOC N a oublié d'allumer le balisage lumineux de la rampe d'approche pendant l'approche finale du NSZ4311 réalisée sous averse de pluie ;
- pendant la remise de gaz, le contrôleur tour (LOC N) n'a pas identifié le collationnement incorrect de l'équipage du QNH. Le contrôleur Ass LOC était quant à lui occupé par la coordination de la remise de gaz et n'a pas entendu le collationnement erroné ;
- un conflit entre un avion (en contact avec le contrôleur ITM S) et le vol NSZ4311 en branche vent arrière en contact avec la contrôleuse ITM N n'a pas été identifié suffisamment tôt par les deux contrôleurs et a mené au déclenchement du filet de sauvegarde (STCA, voir § 1.10.3.2) et l'emploi de la phraséologie d'urgence ;
- lors de la seconde approche, la contrôleuse ITM N, qui gérait en regroupement les positions ITM Nord et BA (Le Bourget et autres), a transmis à l'équipage du vol NSZ4311 la fréquence du Bourget à la place de celle de la tour Nord.

On voit ainsi que dans un contexte de fonctionnement normal en termes de trafic, d'armement, de conditions météorologiques et en l'absence de dysfonctionnement, un nombre important d'erreurs du contrôle aérien a été constaté sur une courte période. Ces diverses erreurs ont entraîné des conséquences plus ou moins importantes, même si certaines erreurs de communication de l'équipage ont été rattrapées par les services de contrôle.

L'étude des événements similaires (§ 1.18.1.2) montre que l'incident grave de CDG n'est pas un cas isolé en France, et qu'une partie non négligeable des événements de calage altimétrique ont pour origine une contribution des services du contrôle aérien, avec en particulier des erreurs de communication.

En plus de ces erreurs en conditions normales, les phraséologies d'urgence associées aux alertes MSAW n'ont pas été restituées correctement (voir § 2.5.2).

À la date de l'incident grave, le risque de quasi-collision avec le sol (quasi CFIT) était identifié parmi les événements indésirables de la cartographie des risques de la DSNA. Pour autant, la DSNA n'avait pas développé de grille d'analyse des événements « quasi CFIT » et n'avait pas mis en place localement ou nationalement un processus de gestion du risque de CFIT tel qu'attendu par un système de gestion de la sécurité et de la conformité, en particulier en s'appuyant sur l'analyse des événements de sécurité. La DSNA se privait ainsi d'une appréciation globale du risque CFIT au-delà de l'analyse ponctuelle de chaque événement et du possible dénombrement des événements « quasi CFIT » enregistrés dans sa base de données.

Par ailleurs, le recueil de données alimentant le système de gestion de sécurité de la DSNA était encore essentiellement réalisé à partir des seuls événements de sécurité (démarche réactive), et il n'y avait pas d'autres moyens ou méthodes mis en place à la DSNA pour permettre de mieux appréhender les signaux faibles, les menaces, les erreurs et les événements indésirables qui peuvent avoir un impact sur la sécurité dans un contexte opérationnel donné, et d'identifier les bonnes pratiques pour maintenir la sécurité (démarche proactive ou prédictive). À l'international, plusieurs prestataires de services de la navigation aérienne ont par exemple mis en place des observations sur position (voir § 1.17.1.4.2)

- **La mise en place des méthodes ou outils d'évaluation objective du travail sur position des contrôleurs aériens à des fins d'amélioration du système de gestion de la sécurité fait l'objet d'une recommandation de sécurité vers la DSNA (voir § 5.2.6).**

2.4.2 Surveillance de l'altitude par les contrôleurs aérien

Lors de la première approche, l'équipage n'a réalisé qu'un court palier d'environ 0,5 NM avant de commencer l'approche finale. La détection de l'erreur d'altitude était ainsi très difficile à partir de la visualisation radar à disposition des contrôleurs aériens (voir § 1.10.3.2) et en l'absence de système de surveillance de trajectoire d'approche (*Approach Path Monitor*, APM) permettant de prévenir le contrôleur que l'avion était sur un plan de descente incorrect.

En revanche, après la remise des gaz et à partir de la branche vent arrière pour se repositionner pour la seconde approche, environ sept minutes se sont écoulées pendant lesquelles l'avion était en palier à 5 000 ft.

La visualisation radar de CDG indiquait par défaut des niveaux de vol à partir des données du transpondeur mode C au calage altimétrique de 1 013 hPa, y compris en dessous du niveau de transition. Ainsi, pour une clairance à 5 000 ft, la valeur d'altitude au standard du vol NSZ4311 affichée pour les contrôleurs était « 051 » (l'équipage étant à 5 000 ft QNH 1 011), alors qu'elle aurait été de « 053 » ou « 054 » avec le QNH 1 001. Théoriquement, l'écart d'altitude était donc identifiable à partir de l'écran radar pendant ces sept minutes.

Les contrôleurs font toutefois rarement ce type de calcul du fait de la ressource cognitive à mobiliser lorsqu'il n'y a pas de stimuli les incitant à vérifier l'altitude exacte de l'avion. Cela est notamment le cas lorsque l'altitude est correctement collationnée et que l'aéronef est en palier à ± 300 ft de l'altitude autorisée.

Un affichage en altitude QNH pourrait faciliter l'identification de cet écart, en permettant une comparaison directe entre la valeur affichée et l'altitude autorisée : par exemple, la valeur affichée d'altitude « A047 » comparée à la valeur attendue « A050 » et l'altitude sélectionnée « @050 ». Cet affichage automatique de l'altitude QNH à la place des niveaux de vol en dessous du niveau de transition est recommandé par la DSN pour toutes les approches hors CDG. Cette exception à CDG est justifiée par le fait que le système de visualisation radar est une adaptation locale de celui d'un centre en route, traitant 100 % des vols en niveau de vol.

2.5 Système sol d'alerte de proximité du relief (msaw)

2.5.1 Paramétrage du système

Le système MSAW peut être une des dernières barrières de sécurité côté contrôle aérien pour la prévention des collisions avec le sol de type CFIT. À l'instar du système bord d'avertisseur de proximité du sol (TAWS), la logique de paramétrage de l'alerte MSAW est basée sur un compromis entre alertes pertinentes et fausses alertes.

Lors de la première approche, l'alerte MSAW s'est déclenchée tardivement alors que l'avion était à une hauteur sol de 239 ft RA, ne laissant que peu de temps pour prévenir une possible collision avec le relief. Lors de la deuxième approche, réalisée de manière quasi identique à la première et sur le même plan de descente erroné, l'alerte MSAW s'est déclenchée alors que l'avion était à une hauteur sol de 842 ft RA.

Les études du système MSAW effectuées avec la DSN ont montré que les trajectoires des deux approches étaient quasiment tangentes au Plan de Descente paramétré dans le système et servant de seuil de déclenchement en approche finale pour les avions passant sous ce plan (voir § 1.10.4.2). Ces trajectoires quasi-tangentes expliquent la différence de hauteur lors du déclenchement du

MSAW pour les deux approches, suivant à quel moment l'avion passait effectivement sous ce plan dans les données radar. Le système MSAW a donc fonctionné conformément aux spécifications.

Le réglage d'un système MSAW est délicat et nécessite de prendre en compte de nombreux paramètres notamment en approche finale. Il n'existe pour autant pas de spécification de performances opérationnelles minimales applicables aux filets de sauvegarde ATM et notamment les filets MSAW et APM, à l'instar de ce qui existe pour les TAWS par exemple.

Le système MSAW de CDG lors de l'incident était basé sur un paramétrage datant de 2009. Bien que des mises à jour aient été prévues depuis des années, des difficultés techniques et opérationnelles ont empêché le déploiement opérationnel. Ces mises à jour devaient permettre de limiter les fausses alertes et d'avoir des alertes plus pertinentes, notamment dans des conditions similaires à celles de l'incident grave. De plus, CDG est le seul site en France où le système MSAW utilise l'altitude avec un pas de quantification de 100 ft, alors que pour tous les autres sites équipés d'un système MSAW, le calcul est effectué avec un pas de quantification de 25 ft. Ce pas de quantification relativement élevé à CDG peut ainsi faire perdre de précieuses secondes dans le déclenchement d'une alerte MSAW.

2.5.2 Procédures et formation des contrôleurs

Procédures

Lors du déclenchement de l'alerte MSAW au cours de la première approche, le contrôleur tour a mis environ neuf secondes à réagir et à prévenir l'équipage de cette alerte. À la DSNA, le déclenchement du MSAW est basé sur une extrapolation de la trajectoire de l'avion. Or, la durée d'extrapolation fait l'hypothèse d'une transmission de l'information MSAW par le contrôleur à l'équipage dans les trois secondes suivant le déclenchement de l'alerte. L'hypothèse de durée de réaction des pilotes et de l'avion est quant à elle de dix-huit secondes.

Ainsi au cours de l'incident grave, le délai de réaction du contrôleur de neuf secondes entre le déclenchement de l'alerte et le début de son message n'a laissé que très peu de temps à l'équipage pour réagir. La hauteur de l'avion était de 239 ft RA lors du déclenchement du MSAW, de 122 ft RA lors du début du message du contrôleur aérien et de 50 ft RA à la fin du message.

Concernant la phraséologie employée, lors de la première approche, le message du contrôleur tour a été : « *Red Nose 4 3 1 1 I just had a ground proximity alert are you okay do you see the runway* » tandis que lors de la deuxième approche, le contrôleur tour qui était l'assistant contrôleur tour pendant la première approche a fait le message suivant : « *Red Nose 4 3 1 1 I've just got a ... a terrain alert are you okay* ». Il est possible que le contrôleur tour lors de la deuxième approche ait été influencé par le message du contrôleur tour de la première approche.

Dans les procédures du Manex de CDG, lorsque l'avion n'est pas en guidage radar, la phraséologie à employer est la suivante : « [Red Nose 4 3 1 1] *terrain alert check your altitude immediately QNH [1 0 0 1]* ».

Les deux messages transmis par les deux contrôleurs étaient donc incorrects et inadaptés car ils :

- ne laissent pas apparaître l'urgence de la situation avec l'absence d'utilisation du terme *immediately*. Par ailleurs, l'intonation de la voix des contrôleurs ne laissait pas apparaître de caractère d'urgence de la situation. Cela a pu contribuer à la non-perception du message par l'équipage ;

- ne permettaient pas à l'équipage de comprendre ce qu'il était attendu de lui « *are you okay* » ayant peu de signification pour un pilote. Cela a pu participer au fait que l'équipage n'a pas compris ni la raison ni le sens du message lors de la seconde approche ;
- ne contenaient pas l'information cruciale de la valeur du QNH qui aurait pu permettre à l'équipage de se rendre compte de l'erreur de calage altimétrique.

La clarté et la non-ambiguïté d'un message en réponse à une alerte MSAW sont d'autant plus important que la plupart des membres d'équipage ne connaissent ni le système MSAW ni la phraséologie associée ni ce qui est attendu d'eux dans cette situation, la plupart des exploitants aériens ne fournissant pas d'information ou de procédure associée à ce système.

L'enquête sur [l'incident grave de l'avion BOMBARDIER CL-600- \(CRJ-1000\) immatriculé F-HMLD survenu le 20 octobre 2021 à l'approche de Nantes-Atlantique \(44\)](#) avait déjà mis en évidence le besoin, au niveau des différents textes internationaux, de clarification de la phraséologie à employer dans le cadre d'une alerte MSAW avec la mention systématique de l'urgence de la situation et du QNH. Plusieurs recommandations de sécurité avaient été émises et étaient toujours en cours de traitement par l'OACI et l'AESA (voir § 1.17.1.3.6) en avril 2024.

Formation

Les contrôleurs de la DSNA se familiarisent avec le système MSAW en formation initiale à l'ENAC, notamment lors de sessions au simulateur. Lorsqu'un contrôleur est affecté dans un organisme disposant du système, il complète sa formation sur le système MSAW lors de sa formation en unité à son arrivée, puis en formation continue. La formation dans les organismes de la DSNA est gérée localement par chaque unité de formation et les modalités peuvent ainsi différer d'un organisme à l'autre.

À CDG, à l'arrivée d'un contrôleur, le plan de formation en unité (voir § 1.17.1.3.6) prévoit une formation théorique sur les filets de sauvegarde comprenant le système MSAW, auquel s'ajoute une séance de simulateur dont le scénario est choisi parmi un catalogue de trois simulations. Sur ces trois scénarios, un seul comprend le déclenchement d'une alerte MSAW. Le déclenchement est simplement joué par l'instructeur, le système logiciel ne permettant pas d'implémenter le MSAW en simulation.

En ce qui concerne la formation continue, le programme de compétence en unité comprend une partie théorique sur les filets de sauvegarde incluant le système MSAW. Il n'y a pas de formation pratique prévue concernant le MSAW.

Ainsi, un contrôleur qualifié de CDG peut de manière assez probable n'avoir jamais revu en pratique la réaction attendue à une alerte MSAW depuis sa formation initiale à l'ENAC.

Par ailleurs, différents contrôleurs de CDG ont indiqué dans leur témoignage qu'une alerte MSAW à CDG était rare et que la plupart du temps, si une alerte était déclenchée, il s'agissait d'un avion en fréquence avec le Bourget, Pontoise ou un autre organisme, et qu'il n'y avait ainsi pas d'action attendue de leur côté.

Ce manque de formation pratique à la réponse à apporter à une alerte MSAW a contribué à une réaction tardive et à l'utilisation d'une phraséologie incorrecte et inappropriée lors de l'incident grave.

L'étude de divers événements similaires en France a montré que l'utilisation d'une phraséologie MSAW incorrecte et inadaptée n'était pas un cas isolé, et qu'une absence de réaction de la part de contrôleurs aérien a été observé dans un certain nombre de cas.

- **La formation et l'entraînement récurrent des contrôleurs aériens leur garantissant la maîtrise de la procédure d'urgence relative à une alerte MSAW fait l'objet d'une recommandation de sécurité vers la DSNA (voir § 5.2.5).**

2.6 Système bord d'avertisseur de proximité du sol (taws)

Une alerte TAWS est une des dernières barrières pour éviter une collision avec le sol. Il est donc un élément essentiel de la sécurité aérienne. Comme indiqué au § 1.6.7, il n'y a pas eu de déclenchement d'alerte par le TAWS lors de l'incident grave, alors que la hauteur radio-altimètre minimale enregistrée et corrigée était de 6 ft et que l'avion était à environ 0,9 NM du seuil de piste. Le système a pourtant fonctionné correctement et conformément à ses spécifications.

En effet, l'avion était configuré pour l'atterrissage et le taux de descente était standard, ainsi aucune alerte ou alarme des modes basiques et réactifs du TAWS n'a été activée. De plus, l'alerte « GLIDE SLOPE » n'est pas disponible pour les approches barométriques. Enfin, puisque le mode prédictif d'alerte de descente prématurée (PDA) comporte une zone d'inhibition présente avant la piste afin d'éviter des alertes intempestives à chaque atterrissage, et comme la version logicielle de l'EGPWS était ancienne et n'utilisait pas le GNSS comme moyen de positionnement, aucune alerte n'a été générée, malgré la faible hauteur de l'avion.

Les conclusions d'Honeywell à la suite des simulations effectuées indiquent que dans les circonstances de l'incident grave, à savoir une approche sur un plan standard à 3° décalée vers le bas de 280 ft à cause d'une erreur de calage altimétrique de 10 hPa, un EGPWS équipé d'une version logicielle plus récente et qui utilise un positionnement GNSS, aurait généré une alerte caution « TOO LOW TERRAIN » à une hauteur sol d'environ 200 ft RA, soit environ 15 s avant le point le plus bas à 6 ft RA.

Même si les constructeurs d'aéronef et fabricants de TAWS ont incité les exploitants à mettre à jour les TAWS de leurs avions avec des standards plus récents et à utiliser un positionnement GNSS, les estimations d'Airbus et Boeing font état d'environ 1 600 avions en service encore équipés avec des EGPWS qui ne génèreraient pas d'alerte dans les circonstances de l'incident grave. Il est à noter que les réglementations internationales n'imposent pas de mise à jour des standards ou des versions TAWS. Pour des avions comme le 9H-EMU, la mise à jour du TAWS vers un standard plus récent peut nécessiter d'effectuer des opérations et/ou modifications pouvant engendrer des coûts significatifs.

En ce qui concerne les normes applicables en certification pour les TAWS, la revue des dernières exigences applicables à ces systèmes fait également apparaître que les spécifications de performances opérationnelles minimales (MOPS) pour le déclenchement d'une alerte de descente prématurée ne prennent actuellement pas en compte une approche sur un plan standard à 3° décalée vers le bas de 280 ft, décalage correspondant à une erreur de calage altimétrique de 10 hPa parmi les plus fréquentes.

- **La révision des spécifications de performances opérationnelles minimales (MOPS) applicables aux systèmes TAWS pour les alertes de descente prématurée (PDA) fait l'objet d'une recommandation de sécurité vers l'AESA (voir § 5.2.4).**

2.7 Systèmes sol et bord détectant une erreur de calage altimétrique

Systèmes sol

Des systèmes sol de détection d'une erreur de calage altimétrique existent (voir § 1.18.2) et sont implémentés dans certains pays comme au Royaume-Uni et aux Pays-Bas.

En Europe, il a été imposé aux exploitants de transport aérien commercial d'équiper leurs avions de capacités de surveillance renforcée en mode S enrichi (*Enhanced Surveillance, EHS*). Or les informations EHS contiennent l'information du calage altimétrique utilisée par l'équipage. Il est ainsi possible de comparer le calage altimétrique de l'avion avec le QNH réel et, en fonction, d'émettre une alerte à destination du contrôleur aérien pour qu'il prévienne l'équipage.

En revanche, côté prestataires de service de la navigation aérienne, ce type de système ne fait l'objet d'aucune exigence d'implémentation, de procédure ou de phraséologie associée.

- **L'implémentation au sein des organismes de contrôle de la circulation aérienne d'un système sol de détection d'une erreur de calage altimétrique, et la phraséologie associée pour les contrôleurs aériens, fait l'objet d'une recommandation de sécurité vers l'AESA (voir § 5.2.3).**

En France, aucun organisme en route, d'approche ou tour n'affiche l'information de calage altimétrique des avions ou transmet une alerte au contrôleur aérien en cas de différence avec le QNH local. Les centres en route reçoivent pourtant les transmissions Mode S EHS des aéronefs et, à Paris-Charles de Gaulle, le système de contrôle étant similaire à ceux des centres en route, les paramètres Mode S EHS sont également reçus. Pour l'ensemble de ces centres, seuls les paramètres transmis - niveau de vol sélectionné, cap instantané et vitesse indiquée - sont disponibles pour l'affichage sur l'écran du contrôleur. Le calage altimétrique des avions n'est toutefois pas traité par le système.

Systèmes bord

Des systèmes bord de détection de calage altimétrique erroné existent depuis plusieurs années (voir § 1.18.3). Ces systèmes restent actuellement marginalement déployés dans la flotte des avions commerciaux. Ils fonctionnent par comparaison de l'altitude barométrique avec d'autres paramètres comme l'altitude GNSS, la valeur des radio-altimètres et la base de données du relief pour fournir une alerte d'incohérence de calage altimétrique à l'équipage.

Une simulation dans des conditions similaires à l'incident grave, réalisée pour l'enquête, a montré que le système ALTSM step1 développé par Airbus et conçu à partir de la fonction CAM-BTA d'Honeywell, aurait permis de déclencher une alerte sonore « *Altimeter setting* » à environ 1 843 ft RA, soit 2 minutes et 22 secondes avant la hauteur radio-altimètre minimale atteinte lors de l'incident grave.

2.8 Prise en compte insuffisante de la menace d'un calage altimétrique erroné pour les approches satellitaires avec guidage vertical barométrique

L'incident du 9H-EMU illustre comment un accident impliquant un avion moderne, d'un exploitant européen, à l'approche d'un des plus grands aéroports du monde, en 2022, aurait pu résulter d'une simple erreur de calage altimétrique.

Le risque de collision avec le sol en lien avec la menace d'un calage altimétrique erroné pour les approches barométriques est connu quasiment depuis les débuts de l'aviation. L'utilisation majoritaire de procédures d'approche de non-précision et la quasi-absence de système de prévention des collisions avec le sol jusqu'aux années 70 ont donné lieu à un risque de CFIT élevé, entre autres dû aux erreurs de calage altimétrique, qui était toléré eu égard aux exigences globales du niveau de sécurité de l'époque.

Le développement important du transport aérien commercial au cours des décennies qui ont suivi a fortement augmenté les attentes sociétales à la fois sur le plan de la sécurité et de l'accessibilité aéroportuaire au regard des conditions météorologiques. Les installations ILS offrent un guidage latéral et vertical non sensible aux erreurs de calage altimétrique (l'altitude de décision aux minima reste cependant affectée) et offrent de plus une accessibilité accrue vis-à-vis des conditions météorologiques à l'aide de minima d'approche abaissés. Elles se sont ainsi fortement répandues et sont devenues un standard d'équipement dans le monde entier et le restent encore aujourd'hui.

Le développement à partir des années 90, des fonctions baro-VNAV (offrant un guidage latéral conventionnel ou satellitaire, et un guidage vertical barométrique basé sur le calage altimétrique) a permis de réaliser des descentes, puis des approches, puis dans les années 2000 des approches finales au travers de la navigation basée sur les performances (*Performance Based Navigation, PBN*) avec des minima proches de ceux des approches de précision de catégorie I.

Les approches baro-VNAV ont ainsi grandement participé et continuent de participer à l'amélioration de la sécurité, en permettant d'avoir un guidage vertical sur les approches de non-précision et sur les pistes sans équipement de radionavigation. Elles réduisent ainsi le risque de collision avec le sol.

Pour autant, la fonction baro-VNAV n'a pas été conçue comme un système autonome d'approche et d'atterrissage, contrairement aux systèmes d'approches de précision tels que l'ILS, ou les approches utilisant des systèmes de renforcement du positionnement GNSS (GBAS ou SBAS, voir § 1.8.1.2.3). Le guidage vertical d'une approche baro-VNAV repose uniquement sur des données internes à l'avion et notamment l'altitude barométrique qui dépend du calage altimétrique. Or ce dernier nécessite potentiellement de multiples interventions humaines sujettes à l'erreur (par les services météorologiques, les contrôleurs aériens et les pilotes).

Les procédures d'approche qui utilisent la fonction baro-VNAV et qui permettent d'avoir les minima les plus bas sont les procédures PBN de type RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV. Elles permettent d'avoir une hauteur de décision pouvant descendre jusqu'à 250 ft, proche des minima d'une approche ILS de catégorie I à 200 ft. Or, une des erreurs de calage altimétrique les plus fréquentes est une erreur de 10 hPa. Cette dernière entraîne un décalage de l'altitude et donc du plan de descente de 280 ft par rapport au plan théorique, pouvant finalement conduire à une collision avec le sol avant que l'altitude de décision n'ait été affichée à l'équipage.

Il est de plus à noter que la méthode de calcul des hauteurs de décision des RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV dans la conception des procédures, notamment au travers de la marge de franchissement des obstacles dans les PANS-OPS de l'OACI, a été révisée en 2004 pour permettre une plus grande accessibilité des aéroports et aboutit à des altitudes de décision plus faibles. Les menaces inhérentes à la fonction baro-VNAV, comme un calage altimétrique erroné par exemple, n'ont pas été prises en compte dans cette évolution qui n'a pas donné lieu à une étude de sécurité.

Le risque de CFIT lié à la menace d'une erreur de calage altimétrique pour les approches barométriques et notamment baro-VNAV, bien que connu depuis des décennies, a été insuffisamment pris en compte par l'ensemble de la communauté aéronautique internationale. À la lumière de cet incident grave et des nombreux événements similaires de calage altimétrique erroné, on peut juger que l'hypothèse selon laquelle la formation, les procédures et les systèmes actuels suffisent à limiter ce risque est incorrecte. En effet, ni la conception de ces procédures IFR, ni leur réalisation par les équipages, ni les procédures des contrôleurs aériens et ni les systèmes bord ou sol ne sont suffisamment robustes pour faire systématiquement face à cette menace. Ce risque a probablement été insuffisamment pris en compte par l'ensemble de la communauté aéronautique dans les différentes analyses de risque, du fait notamment que la majorité des approches réalisées en transport aérien commercial sont effectuées depuis plusieurs décennies au travers des approches de précision ILS dont le plan de descente n'est pas sensible à l'erreur de calage altimétrique, masquant ainsi ces erreurs et leurs conséquences.

Il est également à noter que les analyses de risques sur les approches baro-VNAV réalisées aux États-Unis peuvent différer sensiblement de celles d'autres parties du monde et de l'Europe notamment où l'organisation des espaces aériens peut être différente. En effet, sont utilisés aux États-Unis : un calage altimétrique en inHg, un niveau de transition au FL 180, et l'anglais comme langue maternelle pour les contrôleurs aériens par exemple. Les comparaisons peuvent ainsi être inappropriées et les discussions à l'échelle internationale doivent tenir compte de ces différences.

Dans un contexte de recours accru à des approches satellitaires avec guidage vertical barométrique, la menace d'un calage altimétrique incorrect, bien que connue depuis des décennies, devient prépondérante et le risque associé pour le transport aérien commercial inacceptable vis-à-vis des exigences globales de sécurité d'aujourd'hui, beaucoup plus élevées qu'au siècle dernier.

- **La réévaluation de manière globale du risque de CFIT et des mesures d'atténuation associées, en lien avec la menace d'un calage altimétrique erroné pour les procédures d'approche baro-VNAV, fait l'objet d'une recommandation de sécurité vers l'OACI (voir § 5.2.1).**

2.9 Évaluation des impacts sur la sécurité liés aux changements induits par le règlement IR-PBN

Le [règlement \(UE\) 2018/1048](#), dit « IR-PBN »⁸⁵, requiert notamment que :

- les États membres publient d'ici le 25 janvier 2024 des procédures RNP APCH avec des minima LNAV, LNAV/VNAV ou LPV à toutes les extrémités de pistes aux instruments ;
- les prestataires de services de la navigation aérienne, aient un usage exclusif de la PBN jusqu'aux opérations d'approches de précision CAT I incluses d'ici le 6 juin 2030, et donc qu'ils n'utilisent plus les procédures de navigation conventionnelle, y compris les ILS, à partir de cette date sauf mesures d'urgence (en cas d'indisponibilité du signal GNSS par exemple).

L'OACI demandait aux États d'accélérer le déploiement de la PBN, mais n'a pour autant jamais exigé ou promu un usage exclusif de la PBN. L'introduction de l'exigence d'un usage exclusif de la PBN dans le règlement IR-PBN a été réalisée à la toute fin du processus réglementaire, et n'a pas donné lieu à une évaluation spécifique de son impact sur la sécurité avant l'adoption du règlement. En

⁸⁵ Règlement d'exécution de la Commission du 18 juillet 2018 fixant des exigences pour l'utilisation de l'espace aérien et des procédures d'exploitation concernant la navigation fondée sur les performances ([Version en vigueur le jour de l'incident grave](#)).

particulier, il n'y a eu ni évaluation de l'impact d'un passage d'opérations aériennes commerciales majoritairement réalisées par des approches IFR basées sur des ILS, à des opérations aériennes commerciales réalisées uniquement par des approches PBN (hors opérations CAT II/III), ni définition de critères pour ajuster cette disposition dans le cas où le développement d'alternatives à la baro-VNAV (LPV ou GBAS par exemple) ne serait pas celui attendu à l'horizon 2030. Une des suppositions, également un objectif, était que les exploitants allaient moderniser leurs flottes et s'équiper en capacité à réaliser des procédures RNP APCH avec des minima LPV, seule procédure PBN offrant un niveau de sécurité et d'accessibilité comparable aux approches de précision ILS CAT I.

Or, et comme vu au § 1.8.4, le développement des capacités LPV n'est qu'à ses débuts en transport aérien commercial. Par exemple, fin 2022, moins de 500 avions Airbus sur une flotte de plus de 10 000 étaient équipés pour pouvoir réaliser des procédures RNP APCH avec des minima LPV, et à la date d'écriture de ce rapport, aucun aéronef Boeing n'est certifié pour pouvoir réaliser ces opérations. Suivant le type avion, le coût du rétrofit pour obtenir cette capacité peut être significatif. Il n'y a enfin aucune exigence prévue pour imposer cette capacité dans les années à venir.

Les procédures d'approche GBAS sont exclues du champ d'application du règlement [IR-PBN](#) et seront donc toujours permises après le 6 juin 2030. Cependant, le taux d'équipement des avions en mesure de réaliser ce type d'approche, bien que supérieur au taux d'équipements des avions pour la LPV, reste actuellement faible, et surtout, seuls quelques aérodromes en Europe disposent des infrastructures nécessaires à la réalisation des approches GBAS et ainsi très peu de procédures GLS (*GBAS landing system*) sont publiées.

Les constats réalisés à l'occasion de cette enquête laissent entrevoir, en l'absence d'inflexion franche en Europe d'ici 2030, une régression substantielle du niveau de sécurité en approche, en raison du transfert d'une partie non négligeable des approches actuellement réalisées en ILS vers des approches baro-VNAV d'un niveau de sécurité inférieur, en l'absence d'un déploiement suffisant de la capacité LPV. Or, dans la PBN, celle-ci est la seule à permettre la réalisation d'approches de précision CAT I de niveau de sécurité équivalent aux ILS ou aux GLS et dont le plan de descente n'est pas sensible à l'erreur de calage altimétrique.

Un changement des orientations politiques de la Commission européenne en matière d'usage exclusif de la PBN, par exemple sous la forme d'un amendement du règlement [IR-PBN](#), ou l'instauration de mesures incitatives beaucoup plus fortes pour améliorer les équipements côté bord semble aujourd'hui nécessaire pour maintenir le niveau de sécurité des opérations d'approche en Europe, y compris si des mesures correctives sont prises en lien avec les points vus précédemment.

- **La réévaluation des risques associés aux changements induits par l'IR-PBN et notamment liés à l'utilisation d'un calage altimétrique erroné au cours d'une approche barométrique fait l'objet d'une recommandation de sécurité vers la Commission européenne (voir § 5.2.2).**

3 CONCLUSIONS

3.1 Faits établis par l'enquête

Contexte du vol de l'incident grave

- L'avion ne présentait pas de défaut technique en lien avec l'incident grave.
- L'équipage détenait les licences et qualifications nécessaires pour effectuer le vol.
- Les contrôleurs aériens détenaient les qualifications nécessaires pour exercer leurs fonctions.
- L'enregistreur phonique CVR n'a pas été préservé à la suite de l'incident grave.
- La situation météorologique sur l'aéroport Paris-Charles de Gaulle lors de l'incident grave comportait des conditions dépressionnaires avec la présence de nuages convectifs à fort développement vertical de type Cumulonimbus (Cb) ainsi que le passage d'averses de pluie.
- L'équipage a indiqué avoir volé en IMC et sans références visuelles extérieures jusqu'aux minima lors de la première approche.
- Le contrôleur tour avait allumé le balisage lumineux de la piste. Il avait en revanche oublié d'allumer celui de la rampe d'approche lors de la première approche.
- L'indicatif de vol de l'avion était NSZ4311.
- Le QNH local en vigueur était de 1 001 hPa. Ce QNH était automatiquement transmis depuis les services de Météo-France vers les systèmes ATM de CDG (ATIS, MSAW, écran radar, etc.).
- L'ILS de la piste 27R de CDG était hors-service depuis plusieurs jours pour travaux de remplacement des antennes ILS, et des approches PBN étaient proposées en remplacement.
- L'avion n'était pas équipé pour réaliser des approches PBN de type RNP APCH avec des minima LPV. L'équipage a réalisé une approche barométrique PBN de type RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV.
- Les procédures de l'exploitant demandaient d'ajouter 50 ft à l'altitude de décision pour toutes les approches n'étant pas des approches de précision, y compris les procédures RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV.

Approches barométriques et erreurs de calage altimétrique

- Les approches de non-précision (NPA, réalisées à partir de VOR, NDB, LOC, LNAV, etc.), et les approches avec guidage vertical barométrique (APV baro-VNAV ou RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV) sont appelées « approches barométriques » car le plan de descente de l'avion dépend du calage altimétrique utilisé.
- Sur les approches barométriques, une erreur de calage altimétrique entraîne un décalage de l'altitude réelle et par conséquent du plan de descente réel, par rapport à l'altitude et le plan de descente conçu et publié pour éviter le relief et les obstacles.
- Proche du niveau de la mer, une erreur de 10 hPa sur le calage altimétrique, erreur parmi les plus fréquentes, entraîne un décalage d'altitude d'environ 280 ft ou 85 m.
- Les procédures RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV sont les approches barométriques avec les minima les plus bas. La hauteur de décision peut descendre jusqu'à 250 ft.
- Une étude de Météo-France a montré que sur 30 minutes, le QNH ne varie que de 0 ou 1 hPa dans 99,77 % des cas.

Déroulement du vol de l'incident grave

Approche initiale et intermédiaire :

- Avant la descente, l'équipage a effectué un briefing pour la procédure RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV après avoir consulté l'ATIS Q mentionnant un QNH de 1 001 hPa.
- Lors de la première clairance en altitude en dessous du niveau de transition, la contrôleuse aérienne d'approche intermédiaire (ITM) a donné par erreur à l'équipage du vol NSZ4311 un QNH de 1 011 hPa au lieu de 1 001 hPa.
- L'équipage a collationné ce QNH erroné puis l'a utilisé comme référence pour le calage altimétrique des chaînes altimétriques de l'avion. Il n'y a pas eu de confirmation de la valeur du QNH par rapport à une autre source d'information telle que l'ATIS, le METAR ou le QNH entré dans le FMS par exemple. Aucune procédure opérationnelle ne demandait à l'équipage de réaliser cette confirmation.
- L'avion ne disposait pas d'un système permettant de détecter et d'alerter l'équipage en cas de calage altimétrique erroné. Les exigences de certification, y compris les plus récentes, n'imposent pas de tels systèmes à bord des avions.
- Le calage altimétrique, au travers du BPS (*Barometric Pressure Setting*), fait partie des données diffusées au travers des capacités de surveillance renforcée en mode S enrichi (*Enhanced Surveillance*, EHS) ou de l'ADS-B. Ce paramètre est donc automatiquement diffusé par la quasi-totalité des avions exploités en transport aérien commercial en Europe. La comparaison du BPS avec le QNH local peut permettre aux services de contrôle de détecter un calage altimétrique erroné.
- Les services du contrôle aérien de CDG ne disposaient pas d'un système permettant de détecter et d'alerter le contrôleur en cas de calage altimétrique erroné. Aucune approche ou tour en France ne dispose d'un tel système. La réglementation européenne n'impose pas de tels systèmes pour les prestataires de services de la navigation aérienne.
- Avec une erreur de + 10 hPa sur le calage altimétrique, l'avion a évolué environ 280 ft plus bas que prévu sur l'ensemble de l'approche sans que ni l'équipage ni les contrôleurs aériens s'en aperçoivent.
- Environ deux minutes après la transmission du premier QNH erroné à l'équipage, la contrôleuse ITM leur a de nouveau fourni le QNH erroné de 1 011 hPa au lieu de 1 001 hPa au cours d'une clairance de descente.
- Le QNH erroné de 1 011 hPa a de nouveau été collationné par l'équipage.

1^{re} approche finale :

- Lors du premier contact radio avec le contrôleur tour du doublet nord (LOC N), celui-ci a autorisé l'équipage à l'atterrissage. Conformément aux procédures opérationnelles, l'information du QNH n'a pas été fournie.
- La réglementation internationale sur les communications radio exige une fourniture du QNH dans le message de l'ATIS (lorsqu'il est fourni) et lors de la première clairance en altitude en dessous du niveau de transition. Aucun autre rappel du QNH n'est exigé à partir du moment où celui-ci a été fourni précédemment, quel que soit le type de procédure d'approche effectuée, y compris en cas d'approche barométrique.
- L'équipage a effectué les contrôles d'altitude-distance pour chaque point de la carte d'approche, conformément aux procédures, sans remarquer d'anomalie particulière : en cas de calage altimétrique incorrect, les contrôles d'altitude-distance ne permettent pas de détecter ce type d'incohérence.
- Les instruments à la disposition de l'équipage ne permettaient pas d'identifier l'erreur de calage altimétrique et le plan de descente incorrect. Ils ont à l'inverse plutôt conforté l'équipage dans l'idée qu'ils étaient sur le bon plan de descente.

- Pour l'équipage, l'approche était réalisée de manière stabilisée en altitude, axe, vitesse, vitesse verticale et configuration. Elle a été réalisée en mode FINAL APP et sous pilote automatique.
- L'approche finale a été réalisée par l'équipage sous forte charge de travail, sans références visuelles extérieures, sans que le balisage lumineux de la rampe d'approche soit allumé et sous une averse de pluie nécessitant de régler les essuie-glaces sur la position de vitesse la plus élevée.

Quasi-collision avec le sol et remise de gaz :

- À 239 ft de hauteur radio-altimètres (RA) et à 1,5 NM du seuil de piste 27R, l'alerte d'avertissement de proximité du sol (MSAW) des systèmes du contrôle aérien s'est déclenchée pour le vol NSZ4311.
- Environ neuf secondes plus tard à 122 ft RA, le contrôleur LOC N a réagi à l'alerte MSAW avec une phraséologie incorrecte et inadaptée : sans mentionner l'urgence de la situation ni le QNH. Le temps de réaction prévu d'un contrôleur aérien dans la conception du système MSAW en réponse à une alerte est de trois secondes. L'équipage a indiqué dans son témoignage ne pas avoir entendu ce message.
- Plusieurs événements similaires à CDG et sur d'autres aéroports français montrent que la phraséologie d'urgence en cas d'alerte MSAW n'est pas systématiquement employée. L'enquête a mis en évidence que la procédure MSAW n'était pas systématiquement revue en pratique en formation continue par les contrôleurs de la DSNA.
- À 52 ft RA, six secondes après avoir franchi l'altitude de décision affichée à l'équipage et alors que l'altitude réelle était décalée d'environ 280 ft vers le bas, le CDB a débuté une remise de gaz. L'équipage a indiqué dans son témoignage avoir remis les gaz aux minima car il n'avait pas acquis de références visuelles extérieures.
- Au cours de la manœuvre, la hauteur radio-altimètre minimale enregistrée et corrigée était de 6 ft, soit environ 2 m, alors que l'avion était à environ 0,9 NM du seuil de piste, en dehors des limites de l'aéroport Paris-Charles de Gaulle.
- Aucune alerte ou alarme bord de proximité du sol n'a été enregistrée lors de l'approche par le système TAWS de l'avion. Le TAWS a fonctionné correctement et conformément aux spécifications du système.
- Les exigences de certification, y compris les plus récentes, n'imposent pas une alerte TAWS dans les conditions de l'incident grave, à savoir un plan de descente standard décalé vers le bas d'environ 280 ft.

Remise de gaz et 2^e approche :

- En réponse à l'annonce de remise de gaz de l'équipage, le contrôleur LOC N a fourni des instructions de guidage radar contenant cinq éléments à collationner, dont la valeur correcte du QNH à 1 001 hPa. L'équipage a collationné correctement quatre des cinq éléments, il a cependant collationné la valeur du QNH erroné de 1 011 hPa sans que cela soit relevé par le contrôleur LOC N.
- Le contrôleur LOC N s'est fait relever par l'Ass LOC N et un autre Ass LOC s'est installé.
- Aucune information de QNH n'a par la suite été transmise à l'équipage jusqu'à la fin du vol.
- L'équipage a été autorisé à effectuer une deuxième approche RNP sur la piste 27R. Le calage altimétrique n'a pas été modifié et le plan de descente a été de nouveau décalé vers le bas d'environ 280 ft. La rampe d'approche était cette fois-ci allumée.

- Une nouvelle alerte MSAW s'est déclenchée lors de l'approche. Bien que la deuxième approche ait été réalisée de manière quasi identique à la première, l'alerte MSAW s'est déclenchée à une hauteur sol plus élevée, à 842 ft RA à 3,1 NM du seuil de piste.
- Environ quatre secondes plus tard, le contrôleur LOC N (précédemment Ass LOC N), a réagi à l'alerte MSAW avec une phraséologie incorrecte et inadaptée qui ne mentionnait ni l'urgence de la situation ni le QNH.
- L'équipage a annoncé voir la piste, a corrigé la trajectoire et a atterri sans autre incident.

3.2 Facteurs contributifs

La quasi-collision avec le sol du 9H-EMU résulte de la réalisation d'une approche barométrique avec un calage altimétrique (QNH) erroné de +10 hPa, sous une averse de pluie et sans références visuelles extérieures.

Le calage altimétrique est un point de vulnérabilité important pour les approches barométriques qui affecte l'altitude de l'avion et de ce fait le profil de descente et la position verticale de l'avion tout au long de la trajectoire, y compris aux minima.

L'approche a ainsi été réalisée sur un plan de descente décalé vers le bas d'environ 280 ft, jusqu'à une hauteur radio-altimètre minimale enregistrée et corrigée à 6 ft, soit environ 2 m, alors que l'avion était à environ 0,9 NM du seuil de piste, sans que l'équipage en ait conscience.

Ont contribué à la réalisation de deux approches barométriques avec un calage altimétrique erroné :

- une erreur humaine dans les échanges de communication du QNH, dont la probabilité ne pourra jamais être réduite à zéro ;
- des procédures opérationnelles pour les équipages et les contrôleurs aériens peu robustes, voire inefficaces face à cette menace ;
- des systèmes bord et sol peu robustes, voire inefficaces face à cette menace.

Ont contribué à la descente de l'avion jusqu'à une quasi-collision avec le sol (quasi CFIT) :

- l'absence d'allumage du balisage lumineux d'approche ;
- l'absence d'alerte bord de proximité avec le sol, bien que le système TAWS ait fonctionné conformément à ses spécifications ;
- un déclenchement tardif du système sol d'alerte de proximité du relief MSAW, bien que le système ait fonctionné conformément à ses spécifications ;
- une réaction tardive et inadéquate du contrôleur aérien au déclenchement de cette alerte MSAW, la formation insuffisante des contrôleurs sur les actions à réaliser en réponse à cette alerte ayant contribué à cette réaction inadaptée.

Le risque de CFIT lié à une erreur de calage altimétrique au cours d'une approche barométrique est connu depuis des décennies. L'utilisation généralisée des approches ILS a toutefois probablement contribué à masquer durablement cette menace et ses conséquences. Plus récemment, les approches satellitaires avec guidage vertical barométrique ont été promues pour augmenter le niveau de sécurité là où il n'existait que des approches de non-précision. En revanche, l'utilisation accrue de ces approches satellitaires avec guidage vertical barométrique, notamment en remplacement des approches ILS, n'a pas amené la communauté aéronautique à questionner l'impact sur le niveau de sécurité, alors même que les exigences globales de sécurité sont toujours plus élevées.

3.3 Enseignements de sécurité

Ces enseignements de sécurité visent particulièrement les exploitants aériens et les prestataires de services de la navigation aérienne face au risque de collision avec le sol (CFIT) en lien avec la menace d'un calage altimétrique erroné. Ces enseignements, principalement opérationnels, ne font pas l'objet de recommandation de sécurité de la part du BEA au vu des mesures prises par les acteurs impliqués dans l'incident grave (voir § 4), et du fait que le BEA a privilégié des recommandations à plus long terme sur les systèmes, plus robustes à l'erreur.

Constructeurs d'aéronefs et exploitants aériens

À la date de l'incident grave, les procédures opérationnelles de l'équipage ne soulignaient pas particulièrement l'importance du calage altimétrique et le risque de CFIT en cas de calage erroné. Les nombreux événements similaires montrent également que cet incident grave n'est pas un cas isolé et que les équipages réalisent relativement fréquemment des approches avec un calage altimétrique erroné sans s'en rendre compte. Une grande partie de ces événements sont survenus lors d'approches ILS, non sensibles à l'erreur de QNH (excepté l'impact sur l'altitude de décision), ils n'ont donc pas donné lieu à des incidents significatifs. À l'inverse, plusieurs incidents significatifs voire incidents graves ou accidents ont eu lieu sur des approches barométriques.

À la suite de l'incident du 9H-EMU et au cours de l'enquête, le constructeur d'avions et l'exploitant aérien ont modifié leurs procédures pour corriger ces différents points soulevés par l'enquête. Pour autant, ces modifications sont généralement aussi applicables aux autres exploitants et aux avions d'autres constructeurs.

Afin de limiter les erreurs de calage altimétrique, les procédures des équipages des exploitants aériens concernant les approches barométriques pourraient évoluer dans le sens de :

- rappeler l'importance du calage altimétrique et les risques pour la sécurité en cas de calage erroné commun aux altimètres ;
- prévenir l'insertion d'un calage altimétrique erroné commun aux altimètres, avec par exemple :
 - un pré-affichage du calage altimétrique sur les altimètres principaux ou celui de secours, lors de la préparation de l'approche après la réception des informations de l'ATIS notamment,
 - une confirmation du calage altimétrique avec une source extérieure (ex : ATIS, METAR, FMS, confirmation auprès du contrôle aérien, etc.) lors du changement de référence barométrique en approche,
- alléger autant que possible la charge de travail de l'équipage en approche finale, notamment en limitant les contrôles d'altitude-distance aux points opportuns (par exemple au repère d'approche finale (*Final Approach Fix*, FAF) et aux repères de descente (*Step Down Fix*, SDF).

En complément, la mise en place par les exploitants aériens, dans le cadre de leur programme d'analyse des vols, d'une requête systémique des cas de calage altimétrique erroné permettrait de mieux prendre en compte cette menace.

Une mise à jour par les exploitants aériens des TAWS de leurs aéronefs vers les standards les plus récents permettrait d'avoir une protection accrue face au risque de CFIT. De plus, l'utilisation d'une source de positionnement GNSS pour le TAWS offrirait des enveloppes de protection plus performantes en termes de sécurité.

Prestataires de service de la navigation aérienne

À la date de l'incident grave, les procédures opérationnelles des contrôleurs aériens, en accord avec les réglementations internationales, demandaient aux services de contrôle la fourniture du calage altimétrique à un équipage en descente à deux reprises uniquement. Cela était principalement réalisé lors de la prise de l'ATIS par l'équipage, puis lors de la première clairance d'altitude sous le niveau de transition.

Au cours de l'incident du 9H-EMU, après les échanges concernant la remise de gaz et jusqu'à l'atterrissage de l'avion, aucune transmission de l'information de calage altimétrique n'a été redonnée à l'équipage, et ce en conformité avec les procédures opérationnelles et la réglementation. La seconde approche a donc été réalisée de nouveau avec un calage altimétrique erroné.

Les exigences réglementaires internationales actuelles en matière de transmission du calage altimétrique ne contiennent pas de procédures particulières d'une transmission supplémentaire du calage altimétrique pour les approches barométriques.

Les nombreux événements similaires montrent que cet incident grave n'est pas un cas isolé et qu'il arrive relativement fréquemment que les équipages réalisent des approches avec un calage altimétrique erroné sans s'en rendre compte.

À la suite de l'incident, la DSNA a fait évoluer nationalement les procédures opérationnelles des contrôleurs aériens pour demander une troisième transmission du calage altimétrique, lors du premier contact avec le contrôleur tour pour les approches barométriques (voir § 4.2).

Afin de limiter les erreurs de calage altimétrique, les procédures opérationnelles des contrôleurs aériens des prestataires de service de la navigation aérienne pourraient, pour les approches barométriques, prévoir une nouvelle transmission aux équipages du calage altimétrique, en complément de celui déjà fourni par l'ATIS ainsi que lors de la première clairance en altitude sous le niveau de transition. Cette nouvelle transmission pourrait par exemple être effectuée au premier contact avec la tour.

4 MESURES DE SÉCURITÉ PRISES DEPUIS L'INCIDENT GRAVE

4.1 Airhub airlines

À la suite de l'incident grave et au cours de l'enquête, l'exploitant a rapidement procédé à :

- une communication sur l'incident grave à destination de ses pilotes pour rappeler :
 - les références des procédures utilisant le mode FINAL APP,
 - l'importance du QNH pour les approches RNP et le besoin d'en confirmer la valeur lors de la descente,
 - de surveiller les annonces automatiques sonores (*auto-callouts*, ACO) et de garder le radio-altimètre dans le circuit visuel,
- la mise en place d'une procédure d'analyse des vols afin d'identifier par la suite les événements de calage altimétrique erroné ;
- la mise à jour de l'ensemble de ses procédures d'approche afin de demander aux pilotes, au plus tard au niveau de transition, de confirmer le QNH avec le dernier ATIS ou METAR.

4.2 DSNA

À la suite de l'incident grave et au cours de l'enquête, la DSNA a rapidement procédé à :

- un rappel à l'ensemble des contrôleurs aériens tours et approches de l'importance du QNH et de son bon collationnement, notamment pour les approches barométriques ;
- la publication d'une consigne nationale temporaire demandant l'ajout d'un rappel du QNH par le contrôleur tour au premier contact lors des approches RNP. L'organisme de CDG a également demandé de transmettre le QNH lors de la clairance d'approche RNP ;
- la publication d'une consigne nationale temporaire demandant la réalisation systématique d'une remise de gaz en cas d'alerte MSAW lors d'une approche RNP.

Par la suite et toujours au cours de l'enquête, la DSNA a procédé à :

- une campagne de communication interne sur l'incident grave, notamment au travers d'une vidéo de sécurité fin 2022 illustrant les différents types de procédures RNP et les conséquences d'une erreur de calage barométrique ;
- la mise en place d'un module de formation complémentaire obligatoire sur les approches RNP pour les contrôleurs aériens tour et approches fin 2022 ;
- la mise en place d'un plan d'action sur les thématiques suivantes :
 - *formation*, avec notamment une réflexion sur la définition d'une stratégie nationale de formation initiale et continue des contrôleurs aériens sur la PBN et les RNP,
 - *méthodes de travail*, avec notamment :
 - la pérennisation du rappel du QNH au premier contact avec le contrôleur tour pour toutes les approches exceptées les ILS et les RNP/LPV (lorsqu'il est possible de distinguer uniquement des minima LPV sur une procédure LPV). La possibilité d'étendre ce principe à l'ensemble des procédures d'approche aux instruments est donnée dans un souci d'harmonisation des procédures si cela est jugé nécessaire. Cela a été accompagné d'un retour d'expérience national dédié,
 - le retour à une phraséologie MSAW « standard » telle que définie dans le SERA et les documents OACI,
 - l'abrogation de la remise de gaz systématique avec une mise à jour des consignes opérationnelles MSAW afin d'avoir comme unique référence de procédure le manuel de phraséologie (également mis à jour),

- *outils*, avec notamment l'étude de l'utilisation de système sol de détection d'une erreur de calage altimétrique et l'étude de système de surveillance de la trajectoire d'approche de type *Approach Path Monitor* (APM),
- *suivi sécurité*, avec notamment :
 - un suivi particulier sur le risque de CFIT,
 - l'étude d'un programme d'analyse des données radar pour évaluer la faisabilité de mesurer et de quantifier les situations d'écart entre le réglage bord du QNH via le BPS et le QNH sol, dans le but de déterminer les risques associés,
 - la participation au programme [Data4Safety](#) de l'AESA ;
- *analyse des risques*, avec notamment la mise en place d'un système de gestion des risques fondé sur un modèle présentant les barrières de sécurité,
- la revue des paramétrages des systèmes MSAW sur les différents aéroports français. À CDG, la DSN travaille sur un paramétrage V8, en évaluation depuis octobre 2023 et dont la mise en service est prévue à l'été 2024. À CDG également, le MSAW a été intégré dans le système logiciel de simulation pour la formation ;
- la participation à différentes réunions internationales, notamment pour pousser à une standardisation internationale des différentes mesures de sécurité en lien avec la menace d'un calage altimétrique erronée pour les approches baro-VNAV.

4.3 Airbus

À la suite de l'incident grave et au cours de l'enquête, Airbus a pris les mesures suivantes :

- mise à jour fin 2022 des procédures opérationnelles de descente dans le FCOM, applicables à toutes les flottes, pour mettre en avant la menace d'un calage altimétrique erroné lors d'approches barométriques et demander à l'équipage de vérifier la valeur du QNH fourni par le contrôle avec celle utilisée pour la préparation de l'approche (voir [annexe 3](#)) ;
- mise à jour fin 2022 des procédures opérationnelles d'approche utilisant le mode FINAL APP dans les FCOM applicables, pour demander non plus une vérification altitude-distance pour tous les points indiqués sur les cartes d'approches, mais uniquement au FAF et aux SDF (voir annexe 3), ceci afin de réduire la charge de travail de l'équipage ;
- publication en novembre 2022 d'un article dans le magazine Safety First "[Use the Correct BARO Setting for Approach](#)" ;
- mise à jour fin 2023 des procédures opérationnelles de préparation de la descente dans le FCOM, applicables à toutes les flottes, pour inclure un pré-affichage du QNH lors de la prise d'ATIS, soit directement dans l'EFIS lorsque cela est techniquement possible, soit sur l'instrument de secours (voir annexe 3) ;
- mise à jour fin 2023 des aides à la réalisation des briefings dans le FCTM, applicables à toutes les flottes, pour inclure la menace d'un calage altimétrique erroné lors d'approches barométriques (voir annexe 3) ;
- mise à jour fin 2023 des aides à la réalisation des procédures opérationnelles d'approches dans le FCTM, applicables à toutes les flottes, avec la création d'un nouveau paragraphe sur l'importance du calage altimétrique, l'importance de la comparaison de cette valeur avec celle utilisée lors de la préparation de l'approche, ainsi qu'une mention sur le fait qu'un comportement inattendu du radio-altimètre peut être le signe d'un calage altimétrique incorrect (voir annexe 3).

Par ailleurs, Airbus a indiqué continuer à travailler à la certification d'ALTSM Step 2 (voir § 1.18.3.1) et à étudier la possibilité de développer une fonction similaire à l'ALTSM, disponible en rétrofit sur toutes les flottes.

4.4 DSAC

À la suite de l'incident grave et au cours de l'enquête, la DSAC a pris les mesures suivantes :

- lancement d'un groupe de travail « Altimétrie » comprenant 32 organisations, dont des exploitants aériens français et européens, Airbus, la DSNA, et un représentant de la Fédération Française Aéronautique (FFA), avec pour objectif d'explorer les différentes pistes envisageables pour rendre l'aviation plus robuste aux calages altimétriques erronés. Le BEA a participé aux deux premières réunions du groupe de travail pour partager son analyse. Une synthèse des travaux est disponible dans le [rapport de la sécurité aérienne 2022 de la DGAC](#) ;
- publication de [l'Info Sécurité DGAC n° 2023/02](#) sur les risques liés aux erreurs de calage altimétrique, en particulier lors des opérations d'approche APV baro-VNAV et d'approche de non-précision ;
- participation au lancement de l'étude de Météo-France sur les variations de QNH en 30 minutes (voir § 1.7.3 et [annexe 2](#)) ;
- réalisation d'une étude des événements similaires à la demande du BEA (voir § 1.18.1.2).

4.5 Autres mesures prises par différentes organisations

À la suite de l'incident grave et au cours de l'enquête, plusieurs organisations ont diffusé des informations de sécurité et recommandations en lien avec la problématique du calage altimétrique.

L'AESA a publié en mars 2023 le bulletin d'information de sécurité [SIB n° 2023-03 « Incorrect Barometric Altimeter Setting »](#) qui rappelle les dangers d'un calage altimétrique erroné et émet plusieurs recommandations à destination des exploitants aériens et des prestataires de services de la navigation aérienne. Le SIB est également accompagné par de plus amples informations sur sa page communauté Air Operations avec le sujet « [incorrect barometric altimeter setting](#) » qui comprend notamment des aides à la mise en place d'un programme d'analyse de vol par l'exploitant.

En novembre 2023, l'AESA a également officiellement lancé la première étude systémique du programme [Data4Safety](#) en cherchant à analyser finement les erreurs de calage altimétrique.

L'AESA a aussi indiqué au BEA au cours de l'enquête qu'elle mettrait à jour la *Safety Issue* SI-0007 « *approach path management* » en prenant en compte la possibilité d'une utilisation d'un QNH erroné lors d'une approche avec guidage vertical barométrique ainsi que ses conséquences.

Enfin, la Commission européenne et l'AESA ont indiqué au BEA au cours de la période de consultation du projet de rapport final, qu'une évaluation de l'impact du règlement [IR-PBN](#), notamment son article 5 qui mentionne les restrictions sur les approches conventionnelles et en particulier les restrictions concernant les approches ILS CAT I après le 5 juin 2030, sera réalisée en 2024. Cette analyse d'impact pourrait aboutir à des propositions de modification de l'article 5 de l'IR-PBN en 2025, une fois la tâche réglementaire correspondante incluse dans l'EPAS (*European Plan for Aviation Safety*).

Le bureau Europe et Atlantique Nord (EUR/NAT) de l'OACI a publié en juillet 2023 le [bulletin EUR OPS n° 2023 001 « Risks related to altimeter setting errors during APV Baro-VNAV and non-precision approach operations »](#) qui, après avoir rappelé les risques associés à un calage altimétrique erroné et comment les différentes procédures d'approche sont affectés, propose plusieurs recommandations à destination des exploitants aériens, des prestataires de services de la navigation aérienne, des services de météorologie et aux panels de l'OACI.

L'[aviation civile du Royaume-Uni](#) a publié en avril 2023 la notice de sécurité SN-2023/003 : *“Risk of Controlled Flight into Terrain during 3D BARO-VNAV and 2D Approaches (Altimeter Setting Procedures)”*. Une [vidéo](#) et un [Podcast](#) ont également été diffusés sur le sujet.

L'[aviation civile de Malte](#), autorité de l'exploitant aérien de l'incident grave, a également publié en mars 2023 la notice de sécurité [SIAN n° 06/22 : “Importance of correct QNH setting with respect to the risk of Controlled Flight Into Terrain \(CFIT\)”](#).

[Eurocontrol](#) a mis à jour plusieurs de ses pages [skybrary](#) en lien avec la [thématique d'erreur de calage altimétrique](#) et a réalisé une vidéo [skyclip](#) sur le sujet.

En octobre 2023, les équipes d'EUROCONTROL, en collaboration avec les entités concernées de l'industrie aéronautique et avec la participation du BEA, ont organisé conjointement un atelier sur la manière de maintenir ou d'améliorer [le niveau de sécurité des opérations d'approche finale basées sur le PBN avec guidage vertical \(barométrique\)](#).

La Fédération internationale des associations de pilotes de ligne ([IFALPA](#)) a publié un [bulletin de sécurité](#) sur le sujet.

5 RECOMMANDATIONS DE SÉCURITÉ

Rappel : conformément aux dispositions de l'article 17.3 du règlement n° 996/2010 du Parlement européen et du Conseil du 20 octobre 2010 sur les enquêtes et la prévention des accidents et des incidents dans l'aviation civile, une recommandation de sécurité ne constitue en aucun cas une présomption de faute ou de responsabilité dans un accident, un incident grave ou un incident. Les destinataires des recommandations de sécurité rendent compte à l'autorité responsable des enquêtes de sécurité qui les a émises, des mesures prises ou à l'étude pour assurer leur mise en œuvre, dans les conditions prévues par l'article 18 du règlement précité.

5.1 Recommandations de sécurité du rapport préliminaire

Sur la base des premières constatations de l'enquête, le BEA a émis six recommandations de sécurité dans le [rapport préliminaire publié le 11 juillet 2022](#). Elles portent sur deux axes principaux.

Conscience du risque et procédures opérationnelles des services de la navigation aérienne

Le BEA recommande :

- *Considérant que pendant la courte durée de cet événement, un QNH erroné a été donné à deux équipages par un contrôleur ;*
- *Considérant que pendant la courte durée de cet événement, deux contrôleurs aériens n'ont pas relevé les collationnements de QNH erronés ;*
- *Considérant que le système MSAW, lorsque disponible, peut être considéré comme une des dernières barrières pour éviter un CFIT ;*
- *Considérant que la phraséologie standard d'une alerte MSAW n'a pas été utilisée, notamment sans rappel du QNH,*

que les services de la navigation aérienne de Paris-Charles de Gaulle :

- *S'assurent sans délai que les contrôleurs aériens soient conscients de l'importance du QNH lors des approches utilisant la fonction baro-VNAV, en relation avec le risque de CFIT [Recommandation FRAN-2022-005]*
- *S'assurent sans délai que les contrôleurs aériens soient conscients de l'importance de la vérification des éléments collationnés par les équipages [Recommandation FRAN-2022-006]*
- *S'assurent sans délai que les contrôleurs aériens appliquent strictement la phraséologie d'urgence associée à une alerte MSAW, notamment en fournissant le QNH [Recommandation FRAN-2022-007]*
- *Mettent en place sans délai une procédure pour les contrôleurs aériens afin de réduire le risque qu'un QNH erroné soit utilisé par les équipages lors d'approches utilisant la fonction baro-VNAV, possiblement en répétant le QNH à un moment approprié de l'approche [Recommandation FRAN-2022-008]*

Conscience du risque et procédures opérationnelles des équipages

Le BEA recommande :

- *Considérant que le QNH donné dans les informations de l'ATIS et par le contrôleur aérien d'approche différaient de 10 hPa, ce qui est supérieur à ce qui pourrait résulter de fluctuations atmosphériques et ce qui n'a pas été relevé par l'équipage ;*
- *Considérant que la documentation opérationnelle de l'exploitant ne met pas en évidence l'importance du QNH pour les approches utilisant la fonction baro-VNAV en relation avec le risque de CFIT ;*

- *Considérant que les procédures opérationnelles de l'exploitant concernant les approches utilisant la fonction baro-VNAV ne sont pas robustes aux erreurs de QNH communes aux deux altimètres,*

que Airhub Airlines :

- *S'assure sans délai que les équipages soient conscients de l'importance du QNH lors des approches utilisant la fonction baro-VNAV en relation avec le risque de CFIT [Recommandation FRAN-2022-009]*
- *Mette en place sans délai une procédure pour les équipages afin de réduire le risque d'une erreur de calage altimétrique lors d'approches utilisant la fonction baro-VNAV, possiblement avec une vérification du QNH avec une source d'information indépendante comme les informations ATIS lorsque disponibles ou en faisant confirmer le QNH avec le contrôleur aérien [Recommandation FRAN-2022-010] »*

L'ensemble des réponses apportées à ces recommandations par les destinataires ont été considérées comme « adéquates » par le BEA au vu des mesures prises par les destinataires (voir § 4).

5.2 Nouvelles recommandations de sécurité

5.2.1 Réévaluation globale du risque de CFIT et des mesures d'atténuation associées en lien avec la menace d'un calage altimétrique erroné pour les procédures d'approche baro-VNAV

Le risque de collision avec le sol en lien avec la menace d'un calage altimétrique erroné pour les approches barométriques est connu quasiment depuis les débuts de l'aviation. L'utilisation majoritaire de procédures d'approche de non-précision et la quasi-absence de système de prévention des collisions avec le sol jusqu'aux années 70 ont donné lieu à un risque de CFIT élevé, entre autres dû aux erreurs de calage altimétrique, qui était toléré eu égard aux exigences globales du niveau de sécurité de l'époque.

Le développement important du transport aérien commercial au cours des décennies qui ont suivi a fortement augmenté les attentes sociétales à la fois sur le plan de la sécurité et de l'accessibilité aéroportuaire au regard des conditions météorologiques. Les installations ILS offrent un guidage latéral et vertical non sensible aux erreurs de calage altimétrique (l'altitude de décision aux minima reste cependant affectée) et offrent de plus une accessibilité accrue vis-à-vis des conditions météorologiques à l'aide de minima d'approche abaissés. Elles se sont ainsi fortement répandues et sont devenues un standard d'équipement dans le monde entier et le restent encore aujourd'hui.

Le développement à partir des années 90, des fonctions baro-VNAV (offrant un guidage latéral conventionnel ou satellitaire et un guidage vertical barométrique basé sur le calage altimétrique) a permis de réaliser des descentes, puis des approches, puis dans les années 2000 des approches finales au travers de la navigation basée sur les performances (*Performance Based Navigation, PBN*) avec des minima proches de ceux des approches de précision de catégorie I.

Les approches baro-VNAV ont ainsi grandement participé et continuent de participer à l'amélioration de la sécurité, en permettant d'avoir un guidage vertical sur les approches de non-précision et sur les pistes sans équipement de radionavigation. Elles réduisent ainsi le risque de collision avec le sol.

Pour autant, la fonction baro-VNAV n'a pas été conçue comme un système autonome d'approche et d'atterrissage, contrairement aux systèmes d'approches de précision tels que l'ILS, ou les approches utilisant des systèmes de renforcement du positionnement GNSS (GBAS ou SBAS). Le guidage vertical d'une approche baro-VNAV repose uniquement sur des données internes à l'avion et notamment l'altitude barométrique qui dépend du calage altimétrique. Or ce dernier nécessite potentiellement de multiples interventions humaines sujettes à l'erreur (par les services météorologiques, les contrôleurs aériens et les pilotes).

Les approches qui utilisent la fonction baro-VNAV et qui permettent d'avoir les minima les plus bas sont les procédures PBN de type RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV. La hauteur de décision peut alors descendre jusqu'à 250 ft, proche des minima d'une approche ILS de catégorie I à 200 ft. Or, une des erreurs de calage altimétrique en hectopascal les plus fréquentes est une erreur de 10 hPa. Cette dernière entraîne un décalage de l'altitude et donc du plan de descente de 280 ft par rapport au plan théorique, pouvant finalement conduire à une collision avec le sol avant que l'altitude de décision indiquée n'ait été atteinte par l'équipage.

Il est de plus à noter que la méthode de calcul des hauteurs de décision des RNP APCH avec des minima LNAV/VNAV dans la conception des procédures, notamment au travers de la marge de franchissement des obstacles dans les PANS-OPS de l'OACI, a été révisée en 2004 pour permettre une plus grande accessibilité des aéroports et aboutit à des altitudes de décision plus faibles. Les menaces inhérentes à la fonction baro-VNAV, comme un calage altimétrique erroné par exemple, n'ont pas été prises en compte dans cette évolution qui n'a pas donné lieu à une étude de sécurité.

Les différentes analyses de risque conduites sur les approches baro-VNAV par les différentes institutions internationales ont insuffisamment pris en compte la menace que représente un calage altimétrique erroné pour le risque de CFIT que ce soit dans la conception de ces procédures IFR, dans leur mise en œuvre par les équipages, dans les procédures des contrôleurs aériens et dans les systèmes bord ou sol. Il est également à noter que les analyses de risques sur les approches baro-VNAV faites aux États-Unis concernent un contexte et une organisation des espaces aériens qui diffèrent sensiblement de ceux d'autres parties du monde et de l'Europe notamment. En effet, sont utilisés aux États-Unis : un calage altimétrique en inHg, un niveau de transition au FL 180 et l'anglais comme langue maternelle pour les contrôleurs aériens par exemple. Les comparaisons peuvent ainsi être inappropriées et les discussions à l'échelle internationale doivent tenir compte de ces différences.

Dans un contexte de recours accru à des approches satellitaires avec guidage vertical barométrique, la menace d'un calage altimétrique incorrect, bien que connue depuis des décennies, redevient prépondérante. Ce risque a probablement été insuffisamment pris en compte par l'ensemble de la communauté aéronautique, du fait notamment que la majorité des approches réalisées en transport aérien commercial sont effectuées depuis plusieurs décennies au travers des approches de précision ILS dont le plan de descente n'est pas sensible à l'erreur de calage altimétrique, masquant ainsi une grande partie de ces erreurs et leurs conséquences.

À la lumière de cet incident grave et des nombreux événements similaires de calage altimétrique erroné, on peut juger que l'hypothèse selon laquelle la formation, les procédures et les systèmes actuels suffisent à limiter le risque de CFIT lors de la réalisation d'une approche baro-VNAV avec un calage altimétrique erroné est incorrecte et que ce risque est inacceptable avec le niveau de sécurité global attendu aujourd'hui en transport aérien commercial.

Les différentes mesures prises par différents acteurs aéronautiques au cours de l'enquête vont dans le sens de l'amélioration de la sécurité. Pour autant, ces mesures sont : soit des actions prises par certaines organisations et qui n'ont donc pas été généralisées, soit des rappels de bonnes pratiques ou recommandations qui n'entraînent pas de modifications systémiques ou qui ont des effets à court terme uniquement.

Ainsi, le BEA recommande que :

- *considérant la menace que représente la réalisation d'une approche barométrique avec un calage altimétrique erroné pour le risque de CFIT notamment ;*
- *considérant le grand nombre d'événements similaires d'approches réalisées avec un calage altimétrique erroné ;*
- *considérant que la conception des procédures d'approche barométrique et les minima associés ne prennent pas en compte la possibilité d'un calage altimétrique erroné ;*
- *considérant que les procédures opérationnelles standards des équipages et des contrôleurs aériens ne sont pas suffisamment robustes pour prévenir et détecter systématiquement une erreur de calage altimétrique ;*
- *considérant que les systèmes sol et bord de détection d'un calage altimétrique erroné ne sont que peu déployés actuellement ;*
- *considérant la disponibilité actuelle limitée à bord des avions des capacités LPV, peu sensibles aux erreurs de calage altimétrique, et dont le rétrofit apparaît comme difficile et coûteux ;*
- *considérant que les barrières de prévention des CFIT, à la fois procédurales et systèmes, ne sont pas toujours présentes ni toujours efficaces ;*
- *considérant que le bulletin OACI EUR OPS n° 2023_001 « Risks related to altimeter setting errors during APV Baro-VNAV and non-precision approach operations » contient des recommandations à pérenniser, étendre ou formaliser ;*

L'OACI, en collaboration avec les industriels, les autorités et les exploitants, réévalue de manière globale le risque de CFIT et les mesures d'atténuation associées, en lien avec la menace d'un calage altimétrique erroné pour les procédures d'approche baro-VNAV. Ces mesures pourraient consister en la mise à jour des normes et pratiques recommandées et documents associés avec la définition de moyens incitatifs, voire prescriptifs, assurant le développement de nouvelles barrières de sécurité ou l'amélioration des barrières existantes.

[Recommandation FRAN-2024-006]

5.2.2 Maintien du niveau de sécurité des opérations d'approche en Europe en 2030

Le règlement d'exécution (UE) 2018/1048 de la Commission du 18 juillet 2018 fixant des exigences pour l'utilisation de l'espace aérien et des procédures d'exploitation concernant la navigation fondée sur les performances, dit « IR-PBN »⁸⁶, requiert que les prestataires de services de la navigation aérienne européenne aient un usage exclusif de la PBN jusqu'aux opérations d'approches de précision CAT I incluse d'ici le 30 juin 2030. Par conséquent, les procédures d'approche à l'aide de systèmes de navigation conventionnelle, comme les ILS, ne seront plus proposées à partir de cette date, sauf mesures d'urgence.

Les procédures d'approche GBAS sont exclues du champ d'application du règlement IR-PBN et seront donc toujours permises après le 6 juin 2030. Cependant, le taux d'équipement des avions en mesure de réaliser ce type d'approche, bien que supérieur au taux d'équipements des avions pour la LPV, reste actuellement faible, et surtout, seuls quelques aérodromes en Europe disposent des

⁸⁶ [Version en vigueur le jour de l'incident grave.](#)

infrastructures nécessaires à la réalisation des approches GBAS (CDG n'en fait pas partie) et ainsi très peu de procédures GLS (*GBAS landing system*) sont publiées.

L'introduction de l'exigence d'un usage exclusif de la PBN dans le règlement IR-PBN a été réalisée à la toute fin du processus réglementaire, et n'a pas donné lieu à une évaluation spécifique de son impact sur la sécurité avant l'adoption du règlement. En particulier, il n'y a pas eu d'évaluation de l'impact d'un passage d'opérations aériennes IFR commerciales majoritairement réalisées sur des ILS, à des opérations aériennes commerciales réalisées uniquement par des approches de type PBN (hors opérations CAT II/III), ni de définition de critères pour ajuster cette disposition dans le cas où le développement de la capacité LPV ne serait pas celui attendu à l'horizon 2030. Une des hypothèses, également un objectif, était que les exploitants allaient moderniser leurs flottes et s'équiper pour réaliser des procédures RNP APCH avec des minima LPV, seule procédure PBN offrant un niveau de sécurité et d'accessibilité comparable aux approches de précision ILS-CAT I.

L'enquête a montré que le développement des capacités LPV n'en est qu'à ses débuts en transport aérien commercial. Par exemple, fin 2022, moins de 500 avions Airbus en service sur une flotte de plus de 10 000 avions étaient équipés pour pouvoir réaliser des procédures RNP APCH avec des minima LPV ; et à la date d'écriture de ce rapport, aucun avion Boeing n'était certifié pour pouvoir réaliser ces opérations. Suivant le type d'avion et le numéro de série, le retrofit pour obtenir cette capacité semble être prohibitif. Il n'y a enfin aucune exigence prévue pour imposer cette capacité dans les années à venir.

En l'absence de capacité LPV, les approches baro-VNAV constitueront les procédures d'approche privilégiées par les exploitants aériens d'aéronefs dans un contexte imposé d'usage exclusif de la PBN.

L'enquête a mis en évidence de nombreuses faiblesses du système aéronautique, à la fois vis-à-vis de la menace que constitue l'utilisation d'un calage altimétrique erroné, à laquelle une approche baro-VNAV est particulièrement sensible, et aussi vis-à-vis du risque de CFIT qui peut en être la conséquence.

Les constats réalisés à l'occasion de cette enquête laissent entrevoir, en l'absence d'inflexion franche en Europe d'ici 2030, une régression substantielle du niveau de sécurité en approche. La Commission européenne et l'AESA ont indiqué au cours de la période de consultation du rapport final qu'une évaluation d'impact de l'article 5 du règlement IR-PBN sur les restrictions d'usage des approches conventionnelles serait réalisée en 2024 et pourrait déboucher sur des propositions de modification du règlement IR-PBN.

Ainsi, le BEA recommande que :

- *considérant que le niveau de sécurité actuel en Europe pour les approches finales en transport aérien commercial régulier est principalement basé sur des approches de précision réalisées à l'aide d'ILS ;*
- *considérant qu'à horizon 2030 avec la mise en application du règlement [IR-PBN](#), le niveau de sécurité en Europe pour les approches finales sera principalement basé sur des approches RNP ;*

- *considérant que sur les trois minima d’approches RNP, seules les procédures RNP APCH avec des minima LPV ont un niveau de sécurité similaire aux ILS en ce qui concerne la sensibilité à des erreurs de calage altimétrique ;*
- *considérant que la disponibilité actuelle des capacités LPV à bord des avions est limitée et que les industriels indiquent que le rétrofit peut être difficile et coûteux ;*
- *considérant qu’à horizon 2030, avec la mise en application du règlement IR-PBN, les exploitants qui ne disposent pas de capacités LPV réaliseront des procédures barométriques RNP APCH avec des minima LNAV ou LNAV/VNAV sensibles aux erreurs de calage altimétrique ;*
- *considérant les faiblesses du système aéronautique, face à la menace que constitue l’utilisation d’un calage altimétrique erroné comme mis en évidence par cet incident grave et par de nombreux autres événements similaires ;*
- *considérant qu’au cours du processus règlementaire de l’IR-PBN, il n’y a pas eu d’évaluation de l’impact de sécurité d’un passage d’opérations aériennes commerciales majoritairement réalisées par des approches IFR basées sur des ILS, à des opérations aériennes commerciales réalisées uniquement par des approches RNP ;*
- *considérant que les autres mesures prévues ou en cours, y compris celles résultant des autres recommandations émises par le BEA dans le cadre de cette enquête pour minimiser le risque associé à l’erreur de calage altimétrique, ne permettent pas d’atteindre un niveau de sécurité équivalent à celui d’approches ILS, GLS, ou RNP APCH avec des minima LPV ;*

la Commission européenne, en collaboration avec l’AESA, analyse et réévalue les risques associés aux changements induits par le règlement (UE) n° 2018/1048 dit « IR-PBN », notamment ceux liés à l’utilisation d’un calage altimétrique erroné au cours d’une approche barométrique, et prend les mesures appropriées pour maintenir le niveau de sécurité visé des opérations d’approche finale en Europe à l’horizon 2030. [Recommandation FRAN-2024-007]

5.2.3 Système sol de détection d’une erreur de calage altimétrique

Lors de l’incident grave du 9H-EMU à CDG, aucun système sol ne permettait de détecter une erreur de calage altimétrique par les contrôleurs aériens. Certains prestataires de service de la navigation aérienne, comme le NATS aux Royaume-Uni ou le LVNL aux Pays-Bas, ont mis en place un système sol qui compare le calage altimétrique transmis par les aéronefs au travers des données descendantes EHS ou ADS-B, à la valeur du QNH en vigueur localement, afin d’informer le contrôleur aérien d’une potentielle référence altimétrique erronée à bord. Les données fournies par Eurocontrol montrent que parmi les 41 États membres d’Eurocontrol, 6 disposent d’un système alertant le contrôle qu’un aéronef transmet un calage altimétrique incorrect et 11 disposent d’un système permettant l’affichage du calage altimétrique des aéronefs sur l’écran des contrôleurs aériens. En revanche, aucun système comparable n’est actuellement en place en France. Par ailleurs, il n’existe pas de normes concernant ces systèmes, ni de procédure opérationnelle ou de phraséologie standardisée.

Pourtant, côté avion, le règlement d’exécution (UE) n° 1207/2011 de la Commission, en vigueur le jour de l’incident, puis le règlement d’exécution (UE) 2023/1770 de la Commission abrogeant ce dernier et fixant les exigences relatives à la performance et à l’interopérabilité des activités de surveillance pour le ciel unique européen et ses amendements, exige que les aéronefs volant dans l’espace aérien européen de masse supérieure à 5 700 kg ou ayant une vitesse de croisière maximale supérieure à 250 kt, soient équipés d’un transpondeur secondaire qui transmette les informations des protocoles Mode S enrichi (*Enhanced Surveillance Mode S*, EHS) et ADS-B. Parmi les informations transmises et exigées, figure le calage altimétrique à bord de l’avion au travers du BPS (*Barometric Pressure Setting*).

Ainsi, les exploitants de transport aérien commercial se sont mis en conformité avec cette exigence et l'information BPS est disponible pour être utilisée par les organismes d'approches et les tours de contrôle. En l'absence d'exigence côté sol pour imposer son usage, la majorité des prestataires de service de la navigation aérienne n'a pas fait cet investissement.

L'enquête a montré qu'il est fréquent que les équipages réalisent des approches avec un calage altimétrique erroné sans en avoir conscience et que cet incident grave n'est pas un cas isolé. Une grande partie de ces événements similaires ont eu lieu lors d'approches ILS, dont le plan de descente n'est pas sensible à l'erreur de calage altimétrique et n'ont pas donné lieu à des incidents significatifs. À l'inverse, plusieurs incidents significatifs voire incidents graves ou accidents ont eu lieu lors d'approches barométriques.

Ainsi, le BEA recommande que :

- *considérant la menace que représente la réalisation d'une approche barométrique avec un calage altimétrique erroné pour le risque de CFIT notamment ;*
- *considérant le grand nombre d'événements similaires d'approches réalisées avec un calage altimétrique erroné ;*
- *considérant que les procédures opérationnelles standards des équipages et des contrôleurs ne sont pas suffisamment robustes pour prévenir systématiquement la réalisation d'une approche avec un calage altimétrique erroné ;*
- *considérant que les systèmes bord de détection d'un calage altimétrique erroné ne sont que peu déployés actuellement ;*
- *considérant que les systèmes sol de détection d'un calage altimétrique erroné ne sont que peu déployés actuellement et qu'ils constituent un moyen efficace de prévention du risque de réalisation d'approche avec un calage altimétrique erroné ;*
- *considérant que l'information BPS est incluse dans les données descendantes des aéronefs, fonction rendue obligatoire pour la quasi-totalité des aéronefs exploités en transport aérien commercial ;*
- *considérant qu'il n'y a aucune obligation d'utilisation au sol de ces données par les services de la navigation aérienne ;*
- *considérant que les filets de sauvegarde ATM nécessitent des procédures et phraséologies claires et standardisées ;*

l'AESA exige que les organismes de contrôle de la circulation aérienne soient en mesure de détecter systématiquement une erreur de calage altimétrique, en particulier dans les tours et les approches, et définisse la phraséologie associée pour les contrôleurs aériens.

[Recommandation FRAN-2024-008]

5.2.4 Système bord d'avertissement et d'alarme d'impact (TAWS)

Une alerte TAWS est une des dernières barrières pour éviter des accidents de type CFIT et a fait ses preuves en évitant de nombreux accidents. Néanmoins, le système doit à la fois prévenir les équipages du risque de collision avec le sol et ne pas générer de fausses alertes susceptibles d'entraîner une perte de confiance des équipages dans le système.

Au fil des retours d'expérience et des accidents, des spécifications de performances opérationnelles minimales (*Minimum Operational Performance Standard, MOPS*) ont été mises en place et exigées par la certification. Ces normes ne sont applicables que lors de la certification individuelle de l'avion, et opérationnellement, il n'y a pas d'exigence de mise à jour du TAWS, qui peut donc rester avec une version applicable lors de la production de l'avion, sans prendre en compte les différentes évolutions existantes.

Lors de l'incident grave, conformément à ses spécifications, le TAWS du 9H-EMU n'a pas émis d'alerte alors que la hauteur radio-altimètre minimale enregistrée et corrigée était de 6 ft et que l'avion était à environ 0,9 NM du seuil de piste. En effet, l'avion était configuré pour l'atterrissage et le taux de descente était standard, ainsi aucune alerte ou alarme des modes basiques et réactifs du TAWS n'a été activée. De plus, l'alerte « GLIDE SLOPE » n'est pas disponible pour les approches barométriques. Enfin, puisque le mode prédictif d'alerte de descente prématurée (PDA) comporte une zone d'inhibition présente avant la piste afin d'éviter des alertes intempestives à chaque atterrissage, aucune alerte n'a été générée, malgré la faible hauteur de l'avion car la version logicielle de l'EGPWS était ancienne et n'utilisait pas le GNSS comme moyen de positionnement.

L'enquête a évalué qu'environ 1 600 avions Airbus et Boeing encore en service au moment de la publication du rapport volent avec des TAWS dont la version logicielle ne permet pas le déclenchement d'une alerte dans les conditions de l'incident grave.

De plus, l'enquête a montré, qu'un profil de descente nominal sur une pente à 3°, décalé d'environ 280 ft et représentant une erreur de calage altimétrique de 10 hPa parmi les plus fréquentes, n'est pas couvert pas les MOPS en vigueur actuellement.

Ainsi, le BEA recommande que :

- *considérant l'importance du TAWS dans la prévention des CFIT ;*
- *considérant que, conformément à ses spécifications, le TAWS équipant l'avion impliqué dans l'incident grave n'a pas émis d'alerte de risque de collision avec le sol ;*
- *considérant qu'il a été estimé, qu'à la publication du rapport, environ 1 600 avions Airbus ou Boeing volent avec un TAWS qui ne déclencherait pas d'alerte dans les circonstances de l'incident grave ;*
- *considérant qu'un profil de descente nominal sur une pente à 3°, décalé vers le bas d'environ 280 ft et représentant une erreur de calage altimétrique de 10 hPa parmi les plus fréquentes, n'est pas couvert pas les exigences de certification en vigueur actuellement au travers des MOPS applicables aux TAWS ;*
- *considérant que la révision des exigences de standardisation est une étape nécessaire pour pouvoir imposer ultérieurement des standards en exploitation ;*

l'AESA, en coordination avec la FAA et RTCA, étudie la révision des spécifications de performances opérationnelles minimales (MOPS) applicables aux systèmes TAWS pour les alertes de descente prématurée (PDA), afin de prendre en compte a minima une trajectoire d'approche standard à 3° décalée vers le bas d'environ 280 ft, représentant une erreur de 10 hPa sur une approche barométrique.

[Recommandation FRAN-2024-009]

5.2.5 Formation au MSAW

Lors de l'incident grave et au cours des deux approches, une phraséologie incorrecte et inadaptée a été utilisée en réaction au déclenchement de l'alerte MSAW par deux contrôleurs tour différents. Les phraséologies employées ne laissaient pas apparaître l'urgence de la situation, ne permettaient pas à l'équipage de comprendre ce qui était attendu de lui, et ne comprenaient pas l'information cruciale de la valeur du QNH qui aurait pu permettre à l'équipage de se rendre compte du calage altimétrique erroné.

De plus, le délai de réaction du contrôleur aérien à l'alerte lors de la première approche ne laissait que très peu de temps à l'équipage pour réagir.

L'enquête a montré qu'un contrôleur de CDG peut de manière assez probable n'avoir jamais revu en pratique la réaction attendue à une alerte MSAW depuis sa formation initiale à l'ENAC.

L'étude de divers événements similaires a montré qu'en France, l'emploi correct de la phraséologie d'urgence MSAW n'était que partiellement réalisé et que l'utilisation d'une phraséologie incorrecte et inadaptée n'était pas un cas isolé, et qu'une absence de réaction a été observée dans un certain nombre de cas.

Lors du rapport préliminaire, le BEA avait émis une recommandation sur la phraséologie MSAW. En réponse, le travail de la DSNA a porté sur les consignes à adopter lors du déclenchement d'une telle alerte, accompagnées par des retours d'expérience et des rappels. Cependant, aucune action globale et nationale au niveau de la formation continue des contrôleurs aériens n'a été mise en place pour s'assurer de manière pérenne et continue de la restitution immédiate de la phraséologie d'urgence en cas d'alerte MSAW.

Ainsi, le BEA recommande que :

- *considérant l'importance du MSAW dans la prévention des CFIT ;*
- *considérant l'importance du temps de réaction et de la phraséologie à employer en réaction à une alerte MSAW ;*
- *considérant le nombre d'événements similaires en France avec l'emploi d'une phraséologie MSAW incorrecte ;*
- *considérant qu'au niveau national, la formation continue des contrôleurs aériens est insuffisante et ne leur permet pas de garantir une restitution immédiate de la phraséologie attendue en cas d'alerte MSAW ;*

la DSNA s'assure qu'au niveau national, la formation et l'entraînement récurrent des contrôleurs aériens leur garantissent la maîtrise de la procédure d'urgence relative à une alerte MSAW.

[Recommandation FRAN-2024-010]

5.2.6 Système de gestion de la sécurité de la DSNA

L'incident du 9H-EMU a mis en lumière une succession d'erreurs en opérations normales, par différents contrôleurs, sur différentes positions, en un laps de temps restreint.

L'étude des événements similaires par la DSAC a montré qu'en France, le contrôle aérien contribue à environ un quart des événements liés à des erreurs de calage altimétriques.

En plus de ces erreurs en conditions normales, les phraséologies d'urgence associées aux alertes MSAW n'ont pas été restituées correctement lors de l'incident grave.

À la date de l'incident du 9H-EMU, le risque de « quasi CFIT » était identifié parmi les événements indésirables de la cartographie des risques de la DSNA. Pour autant, la DSNA n'avait pas développé de grille d'analyse des événements « quasi CFIT » et n'avait pas mis en place localement ou nationalement un processus de gestion du risque de CFIT tel qu'attendu par un système de gestion de la sécurité et de la conformité, en particulier en s'appuyant sur l'analyse des événements de sécurité. La DSNA se privait ainsi d'une appréciation globale du risque CFIT au-delà de l'analyse ponctuelle de chaque événement et du possible dénombrement des événements « quasi CFIT » enregistrés dans sa base de données.

Par ailleurs, le recueil de données alimentant le système de gestion de sécurité de la DSNA était encore essentiellement réalisé à partir des seuls événements de sécurité (démarche réactive), et il

n'y avait pas d'autres moyens ou méthodes mis en place à la DSNA pour permettre de mieux appréhender les signaux faibles, les menaces, les erreurs et les événements indésirables qui peuvent avoir un impact sur la sécurité dans un contexte opérationnel donné, et d'identifier les bonnes pratiques pour maintenir la sécurité (démarche proactive ou prédictive).

Depuis l'incident grave, la DSNA a accéléré la mise en place d'une gestion des risques via l'analyse par barrière et a renforcé sa prise en compte du risque de collision avec le sol. Elle travaille également à la mise en place d'un processus d'observation sur position des contrôleurs aériens.

Ainsi, le BEA recommande que :

- *considérant les différentes erreurs de contrôle identifiées lors de l'enquête ;*
- *considérant que le système de gestion de la DSNA repose uniquement sur l'analyse des événements de sécurité et ne permet pas l'identification des signaux faibles, des menaces, des erreurs et des événements en opération normale des contrôleurs aériens ;*
- *considérant que la DSNA a initié un processus de refonte de ses méthodes d'analyse et de gestion des risques ;*

la DSNA mette en place des méthodes ou outils d'évaluation objective du travail sur position des contrôleurs aériens à des fins d'amélioration du système de gestion de la sécurité.

[Recommandation FRAN-2024-011]

Les enquêtes du BEA ont pour unique objectif l'amélioration de la sécurité aérienne et ne visent nullement à la détermination de fautes ou responsabilités.