



Étude Feu - Oxygène en cockpit – Accident survenu à l'A320 immatriculé SU-GCC le 19 mai 2016

PREAMBULE

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

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

TABLE DES MATIÈRES

1	Contexte.....	- 12 -
2	Le système oxygène et lutte contre incendie dans le cockpit.....	- 15 -
2.1	Emport d'Oxygène – Exigences règlementaires	- 15 -
2.2	Descriptif du système oxygène du cockpit d'un avion de transport commercial	- 18 -
2.3	Moyens de lutte contre incendie.....	- 19 -
2.3.1	Moyens d'extinction	- 19 -
2.3.2	Équipements respiratoires de protection	- 19 -
2.3.3	Fumer dans un cockpit.....	- 21 -
3	Accidents, antérieurs à l'accident survenu au SU-GCC, liés A UN FEU et au dispositif oxygène du cockpit	- 23 -
3.1	Accident survenu au Boeing 767 cargo immatriculé N799AX en 2008.....	- 23 -
3.2	Accident survenu au CRJ 200 immatriculé N830AS en 2009	- 24 -
3.3	Accident survenu au Boeing 777-200 immatriculé SU-GBP en 2011.	- 25 -
3.4	Accident d'un Boeing 737 survenu en 2012	- 26 -
3.5	Conclusion sur les événements antérieurs liés à un feu at au dispositif oxygène du cockpit - 27 -	
4	Accident survenu a l'Airbus A320 immatriculé SU-GCC exploité par EgyptAir le 19 mai 2016 ...	- 28 -
4.1	Déroulement du vol.....	- 28 -
4.2	Tués et blessés.....	- 28 -
4.3	Renseignements sur l'aéronef.....	- 29 -
4.3.1	Cellule	- 29 -
4.3.2	Aspects maintenance.....	- 29 -
4.3.3	Système de distribution de l'oxygène dans le cockpit	- 29 -
4.3.4	Procédures Feu-fumée dans le cockpit	- 34 -
4.4	Renseignements sur l'épave et les débris	- 35 -
4.5	Enregistrements CFR et FDR.....	- 36 -
4.5.1	Rapports de vols (CFR)	- 36 -
4.5.2	Enregistreur de paramètres de vol (FDR).....	- 37 -
4.6	Enregistreur phonique (CVR)	- 38 -
4.6.1	Contenu	- 38 -
4.6.2	Sources de captation	- 39 -
4.6.3	Utilisation des casques et communications ATC.....	- 40 -
4.6.4	Analyse des conversations du CVR :.....	- 42 -
4.6.5	Descriptif audio de la séquence accidentelle.....	- 43 -
4.7	Essais et recherches.....	- 45 -
4.7.1	Présentation des essais et recherches	- 45 -
4.7.2	EVT1 : Bruits transitoires sur la voie audio du copilote	- 45 -
4.7.3	EVT2 : Bruit de fuite de courte durée (2,6 s) enregistré avec un fort niveau sur la voie audio CVR du copilote	- 45 -
4.7.4	EVT3 : Transitoire de fort niveau	- 47 -
4.7.5	EVT4 et EVT9 : Fuite continue	- 48 -
4.7.6	EVT8 : Interruption du bruit de fuite	- 48 -
4.7.7	Porte du cockpit ouverte ou fermée	- 49 -
4.7.8	Déconnexion du Pilote automatique	- 50 -
5	Étude feu – oxygène.....	- 51 -
5.1	Introduction.....	- 51 -

5.2	Déclenchement d'un feu affectant le système oxygène.....	- 52 -
5.2.1	Une source extérieure de chaleur.....	- 52 -
5.2.2	Mécanismes d'ignition internes.....	- 63 -
5.2.3	Inflammation de substances dans un environnement enrichi en oxygène.....	- 71 -
5.3	Extinction d'un feu en présence d'une fuite d'oxygène : utilisation d'extincteurs au halon	- 74 -
5.4	Propagation (et extinction) d'un feu en présence d'une fuite d'oxygène -	- 78 -
5.5	Synthèse sur la propagation du feu avec apport d'oxygène.....	- 83 -
5.6	Résultats de l'étude Feu-Oxygène en lien avec l'accident survenu à l'A320 immatriculé SU-GCC	- 84 -
5.6.1	EVT3 : Transitoire de fort niveau (t0 +4,3 s)	- 86 -
5.6.2	EVT5 : Le copilote verbalise la présence d'un feu (t0 + 6,1 s).....	- 86 -
5.6.3	EVT6 et EVT7 : Modification du bruit de fuite continue : bruit d'emballement sonore et perte du signal du micro du masque à oxygène du copilote (t0 + 7,6 s et t0 + 9,6 s)	- 87 -
5.6.4	EVT8 : interruption du bruit de fuite (t0 + 17,9 s).....	- 87 -
5.6.5	EVT EXT : Percussion d'un extincteur.....	- 88 -
6	Conclusions sur l'accident survenu à l'A320 immatriculé SU-GCC exploité par Egyptair le 19 mai 2016.....	- 88 -
6.1	Faits établis ou probables.....	- 88 -
6.2	Scénario	- 90 -
6.3	Scénario lié à des explosifs	- 92 -
6.4	Enjeux de sécurité	- 92 -
6.4.1	Sources d'ignition externes au système oxygène	- 93 -
6.4.2	Sources d'ignition internes	- 95 -
6.4.3	Propagation d'un feu alimenté en oxygène.....	- 96 -
6.4.4	Équipements respiratoires de protection	- 96 -
6.4.5	Moyens d'extinction	- 96 -
6.5	Conclusion	- 97 -
7	Recommandations de sécurité.....	- 98 -
7.1	Poursuite de travaux en considérant les effets d'une surpression dans le circuit oxygène	- 98 -
7.2	Propagation d'un feu alimenté par une fuite d'oxygène	- 100 -
7.3	Risque lié à l'utilisation de cigarettes dans le cockpit	- 101 -
8	Annexes.....	- 103 -

GLOSSAIRE

Acronymes	Version Anglaise	Version Française
EAAID	Aircraft Accident Investigation Directorate / Egyptian Ministry of Civil Aviation	Autorité d'enquête de sécurité d'Égypte
ACARS	Air Communication Addressing and Reporting System	Système embarqué de communications d'adressage et de compte rendu
AESA	European Aviation Safety Agency (EASA)	Agence Européenne de la Sécurité Aérienne
AIROPS	EU regulation n°965/2012	Règlement européen n° 965/2012
AMU	Audio Management Unit	Système de gestion de l'audio
APU	Auxiliary Power Unit	Groupe auxiliaire de puissance
ATC	Air Traffic Control	Centre de contrôle aérien
ATEX	Explosive atmosphere	Atmosphère explosive
A/ P	Auto-pilot	Pilote automatique
CAM	Cockpit Area Microphone	Microphone d'ambiance
CDB	Captain	Commandant de bord
CFR	Current Flight Report	Rapport d'événement technique
COPILOT	Copilot	Copilote
CRC	Continuous Repetitive Chime	Alarme sonore répétée
CVR	Cockpit Voice Recorder	Enregistreur phonique
EASA	European Aviation Safety Agency	Agence Européenne de Sécurité Aérienne
ECAM	Electronic Centralized Aircraft Monitor	Indicateur centralisé d'état des systèmes de l'avion
EICAS	Engine Indicating and Crew Alerting System	Ecran d'affichage des informations des moteurs et des systèmes de bord
ELT	Emergency Locator Transmitter	Balise de détresse
FAA	Federal Aviation Authority	Autorité de l'aviation civile Américaine
FAR	Federal Aviation Regulation	Règlement de certification américaine
FCOM	Flight Crew Operating Manual	Manuel d'exploitation des équipages
FDR	Flight Data Recorder	Enregistreur de paramètre
Acronymes	Version Anglaise	Version Française
PA	Public Address	Système d'annonce aux passagers
PBE	Protection breathing Equipment	Équipement respiratoire de protection
PF	Pilot Flying	Pilote en fonction

PM	Pilot Monitoring	Pilote en surveillance
PNC	Cabin Crew	Personnel navigant de cabine / Personnel navigant commercial
PNT	Flight Crew	Personnel navigant technique
PTT	Push To Transmit	Bouton d'Alterna du microphone d'un pilote
QRH	Quick Reference Handbook	Recueil rapide de procédure
UTC	Coordinated Universal Time	Temps universel coordonné

SYNOPSIS

Étude Feu - Oxygène en cockpit Accident survenu à l'A320 immatriculé SU-GCC

ENQUETE DE SECURITE

Ouverture de l'enquête

À la suite de l'accident survenu le 19 mai 2016 en Méditerranée à l'Airbus A320 immatriculé SU-GCC et exploité par EgyptAir, une enquête de sécurité a été ouverte. En application des textes internationaux en vigueur et notamment de l'annexe 13 de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale, l'accident s'étant produit dans les eaux internationales, l'autorité en charge des enquêtes de sécurité de l'Égypte (EAAID), en sa qualité d'État d'immatriculation et d'exploitation de l'avion, a été chargé de l'enquête de sécurité.

Le BEA a nommé un représentant accrédité pour la France en tant qu'État de conception de l'avion, assisté de conseillers techniques du constructeur Airbus et de l'Agence européenne de la sécurité aérienne (AESA). L'autorité américaine en charge des enquêtes de sécurité (NTSB) a également nommé un représentant accrédité pour les États-Unis au titre d'État de construction des moteurs.

Conduite de l'enquête

Les recherches en mer ont permis de localiser l'épave et de récupérer les enregistreurs de vol. Début juillet 2016, l'extraction des données de l'enregistreur phonique (CVR) et de l'enregistreur de paramètres (FDR) a été réalisée sous l'autorité de l'enquêteur désigné égyptien, dans le laboratoire du BEA en France.

L'EAAID a communiqué publiquement les éléments suivants : un feu s'est déclaré à bord de l'avion et a été identifié par l'équipage ; les enregistreurs de vol se sont arrêtés alors que l'avion était encore en croisière à une altitude de 37 000 pieds.

Dans le cadre de l'enquête, le BEA a fait part à l'EAAID d'événements antérieurs impliquant des incendies en présence d'une fuite d'oxygène dans les cockpits au cours desquels était signalé un bruit de fuite comparable à celui présent sur l'enregistrement du CVR de cet événement.

Au mois de décembre 2016, l'EAAID a annoncé la découverte de traces d'explosifs sur des victimes et a indiqué que, conformément à la législation égyptienne, le dossier était transféré aux services du Procureur Général égyptien, qui assumait dès lors la conduite de l'enquête.

Le BEA n'a pas été en mesure de confirmer cette découverte. Par ailleurs, aucune autre information factuelle à disposition du BEA n'était en faveur de l'hypothèse de la survenue d'une explosion à bord de l'avion.

ETUDE FEU - OXYGENE

Déclenchement

Le BEA a proposé à l'EAAID de poursuivre les travaux sur l'accident en s'appuyant sur les événements précédemment identifiés. Devant l'impossibilité pour l'EAAID de continuer l'enquête de sécurité, le BEA a mené une étude sur les feux oxygénés dans le cockpit, convaincu qu'une analyse plus approfondie de l'accident du vol MS804 t pourrait fournir des enseignements de sécurité de nature à être partagés avec la communauté aéronautique internationale.

Périmètre

En cas de dépressurisation ou de présence de fumée, les membres d'équipage et les passagers peuvent avoir besoin d'utiliser de l'oxygène. À ce titre, les pilotes disposent de masques à pose rapide rangés dans des boîtes de rangement sur les côtés du cockpit.



L'étude menée par le BEA a porté sur les sujets suivants :

- les possibles mécanismes de déclenchement du feu et d'une fuite d'oxygène sous pression dans, ou à proximité, de la boîte de rangement du masque à oxygène ;
- la propagation d'un feu en présence d'une fuite d'oxygène sous pression ;
- les possibilités d'extinction de ce type de feu ;
- la caractérisation acoustique de ces phénomènes.

Les mécanismes de déclenchement du feu qui ont été étudiés portent notamment sur des sources extérieures de chaleur (batterie au lithium de dispositifs électroniques ou cigarette incandescente), une ignition interne aux flexibles ou l'inflammation de graisses et poussières dans l'environnement enrichi en oxygène.

Résultats des tests de feu alimenté par de l'oxygène sous pression

Les détails des tests et résultats obtenus sont résumés dans plusieurs vidéos (Voir Vidéos 1 et 2/4) et confirme qu'un bruit d'emballlement sonore comparable à celui produit par un chalumeau est présent lorsque l'ensemble du masque s'embrase alors que le système est alimenté par de l'oxygène sous pression. Dans ce cas, les flammes sont importantes et le feu se propage rapidement à l'environnement de la boîte de rangement.

Les résultats sur la façon dont le feu se propage dans l'environnement du système de distribution d'oxygène ont également fait l'objet d'une vidéo (Voir Vidéo 4/4)

Une vidéo (Voir Vidéo 3/4) montre enfin l'inadéquation de l'utilisation d'un extincteur au halon, présent à l'intérieur du cockpit du vol MS804 sur un feu alimenté par une fuite d'oxygène sous pression.

Résultats des travaux appliqués à l'accident du vol MS804

La séquence accidentelle a débuté alors que l'avion était en croisière à environ 37 000 pieds (soit environ 11 277 m), un PNC présent dans le cockpit, le commandant de bord se reposant sur son siège, le copilote aux commandes.

Le premier événement de la séquence accidentelle qui a pu être identifié a été un débit d'oxygène d'une durée de 2,6 secondes via le régulateur du masque du copilote. Ce débit a les mêmes caractéristiques qu'un appui sur le rotacteur *EMERGENCY* du masque alors que la boîte n'est pas réinitialisée. L'enquête n'a pas permis de déterminer si ce débit était lié à une action humaine.

La boîte de rangement du masque du copilote s'est retrouvée fortement enrichie en oxygène à la suite de ce débit. Un bruit transitoire de fort niveau, d'origine inconnue, a eu lieu à ce moment dans la boîte de rangement du masque. Il n'a pas été possible de déterminer ce qui a généré ce fort bruit. Moins d'une demi-seconde après, un bruit de débit d'oxygène est de nouveau apparu, de manière continue. Le feu a commencé dans la boîte de rangement du masque du copilote, et a été alimenté par la fuite d'oxygène sous pression. Il n'a pas été possible de déterminer ce qui est arrivé en premier : le feu ou la fuite d'oxygène, ni de déterminer l'origine du feu.

Quoi qu'il en soit, le feu alimenté en oxygène s'est propagé à l'extérieur de la boîte de rangement. Ce type de feu est rapide, d'ampleur importante et difficile à maîtriser. Il produit un bruit caractéristique comparable à celui d'un chalumeau. L'étude a montré que les moyens de protection et d'extinction disponibles à bord des avions ne sont pas suffisants pour le maîtriser.

Par la suite, le feu a très probablement endommagé des circuits d'alimentation de calculateurs, conduisant notamment à la déconnexion du pilote automatique. Aucune action de l'équipage n'est enregistrée dans le cockpit. Il n'a pas été possible de déterminer si l'équipage est resté ou non dans le cockpit, s'il s'y trouvait inconscient ou s'il a fui le feu puis est revenu ou est resté hors du cockpit. L'avion a suivi une trajectoire non contrôlée et est entré en collision avec la mer.

RECOMMANDATIONS DE SECURITE

L'étude a mis en évidence des enjeux de sécurité liés aux dispositifs oxygène présents dans les avions lourds de transport commercial.

La présence du dispositif de distribution d'oxygène a un impact double :

- (1) l'atmosphère peut se trouver enrichie en oxygène à proximité du dispositif d'alimentation, soit en raison de micro-fuites, de tests du masque ou d'une rupture d'un élément du dispositif d'alimentation. La présence d'oxygène rend les éléments plus inflammables et un départ de feu plus probable ;
- (2) un feu qui endommage les circuits oxygène, s'il provoque la rupture d'un flexible, entraîne alors un feu enrichi en oxygène qui devient difficilement maîtrisable.

La certification exige que l'occurrence d'un feu oxygéné non contrôlé soit extrêmement improbable. L'occurrence de plusieurs événements en vol et au sol, a amené à considérer outre les moyens de prévention de ces incendies, leur propagation et les moyens de lutter contre.

Poursuite de travaux en considérant les effets d'une surpression dans le circuit oxygène

Les essais effectués par le BEA dans le cadre de cette étude ont été réalisés avec le postulat que la pression dans le circuit était de 5 bar. Les mécanismes d'ignition interne tels que l'impact de particules, l'oxydation de graisse ou l'inflammation par décharge électrostatique peuvent dépendre de la pression d'oxygène. De même, la fragilité créée par une source externe d'inflammation à proximité pourrait être supérieure en cas de fuite à haute pression.

En conséquence, le BEA recommande que l'AESA en collaboration avec les constructeurs conduise des analyses de risque complémentaires pour prendre en compte l'hypothèse d'une surpression dans le circuit de distribution et ses conséquences en termes de mécanismes de défaillances. Les résultats devront notamment être analysés au regard de facteurs explicatifs potentiels de l'accident du vol MS804. Ces analyses pourront nécessiter la conduite d'essais complémentaires dans le cadre d'un programme de recherche. [FRAN-2023-024]

Propagation d'un feu alimenté par une fuite d'oxygène

Les événements et les essais réalisés ont mis en évidence l'ampleur de l'embrassement et la vitesse de propagation du feu dans le cas d'un feu alimenté par une fuite d'oxygène. Ces feux produisent un son caractéristique, comparable à celui d'un chalumeau et une chaleur importante (reconnaissable à la blancheur de la flamme).

Deux événements au sol et les essais ont montré que les extincteurs au halon ne sont pas indiqués pour traiter les feux alimentés par une fuite d'oxygène.

Dans les événements au sol, les équipages n'ont pas réussi à maîtriser les incendies et ont évacué le cockpit. En vol, la lutte contre un feu enrichi en oxygène nécessite de stopper sans délai l'apport d'oxygène.

En conséquence, le BEA recommande que l'AESA évalue la pertinence que les procédures feu/fumée dans le cockpit intègrent une reconnaissance d'un feu oxygéné (identifiable par un bruit caractéristique comparable à celui d'un chalumeau) et une coupure immédiate de l'arrivée d'oxygène dans ce cas, et qu'elle revoie le cas échéant les exigences d'installation et d'export de moyens de protection indépendants du système de distribution d'oxygène. [FRAN-2023-025]

Risque lié à l'utilisation de cigarettes dans le cockpit

La réglementation internationale n'est pas explicite quant à l'interdiction de fumer dans le cockpit des avions de transport commercial. Autant il existe des mises en garde sur le fait de fumer à proximité de l'oxygène dans l'espace passager autant il n'existe rien concernant celui du cockpit. La décision semble être du ressort du commandant de bord.

Il n'a pas été établi de danger systématique et évident à fumer à proximité d'une boîte de rangement du masque à oxygène même avec un masque en position *EMERGENCY* ou une boîte non resetée. Cependant, en cas d'introduction de la cigarette dans la boîte de rangement, événement qui paraît improbable néanmoins possible, un départ de feu, accompagné d'une fuite en oxygène, est possible. Dans ce cas les flammes sont importantes et le feu se propage rapidement à l'environnement de la boîte de rangement.

En conséquence, le BEA recommande que l'AESA s'assure que le danger représenté par une cigarette incandescente dans le cockpit soit pris en compte et les risques associés évalués et que la réglementation de certification ou opérationnelle soit amendée le cas échéant. [FRAN-2023-026]

1 CONTEXTE

À la suite de l'accident survenu le 19 mai 2016 en Méditerranée à l'Airbus A320 immatriculé SU-GCC et exploité par EgyptAir, une enquête de sécurité a été ouverte. En application des textes internationaux en vigueur, l'accident s'étant produit dans les eaux internationales, l'autorité en charge des enquêtes de sécurité de l'Égypte (EAAID), en sa qualité d'État d'immatriculation et d'exploitation de l'avion, a été chargée de la conduite de cette enquête.

Le BEA a nommé un représentant accrédité pour la France en tant qu'État de conception de l'avion, assisté de conseillers techniques du constructeur Airbus et de l'AESA. L'autorité américaine en charge des enquêtes de sécurité (NTSB) a également nommé un représentant accrédité pour les États-Unis au titre de État de construction des moteurs.

Les recherches en mer ont permis de repérer l'épave et de récupérer les deux enregistreurs de vol. Les travaux initiaux sur les enregistreurs ont été conduits sous l'autorité de l'enquêteur désigné égyptien, dans le laboratoire du BEA, et ont permis, début juillet 2016, l'extraction, la lecture et le décodage des données de l'enregistreur phonique (CVR) et de l'enregistreur de paramètres (FDR).

Au cours de ces travaux, l'EAAID a publié les éléments suivants concernant l'accident :

- les enregistreurs ont cessé de fonctionner alors que l'avion était en croisière à 37 000 ft d'altitude ;
- les systèmes de l'avion ont émis des messages ACARS faisant état de fumée dans des toilettes et dans la baie avionique ;
- les données de l'enregistreur de paramètres confirment ces messages ;
- l'écoute de l'enregistreur phonique indique notamment que l'équipage de conduite a mentionné l'existence d'un feu à bord ;
- plusieurs débris ont été remontés depuis le site de l'accident. Certains d'entre eux portaient des traces de haute température et de suie.

Au mois de décembre 2016, l'EAAID a annoncé la découverte de traces d'explosifs sur des restes humains et indiqué que, conformément à la législation égyptienne, cela le conduisait à transférer le dossier aux services du Procureur Général égyptien, qui assumait dès lors la conduite de l'enquête.

Le BEA a proposé à l'EAAID des travaux complémentaires sur les débris et les données enregistrées pour mieux comprendre la séquence des événements.

En effet, sur la base des premières constatations sur les débris et des premières analyses de données issues des enregistreurs, l'hypothèse privilégiée par le BEA est qu'un incendie s'est déclaré dans le cockpit alors que l'avion évoluait à son altitude de croisière, incendie qui s'est développé rapidement et a entraîné la perte de contrôle de l'avion.

En complément, le BEA a recherché des événements antérieurs impliquant des incendies dans les cockpits ; mettant l'accent sur ceux au cours desquels était signalé un bruit comparable à un fort sifflement¹ comme c'est le cas sur l'enregistrement du CVR du vol MS804.

Trois événements s'étant produits au sol, pour lesquels l'enregistrement du CVR était disponible, ont été identifiés. D'un point de vue psycho acoustique le fort sifflement audible sur le CVR du vol

¹ Bruit semblable à celui produit par la fuite d'un gaz sous pression.

MS804 présente des similarités avec ceux enregistrés lors de ces événements. Les trois correspondent à des fuites sur les systèmes oxygène dans les cockpits. (voir § 3)

Ces événements ont amené le BEA à être convaincu qu'il y avait très probablement des enseignements de sécurité de nature à être partagés avec la communauté aéronautique internationale qui viendraient d'une analyse de sécurité plus approfondie de l'accident survenu au SU-GCC. Aussi le BEA a-t-il proposé la poursuite des travaux à son homologue égyptien. Devant l'impossibilité pour l'EAAID de reprendre l'enquête de sécurité, le BEA a poursuivi l'analyse de l'événement et mené une étude sur les feux oxygénés dans le cockpit.

Ce travail a amené le BEA à conclure qu'il existait effectivement des enseignements de sécurité de nature à être partagés avec la communauté internationale et des enjeux de sécurité qui conduisaient à émettre des recommandations de sécurité. Le BEA a rédigé le présent document qui décrit les travaux menés, les conclusions que l'on peut en tirer ainsi que les recommandations qui en découlent.

Le BEA a envoyé ce document, à l'état de projet, à l'autorité d'enquête de sécurité de l'Égypte (EAAID) ainsi qu'à celle des États-Unis (NTSB) en les invitant à confirmer qu'ils n'avaient pas d'objection à sa publication.

L'EAAID a signifié son objection à la publication d'informations ou de données relatives au vol MS804. L'EAAID s'est engagé à reprendre l'enquête de sécurité et à préparer un projet de rapport final dans les six mois à venir.

Le BEA, en vertu du standard 6.8 de l'Annexe 13² relatif à la faculté donnée aux États participant à l'enquête d'émettre des recommandations de sécurité après coordination avec l'État qui mène l'enquête, a pris la décision d'émettre des recommandations de sécurité et d'y joindre le document qui vient les étayer.

Ce document a été envoyé à l'AESA de manière confidentielle, l'AESA est autorisée à partager ce document, de manière confidentielle, uniquement aux personnes ayant besoin d'être impliqués dans le traitement des recommandations.

Le présent document comporte ainsi les éléments suivants.

La première partie (§ 2) décrit les exigences réglementaires relatives au dispositif oxygène dans le cockpit et aux moyens de lutte contre l'incendie.

La deuxième partie (§ 3) décrit quatre événements s'étant produits au sol faisant intervenir un feu et une fuite d'oxygène.

La troisième partie (§ 4) est dédiée à la description et à la compréhension de la séquence de l'accident du SU-GCC.

La quatrième partie (§ 5) présente les examens menés pour appréhender :

- certains mécanismes d'inflammation (ignition) susceptibles d'affecter le système oxygène du cockpit ;

² Annexe 13 à la Convention relative à l'aviation civile internationale.

- la propagation d'un feu alimenté par une fuite d'oxygène ;
- les moyens d'extinction d'un feu enrichi en oxygène disponibles dans le cockpit.

La cinquième partie (§ 6) apporte des conclusions partielles sur l'accident du SU-GCC et développe les enjeux de sécurité qui en découlent.

Enfin, dans une sixième partie (§ 7) des recommandations de sécurité sont émises vers l'AESA et les constructeurs. Ces recommandations portent sur la poursuite des travaux, les procédures de lutte contre les feux enrichis en oxygène en cockpit et la réglementation concernant l'interdiction de fumer dans un cockpit.

2 LE SYSTÈME OXYGÈNE ET LUTTE CONTRE INCENDIE DANS LE COCKPIT

En cas de dépressurisation ou de présence de fumée, les membres d'équipage et les passagers peuvent avoir besoin d'utiliser de l'oxygène.

Les avions lourds de transport commercial à turboréacteurs sont le plus souvent équipés de trois systèmes d'oxygène distincts :

- de l'oxygène disponible directement dans le cockpit pour l'équipage ;
- de l'oxygène disponible dans la cabine, au-dessus de chacun des sièges, pour les passagers et le personnel navigant commercial ;
- de l'oxygène portable pour l'équipage ou les passagers utilisé en cas d'urgence ou lors de l'administration de premiers secours.

Ce chapitre est dédié au système d'oxygène présent dans le cockpit et à destination de l'équipage.

2.1 Emport d'Oxygène – Exigences règlementaires

Pour les avions pressurisés exploités à des altitudes pression supérieures à 25 000 ft, l'exigence règlementaire CAT.IDE.235 du règlement européen consolidé (UE) n° 965/2012, dit « Air Ops » indique que l'emport d'oxygène doit couvrir, pour tous les membres d'équipage la quantité correspondant aux temps de vol avec une altitude cabine supérieure à 13 000 ft et au temps de vol – 30 minutes à une altitude cabine entre 10 000 et 13 000 ft et en aucun cas moins de deux heures de vol.

Des masques à mise en place rapide doivent être disponibles pour les pilotes. Ce type de masque :

(a) peut être placé sur le visage à partir de la position de pilotage, correctement fixé, scellé et fournissant de l'oxygène à la demande, d'une seule main et en moins de 5 secondes, et reste ensuite en position, les deux mains étant libres ;

(b) peut être mis en place sans interférer avec le port de lunettes de vue et sans retarder le pilote dans l'exécution des tâches d'urgence qui lui sont assignées ;

(c) une fois mis en place, n'empêche pas la communication immédiate entre les membres de l'équipage de conduite et les autres membres de l'équipage par l'intermédiaire du système d'intercommunication de l'aéronef ; et

(d) n'empêche pas les communications radio.

Pour les avions de plus de 5 670 kg, le matériel dédié à l'emport d'oxygène doit répondre aux spécifications de certification décrites principalement dans les paragraphes CS25.869 et CS25.1441 (ou l'équivalent FAR).

Le CS25.869 indique que le système doit être installé de telle façon qu'une fuite d'oxygène ne puisse causer l'ignition de graisse, fluide ou vapeurs présentes dans les conditions normales d'utilisation ou résultant d'une défaillance ou dysfonctionnement d'un système.

Le CS25.1441 ajoute que le système oxygène doit être exempt de dangers intrinsèques, dans son utilisation et dans ses effets sur les composants environnants.

Le moyen de conformité AMC 25.1441 détaille les analyses de risques qui peuvent être menées pour répondre à ces exigences.

Concernant l'installation du système oxygène, outre les exigences décrites dans le CS25.869, l'AMC au CS 25.1441(b) indique que les potentielles sources externes d'ignition doivent être étudiées et les risques associés minimisés.

Les compartiments dans lesquels les systèmes oxygène sont installés doivent apporter une protection adéquate contre une possible contamination ; ces compartiments doivent être ventilés de façon adéquate et le circuit d'acheminement doit être isolé.

De plus, l'analyse de danger relative à l'oxygène doit permettre de montrer que les systèmes oxygène et leurs composants sont conçus de telle sorte que l'occurrence d'un feu oxygéné non contrôlé au niveau de l'avion soit extrêmement improbable et ne résulte pas d'une défaillance unique. Cette analyse doit évaluer les mécanismes de combustion et d'ignition et notamment les aspects suivants :

- défaillance d'un équipement (en excluant les défaillances dues à des erreurs humaines lors de l'assemblage) ;
- conditions d'utilisation ;
- composants et matériels, en considérant en particulier les températures d'auto-ignition en atmosphère enrichie en oxygène à 100 % ;
- mécanismes d'ignition,

l'analyse doit traiter les possibles mécanismes d'ignition internes, en considérant au minimum : l'impact de particules³, la compression adiabatique⁴, la friction du fluide⁵, la résonance⁶, l'impact mécanique⁷, la friction mécanique⁸, l'exposition de métal à la corrosion⁹, la décharge électrostatique¹⁰, l'arc électrique¹¹, la réaction chimique¹² et l'emballement thermique¹³,

³ *Particle impact* (chaleur générée lorsque des petites particules frappent un matériau avec une vitesse suffisante pour enflammer le matériaux et/ou la particule).

⁴ *Rapid pressurization* (chaleur générée lors de la compression rapide d'un gaz (généralement inférieure à une seconde) d'une basse pression à une pression élevée).

⁵ *Flow friction* (chaleur générée par le flux d'oxygène le long d'un polymère et l'apparition d'érosion, friction et/ou vibration).

⁶ *Resonance* (chaleur générée par des oscillations acoustiques au sein de cavités résonatrices qui causent une augmentation rapide de température).

⁷ *Mechanical impact* (chaleur générée par un impact ou plusieurs impacts sur un matériaux avec une énergie suffisante pour l'enflammer).

⁸ *Galling and friction* (chaleur générée par les frottements de deux pièces entre elles).

⁹ *Fresh metal exposure* (chaleur générée par l'oxydation d'un métal non oxydée dans une atmosphère oxydante).

¹⁰ *Static discharge* (chaleur générée par la décharge de charges électrostatiques accumulées, avec une énergie suffisante pour enflammer le matériel).

¹¹ *Electrical arc* (chaleur générée par un courant électrique suffisant pour créer un arc depuis une source d'électricité et capable d'enflammer les matériaux).

¹² *Chemical reaction* (chaleur générée par la combinaison de composés chimiques capable d'enflammer les matériaux environnants).

¹³ *Thermal runaway* (chaleur générée par l'accumulation de matériaux liquides ou solides qui peuvent subir des réactions exothermiques autoentretenues).

- chaîne de propagation,
l'analyse doit s'intéresser à la capacité d'un feu à se propager et à brûler un composant. Si l'un des mécanismes d'ignition existe, la chaîne de propagation doit être étudiée.

En complément, les éléments de conception suivants doivent être considérés : Valve haute pression, limiteur de pression, isolation, matériau des flexibles, mise à la terre, joints, systèmes de recharge.

Note :

Pour résumer, le système oxygène doit être installé de telle sorte

- 1. Que les impacts d'une source d'ignition externe soient minimisés*
- 2. Que l'environnement proche soit préservé, c'est-à-dire qu'une fuite d'oxygène ne peut pas provoquer l'ignition de substances à proximité*
- 3. Enfin, le système doit être conçu de telle sorte que la défaillance seule d'un de ses composants ne conduise pas à un feu incontrôlé au niveau avion et que dans tous les cas, un tel feu soit extrêmement improbable*

Pour cela, l'analyse de risque du système oxygène doit notamment s'intéresser aux défaillances des différents composants, aux cas d'utilisation les plus défavorables, aux propriétés des matériaux et aux mécanismes d'ignition internes. Si un mécanisme d'ignition interne existe, la chaîne de propagation du feu associé doit être étudiée.

Dans le reste du document, on emploiera indifféremment les termes ignition et inflammation. On parlera de mécanismes d'ignition externes lorsqu'il s'agit d'éléments se trouvant à l'extérieur du dispositif oxygène, c'est-à-dire d'éléments se trouvant à l'origine en dehors des boîtes de rangement des masques, par exemple l'emballage d'une batterie lithium d'un appareil se trouvant dans le vide-poche à proximité.

On parlera de mécanismes d'ignition internes lorsqu'il s'agit de sources se trouvant à l'intérieur du dispositif oxygène, par exemple la chaleur dégagée par la collision d'une particule métallique contre une paroi.

2.2 Descriptif du système oxygène du cockpit d'un avion de transport commercial

Sur la plupart des avions lourds de transport commercial à réaction, une réserve d'oxygène est stockée dans une ou plusieurs bouteilles (capacité de 1 400 à 3 200 l) sous haute pression (supérieure à 100 bar) localisée(s) sous le plancher du cockpit. Un circuit de distribution permet la circulation de l'oxygène sous pression (environ 5 bar) depuis la bouteille, via un détendeur, vers des masques qui sont localisés de chaque côté du cockpit. Ces masques sont positionnés afin d'équiper en cas de besoin les deux pilotes et deux personnes qui pourraient se trouver assises sur les sièges amovibles (strapontins) du cockpit.

Sur certains avions, l'équipage peut contrôler l'arrivée d'oxygène dans le circuit via un panneau de contrôle localisé dans le cockpit qui agit sur une électrovanne (position ouverte ou fermée). En retour, l'équipage dispose sur les écrans de l'information de la pression d'oxygène dans la bouteille.

Les masques sont rangés dans des boîtes métalliques sur les côtés des sièges et restent facilement accessibles par l'équipage. L'extraction du masque doit pouvoir se faire à une seule main et en un seul geste pour permettre le gonflage du harnais, l'installation du masque sur le visage, et enfin le serrage du harnais.

Les masques sont composés d'une visière et d'un régulateur (détendeur) permettant d'envoyer de l'oxygène à une pression proche de la pression ambiante, à chaque inspiration du pilote. Un rotacteur *EMERGENCY*, localisé sur le régulateur du masque permet de produire une surpression permanente de quelques millibars dans la cavité oro-nasale et un débit permanent de quelques litres d'oxygène dans la cavité oculaire, et ainsi d'éviter l'introduction de pollution (fumées).

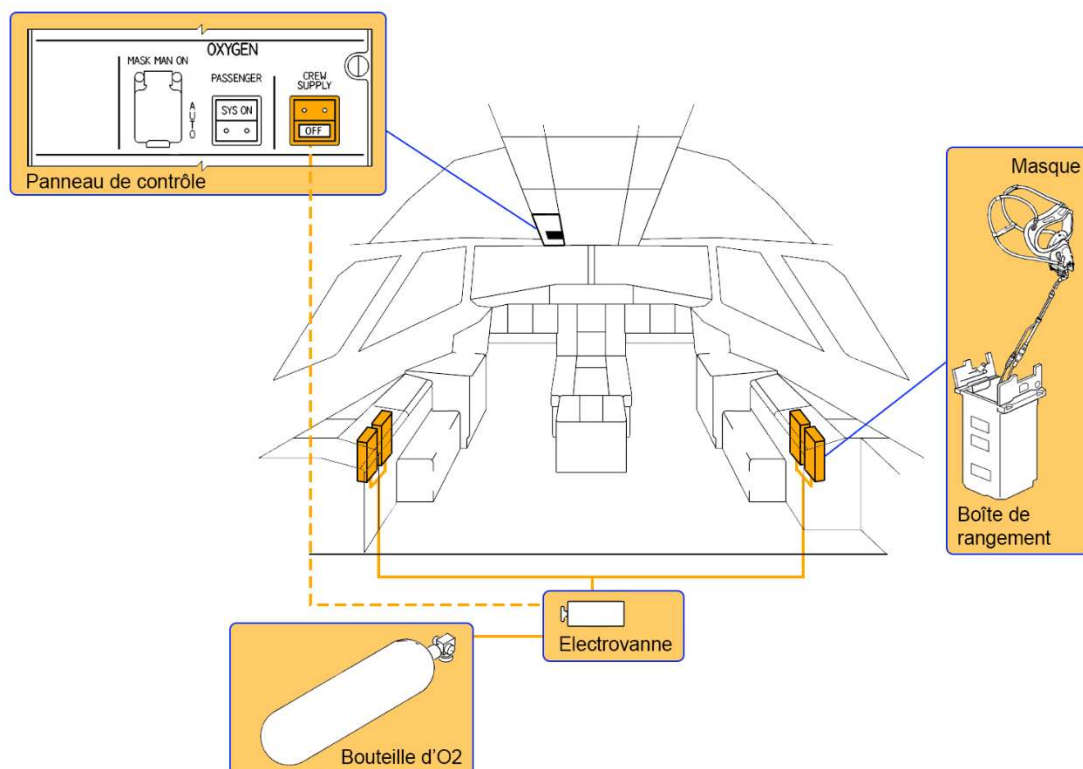


Figure 1 : description du système oxygène du cockpit d'un avion de transport commercial

Certains avions sont équipés de fusibles sur le circuit d'oxygène à proximité de chaque boîte de rangement de masque. Ces fusibles se ferment et coupent ou limitent la circulation d'oxygène vers le masque associé lorsqu'une fuite est détectée en aval.

2.3 Moyens de lutte contre incendie

2.3.1 Moyens d'extinction

Les systèmes de protection et de lutte contre l'incendie de la plupart des avions lourds de transport commercial comprennent :

- les systèmes de détection et d'extinction des incendies et des surchauffes pour les moteurs et l'APU ;
- les systèmes de détection des fumées et d'extinction pour les soutes à bagages et les toilettes ;
- la détection des fumées pour la/les baie(s) avionique(s) ;
- des extincteurs portatifs pour le cockpit et la cabine passagers.

La réglementation CAT.IDE.A.250 indique que le type et la quantité d'agents extincteur doivent être adaptés aux feux susceptibles de se produire dans le cockpit. L'AMC CAT IDE.A.250b précise qu'au moins un extincteur doit être présent dans le cockpit et celui-ci doit être adapté à la lutte contre les feux de liquides et les feux d'équipements électriques.

Historiquement, le Halon 1211¹⁴¹⁵ a été l'agent le plus répandu dans les extincteurs portatifs utilisés dans les avions. Les normes minimales de performance (MPS) pour les agents extincteurs sont définies à l'annexe A du rapport DOT/FAA/AR-01/37 d'août 2002, tandis que les critères acceptables pour sélectionner les extincteurs contenant ces agents sont définis dans la circulaire consultative AC 20-42C de la FAA.

Le halon est amené à disparaître des cockpits à brève échéance (d'ici fin 2025), l'usage de ce gaz étant bientôt interdit pour des raisons environnementales.

Trois agents alternatifs au halon sont actuellement connus et satisfont au MPS :

- le HFC-227ea ;
- le HFC-236fa ;
- le HFC Blend B.

2.3.2 Équipements respiratoires de protection

L'exigence réglementaire européenne CAT.IDE.A.245 de l'Air Ops précise que tous les avions pressurisés doivent être équipés d'un équipement respiratoire de protection (PBE) destiné à protéger les yeux, le nez et la bouche et à fournir, pendant une période d'au moins 15 minutes, de l'oxygène pour chaque membre de l'équipage de conduite.

L'AMC1 CAT.IDE.A.245 précise que cette fonction peut être remplie par les masques à mise en place rapide.

¹⁴ CF2ClBr – Bromochlorodifluorométhane.

¹⁵ AMC 25.851 (c)



Figure 2 : équipement respiratoire fixe (à mise en place rapide)

En complément, l'Air Ops dans sa partie CAT indique que les avions doivent être équipés d'un PBE portable supplémentaire installé à côté de l'extincteur manuel. Cette disposition n'est pas celle adoptée par certaines compagnies. En particulier, récemment certaines ont modifié leur configuration en installant un extincteur derrière le commandant de bord et une cagoule derrière le copilote.



Figure 3 : équipement respiratoire portable



Airbus A320

Boeing 777

Figure 4: exemples d'installation de PBE sur avion de transport commercial

2.3.3 Fumer dans un cockpit

L'interdiction de fumer dans les avions est effective sur les vols nationaux et internationaux dans la plupart des pays depuis les années 1990. La Chine est citée comme le dernier pays ayant autorisé les pilotes à fumer dans le cockpit (jusqu'en 2019).

Pour les aéronefs de transport commercial, la spécification de certification européenne CS25.853 indique : Fumer n'est pas autorisé dans les toilettes. Si fumer est autorisé dans les espaces occupés par l'équipage ou les passagers, un nombre adéquat de cendriers indépendants et amovibles doit être fourni dans les zones fumeurs.

En Europe, l'exigence réglementaire CAT.OP.MPA.240 de l'Air Ops précise que le commandant de bord n'autorise personne à fumer à bord :

- a) lorsqu'il l'estime nécessaire dans l'intérêt de la sécurité ;
- b) pendant l'avitaillement et la reprise de carburant de l'aéronef ;
- c) lorsque l'aéronef se trouve sur la piste, sauf si l'exploitant a déterminé des procédures pour limiter les risques pendant les opérations au sol ;
- d) en dehors des zones pour fumeurs désignées, dans les couloirs et les toilettes ;
- e) dans les compartiments cargo et/ou dans toute autre zone où des marchandises sont transportées sans être conditionnées dans des conteneurs résistants au feu ou recouvertes d'une bâche résistante au feu ; et
- f) dans toute partie de la cabine passagers où de l'oxygène est fourni.

Les constructeurs fournissent toujours des cendriers. Dans les toilettes, cela correspond à une exigence de certification de type. En ce qui concerne le cockpit, l'installation de cendriers reste en option à la demande de la compagnie cliente.



Figure 5 : exemple de cendrier dans un cockpit d'Airbus A330 (Source : BEA)



Figure 6 : exemple de cendrier dans un cockpit de Boeing 777 (Source : BEA)

3 ACCIDENTS, ANTÉRIEURS À L'ACCIDENT SURVENU AU SU-GCC, LIÉS A UN FEU ET AU DISPOSITIF OXYGÈNE DU COCKPIT

Les événements décrits ci-dessous ont été retenus selon les critères suivants :

- une fuite d'oxygène et un feu ont été identifiés et l'intensité du feu a été aggravée par la fuite d'oxygène ;
- pour tous, les autorités en charge de l'enquête indiquent un sifflement correspondant à un bruit d'une fuite sous pression ;
- pour trois d'entre eux, l'enregistrement phonique était disponible
- les sons enregistrés pendant ces événements montrent de grandes similarités avec ceux de l'enregistrement du vol MS804.

Les événements décrits ci-dessous se sont déroulés au sol. Aucune particularité liée à cette spécificité n'a été identifiée. En d'autres termes, les scénarios accidentels sont transposables en vol et peuvent être rapprochés de celui de l'accident du vol MS804 survenu en vol.

3.1 Accident survenu au Boeing 767 cargo immatriculé N799AX en 2008

L'accident s'est produit le 28 juin 2008 au sol à San Francisco. Le [rapport d'enquête du NTSB](#) comporte des recommandations sur la conception des flexibles oxygène.

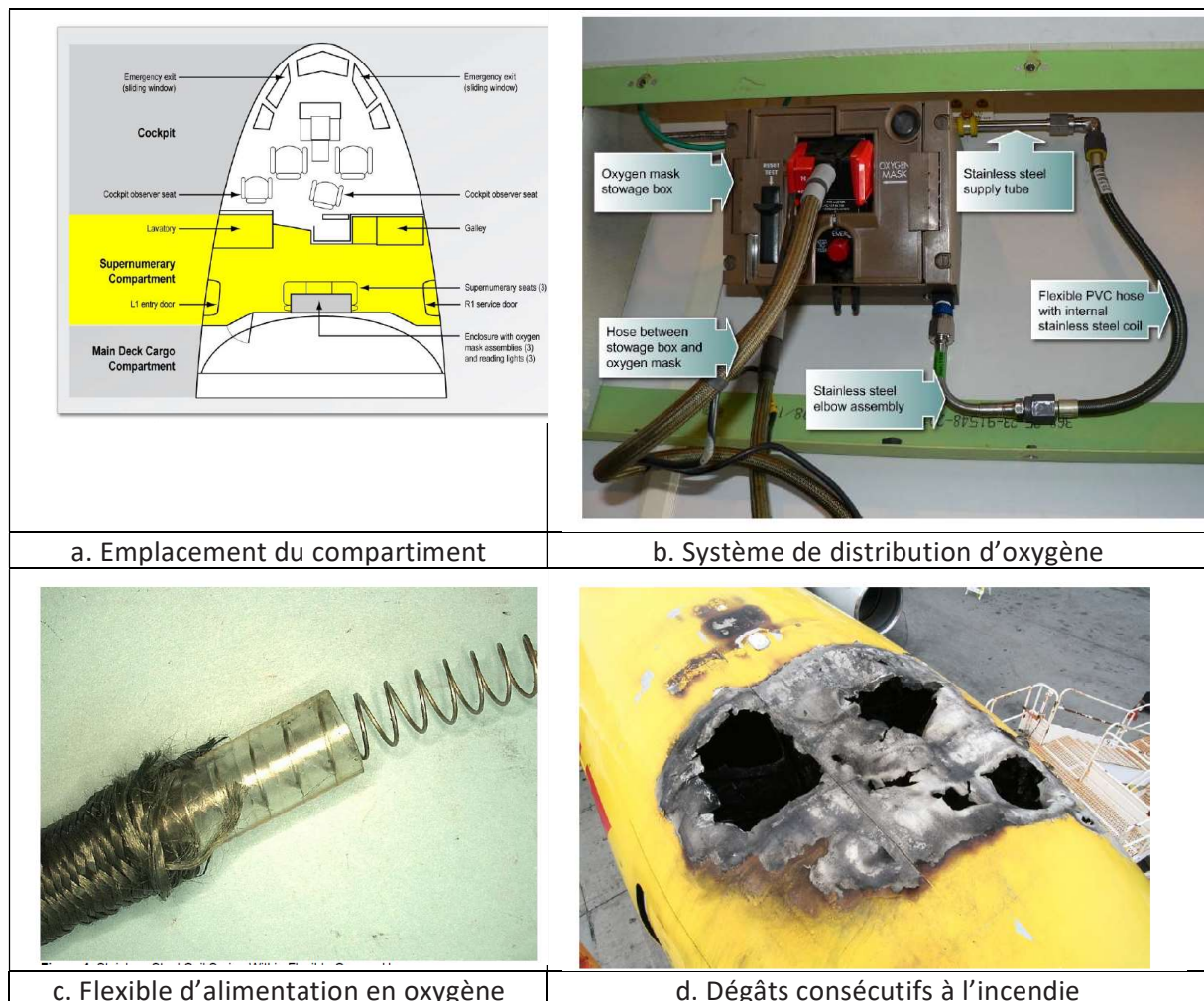


Figure 7 : extraits du rapport d'enquête (source NTSB)

L'incendie s'est produit lors de la préparation du vol, dans le compartiment entre le cockpit et l'espace cargo (voir **Figure 7 a**).

Le commandant de bord et le copilote ont évacué l'avion par les fenêtres du cockpit après avoir fermé la porte du cockpit et demandé l'intervention des pompiers. L'avion a été considéré comme détruit en raison de l'ampleur des dégâts (voir **Figure 7 d**).

Le compartiment où s'est produit l'incendie comportait trois masques à oxygène alimentés par une bouteille d'oxygène indépendante de l'alimentation en oxygène du cockpit.

L'enquête a montré qu'un court-circuit a mis sous tension le ressort présent dans les flexibles d'oxygène et que celui-ci est devenu une source d'inflammation ; le tuyau s'est enflammé et l'oxygène a favorisé la combustion. L'incendie s'est propagé aux matériaux adjacents.

Les pilotes ont déclaré qu'en exécutant la check-list de démarrage du moteur, ils ont entendu de forts bruits de "pop" et de "sifflement". Cela a été confirmé par l'analyse spectrale de l'enregistrement du CVR, qui montre que l'événement commence par un bruit transitoire, immédiatement suivi d'un sifflement important. Le sifflement a été enregistré pendant environ une minute, jusqu'à ce que le CVR soit mis hors tension. Les bruits de claquement et de sifflement correspondent à l'inflammation d'un tuyau d'oxygène par une source de chaleur interne plutôt qu'externe.

D'un point de vue psycho-acoustique, cet enregistrement présente des similitudes avec le CVR du MS804.

Enseignement – Résultat intermédiaire

Le mécanisme en jeu dans l'accident du N799AX est une ignition interne au circuit (liée au design des flexibles) qui a provoqué une rupture du flexible d'oxygène et en conséquence un feu alimenté par une fuite d'oxygène qui a conduit à la destruction de l'avion. L'équipage a évacué l'avion sans tenter d'éteindre l'incendie.

3.2 Accident survenu au CRJ 200 immatriculé N830AS en 2009

L'accident s'est produit au sol à Tallahassee le 28 février 2009.

Le [rapport d'enquête du NTSB](#) indique que l'incendie s'est produit dans le cockpit. Un PNC et le commandant de bord de l'avion ont perçu un sifflement inhabituel, rapidement suivi de fumée et de signes d'incendie. Ils ont évacué l'avion.

L'enquête a déterminé que l'incendie s'est déclaré dans la partie supérieure d'une boîte de jonction qui contient des composants associés à la distribution de l'énergie électrique provenant de l'APU ou d'une alimentation externe en courant alternatif.

Le feu a enflammé des matériaux combustibles et s'est propagé vers le haut en direction d'une conduite d'oxygène flexible montée au-dessus de la boîte de jonction. Le masque à oxygène du troisième membre d'équipage était installé dans la partie supérieure avant de la penderie.

La conduite d'oxygène flexible s'est enflammée lorsqu'elle a été exposée au feu, et l'incendie a traversé le fuselage de l'avion.

Après l'événement, il a été constaté que l'indicateur de pression de la bouteille d'oxygène alimentant le cockpit indiquait 0 psi (montrant qu'elle s'était vidée pendant l'événement) et que les flexibles du masque à oxygène du troisième membre d'équipage avaient été endommagés.

Un sifflement est audible sur le CVR pendant environ dix secondes, après quoi le CVR a été mis hors tension.

Enseignement – Résultat intermédiaire

Le mécanisme en jeu dans l'accident du N830AS est un endommagement du circuit oxygène par un feu déclaré à proximité. Le feu a provoqué une rupture du flexible d'oxygène et en conséquence un feu alimenté par une fuite d'oxygène. L'équipage a évacué l'avion sans tenter d'éteindre l'incendie.

3.3 Accident survenu au Boeing 777-200 immatriculé SU-GBP en 2011.

L'accident s'est produit au sol au Caire le 29 juillet 2011. Le [rapport d'enquête de l'EEAID](#) indique que du feu et de la fumée sont apparus à droite du copilote à la suite d'un bruit sec et d'un sifflement.

Le commandant de bord a demandé au copilote de quitter le cockpit et d'avertir l'équipage de l'incendie. Le commandant de bord a utilisé l'extincteur du cockpit, situé derrière son siège, pour combattre l'incendie. Cette tentative a été infructueuse, le feu a continué à se propager dans le cockpit.



Figure 8 : Extraits du rapport d'enquête (source EEAID)

Les éléments recueillis dans le cadre de l'enquête n'ont pas permis de déterminer si la rupture du système d'oxygène s'est produite en premier créant un environnement inflammable, ou si la rupture du système d'oxygène s'est produite à la suite de l'incendie de l'avion.

Le rapport indique que l'accident pourrait être lié aux causes probables suivantes :

1. Un défaut électrique ou un court-circuit provoquant un échauffement électrique des tuyaux flexibles du système d'oxygène (Court-circuit électrique ; un contact entre le câblage de l'aéronef et les composants du système d'oxygène peut être possible si plusieurs serre-fils sont manquants ou cassés, ou si les fils ont été mal installés).
2. Exposition au courant électrique.

Enseignement – Résultat intermédiaire

Le mécanisme en jeu dans l'accident du SU-GBP n'a pas été déterminé : il est possible qu'il s'agisse d'un endommagement du circuit oxygène par un feu déclaré à proximité ou d'une rupture d'un flexible qui a créé un environnement inflammable. L'équipage a utilisé un extincteur au halon qui n'a pas permis d'éteindre le feu.

3.4 Accident d'un Boeing 737 survenu en 2012

L'accident s'est produit au sol pendant le repoussage. L'autorité en charge de l'enquête de sécurité n'a pas publié de rapport à ce jour et a rapporté les informations suivantes au BEA.

Une fuite d'oxygène et un incendie se sont déclarés dans le cockpit du côté du commandant de bord. Deux secondes après le début de la fuite, le copilote aurait annoncé le problème et évoqué du parfum. Le commandant de bord aurait demandé aux pilotes de sortir du cockpit et demandé un extincteur. Un extincteur a été percuté une minute après. Les passagers ont été évacués et les pompiers sont intervenus pour maîtriser l'incendie. L'incendie a provoqué d'importants dommages dans le cockpit, y compris dans les baies électriques et avioniques, et des dommages causés par la chaleur sur le revêtement extérieur.



Figure 9 : extraits du projet de rapport d'enquête (Source : autorité d'enquête)

L'équipage aurait rapporté qu'il avait vu une boule d'étincelles se diriger vers le masque à oxygène du commandant de bord et que le masque et son environnement se seraient enflammés avec un bruit d'oxygène qui s'échappait. Le feu aurait été hors de contrôle et les flammes très hautes en un laps de temps d'environ cinq secondes. Une fumée noire épaisse se serait échappée du cockpit.

Le commandant de bord aurait essayé de stopper la fuite en pliant le flexible du masque et aurait essayé d'éteindre le feu avec un extincteur au halon. Il aurait ensuite indiqué que ce feu n'était pas un feu à éteindre avec ces extincteurs.

L'autorité d'enquête a rapporté les constats suivants :

- après l'événement, le masque à oxygène du commandant de bord se trouvait sur le plancher, à droite du levier de commande ;
- le masque avait été laissé en position *EMERGENCY* ;
- le commandant de bord a allumé une cigarette 2 min 21 avant le début de la fuite.

Des questions subsistent sur le scénario de l'événement.

L'événement commencerait par une première fuite continue d'oxygène pur, puis la propagation de cette fuite d'oxygène dans le cockpit, le début de l'incendie à la suite de la rencontre avec du parfum et le feu d'une cigarette puis par la propagation de l'incendie à l'intérieur du cockpit à la suite de l'ouverture de la boîte de rangement du masque par le commandant de bord dans le but d'intervenir dans la phase de lutte contre l'incendie.

Selon les éléments communiqués par l'autorité d'enquête, le CVR aurait enregistré un premier sifflement pendant 3,5 secondes. Une brève interruption du sifflement serait perceptible pendant moins de deux secondes. Un nouveau sifflement serait perceptible pendant moins d'une seconde, suivi d'une augmentation du volume. La durée totale serait de 5 minutes 17. Après le sifflement initial, une lente diminution de l'intensité serait audible jusqu'à la fin du fonctionnement du CVR. Cette diminution pourrait s'expliquer par une dégradation progressive du microphone du cockpit.

Enseignement – Résultat intermédiaire

Le mécanisme en jeu dans l'accident n'a pas été déterminé avec certitude : il s'agirait d'une première fuite qui au contact d'une source de chaleur extérieure aurait provoqué un incendie alimenté ensuite par un débit d'oxygène en provenance d'un masque en position *EMERGENCY* sorti de sa boîte. L'équipage aurait souligné la rapidité et l'ampleur de l'incendie. L'équipage aurait utilisé un extincteur au halon qui n'aurait pas permis d'éteindre le feu avant d'évacuer l'avion.

3.5 Conclusion sur les événements antérieurs liés à un feu at au dispositif oxygène du cockpit

Ces événements et en particulier le contenu des enregistrements phoniques lorsqu'il sont disponibles ont permis une première caractérisation du bruit provoqué par un feu alimenté en oxygène.

Ces événements ne peuvent pas être considérés comme événements précurseurs en ce qui concerne les débuts de la séquence accidentelle du MS804. Les équipements sont différents et les origines du feu peuvent différer. Pour les événements où le design des flexibles a été considéré comme contributif, les défauts identifiés ont été corrigés.

Cependant ces événements présentent les caractéristiques communes suivantes :

- le feu est rapide et de grande ampleur ;
- les dégâts sont importants ;
- tous les équipages ont dû évacuer l'avion ;
- les sons enregistrés pendant ces événements montrent de grandes similarités avec ceux de l'enregistrement du vol MS804

Dans deux de ces événements, les équipages ont tenté d'éteindre l'incendie et n'y sont pas parvenus.

4 ACCIDENT SURVENU À L’AIRBUS A320 IMMATRICULÉ SU-GCC EXPLOITÉ PAR EGYPTAIR LE 19 MAI 2016

Les informations présentées ci-dessous sont basées sur les informations dont le BEA a eu connaissance.

4.1 Déroulement du vol

Le 18 mai 2016, l’équipage à bord de l’A320 immatriculé SU-GCC, décolle à 21 h 21¹⁶ de l’aéroport de Paris – Charles de Gaulle (France) à destination du Caire (Égypte). Le copilote est le pilote aux commandes (PF¹⁷) et le commandant de bord est PM¹⁸.

L’avion atteint son altitude de croisière de 37 000 ft peu après 21 h 43. À 23 h 48, l’équipage échange sa dernière communication avec les services de contrôle aérien grecs.

Vers 00 h 30, l’avion disparaît du radar secondaire de surveillance grec.

Les données du radar primaire montrent que l’avion vire successivement à gauche puis à droite en descente.

Un signal de la balise de détresse (ELT) de l’avion est émis à 00 h 36 min 59.

4.2 Tués et blessés

	Blessures		
	Mortelles	Graves	Légères/aucune
Membres d’équipage	10		
Passagers	56		
Autres personnes			

Tous les membres d’équipage et les passagers ont été mortellement blessés.

Note : Les 10 membres d’équipage comprennent trois agents de sécurité.

¹⁶ Sauf précision contraire, les heures figurant dans ce rapport sont exprimées en temps universel coordonné (UTC).

¹⁷ Pilot Flying.

¹⁸ Pilot Monitoring.

4.3 Renseignements sur l'aéronef

4.3.1 Cellule

Type avion	Airbus A320
MSN	2088
Immatriculation	SU-GCC
Date de livraison	3 Novembre 2003
Cycles	Approx. 20687 cycles
Heures de vol	Approx. 47866 h
Moteurs	IAE V2500-A5

4.3.2 Aspects maintenance

Le 16 mai 2016, une opération de maintenance sur l'avion effectuée au Caire a conduit au remplacement de la boîte de rangement du masque à oxygène du copilote.

Après cette opération de maintenance, l'avion a effectué 10 cycles de vol pour une durée totale de 32 heures de vol et un temps total écoulé de 72 heures.

4.3.3 Système de distribution de l'oxygène dans le cockpit

4.3.3.1 Description du système

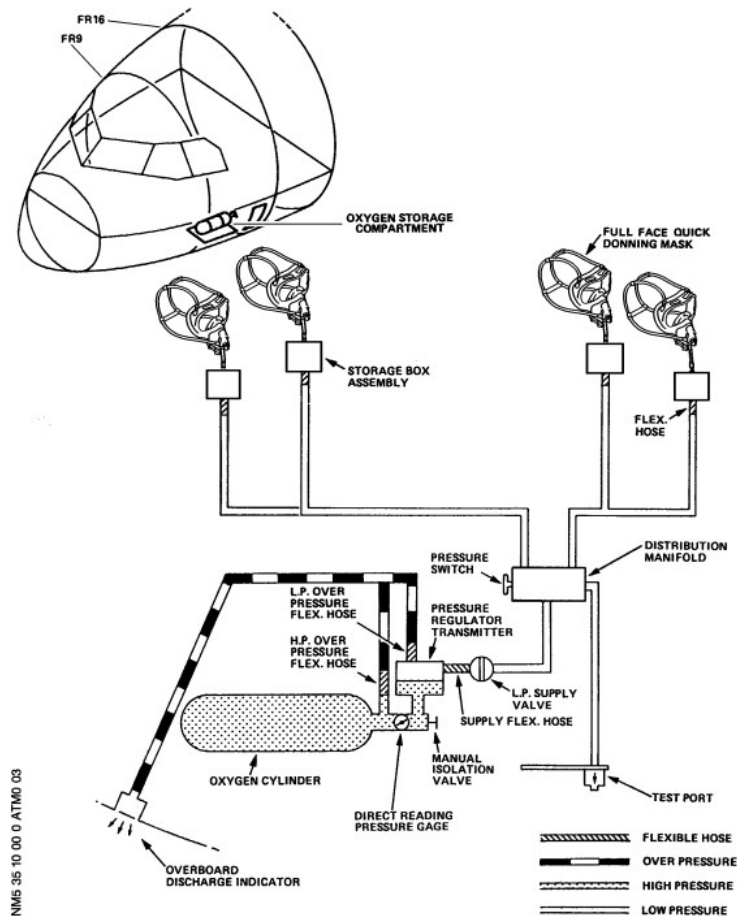


Figure 10 : schéma du circuit d'oxygène d'un Airbus A320 (Source: AMM Airbus)

L'oxygène est stocké dans une bouteille d'oxygène stockée sous le cockpit.

Un détendeur localisé sur la tête de la bouteille fait baisser la pression dans le circuit aval à une valeur de 5 bar.

En cas de surpression, une vanne évacue l'oxygène vers l'extérieur de l'avion.

Une électrovanne, appelée *DVE* sur Airbus A320, ou *LP SUPPLY valve* sur le schéma ci-dessus, contrôlée depuis le cockpit par un bouton « *CREW SUPPLY* » localisé au sur le panneau supérieur (*overhead panel*), coupe ou autorise la circulation d'oxygène (à une pression de 5 bar) vers les masques.

L'oxygène circule ensuite depuis le détendeur sous le plancher du cockpit dans des tuyaux rigides en acier inoxydable jusqu'à quatre boîtes de rangements de masques localisées à gauche et à droite du cockpit (deux de chaque côté). Les boîtes se connectent aux tuyaux rigides à l'aide de tuyaux flexibles (tuyaux souples protégés par un tube tressé métallique), au niveau des rangements latéraux du cockpit, où sont logées les boîtes.

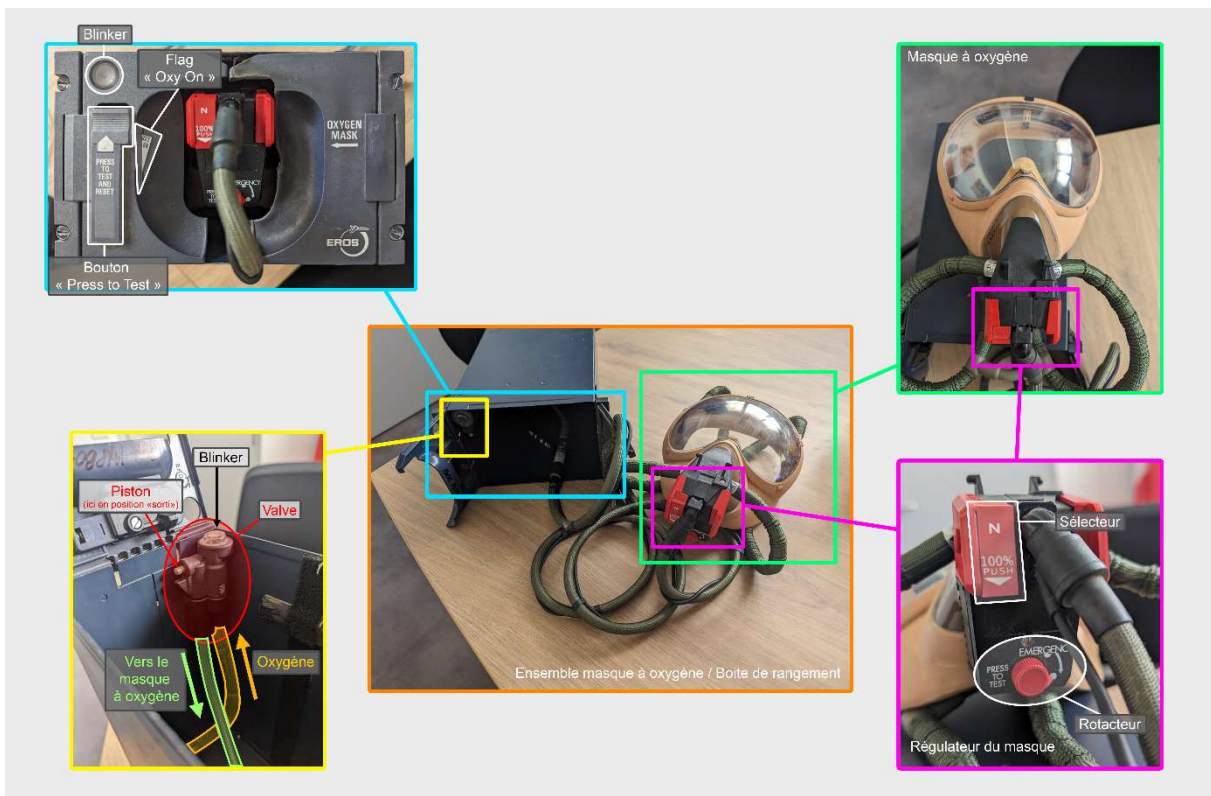


Figure 11 : ensemble boîte de rangement et masque à oxygène

Dans la boîte de rangement du masque, un premier tuyau (Dekabon – feuilard d'aluminium dans une gaine en nylon) relie l'entrée de la boîte vers une valve. Dans la valve, un piston est maintenu mécaniquement en position fermée. Il empêche la circulation de l'oxygène sous pression (5 bar) vers le masque.

Lorsqu'un appui sur le bouton « *PRESS TO TEST* » est effectué ou que la porte de la boîte est ouverte, la butée mécanique est déplacée. Le piston glisse et l'oxygène circule dans le circuit jusqu'au masque. De la même manière, ce piston presse un microswitch qui active le micro du masque.

Lorsque le piston est hors de sa position fermée et que la porte gauche de la boîte est rabattue, le piston bute sur un élément en plastique et un flag « *OXY ON* » est déplacé, indiquant que le masque est alimenté en oxygène.

De même, la circulation de l'oxygène dans cette valve actionne une membrane « pop-out » (*blinker*) pour confirmer la circulation du gaz, lorsque le pilote respire.

Un flexible de couleur verte relie la valve à un raccord de connexion rapide avec un clapet anti-retour qui permet de déconnecter et remplacer le masque sans fuite d'oxygène.

Un autre flexible (gris) relie le raccord au régulateur du masque. Ces flexibles sont composés de tubes en silicone entourés d'un tube tressé en Nomex (sorte de kevlar) qui n'a pas de propriété élastique et évite un gonflement du tuyau.

Le régulateur a pour fonction d'envoyer de l'oxygène (ou du mélange air/oxygène – en fonction de la position du sélecteur) à chaque inspiration du pilote, sous une pression proche de la pression atmosphérique. Un système de chambres, membranes et différentiel de pression permet la régulation.

Sur le régulateur, un sélecteur permet de choisir la position « N » qui envoie un mélange d'air/oxygène¹⁹ adapté en fonction de l'altitude-pression de la cabine, ou la position « 100 % » qui n'envoie que de l'oxygène pur (utilisé dans le cas de fumée cabine par exemple).

De plus, un rotacteur permet de choisir la position « *NORMAL* » ou la position « *EMERGENCY* ». En position *NORMAL*, le débit d'oxygène est déclenché par l'inspiration de la personne qui porte le masque. Ainsi, à chaque inspiration, le masque débite un mélange d'air/oxygène (position « N ») ou d'oxygène pur (position « 100 % »). En position *EMERGENCY*, le masque débite avec une surpression permanente.

Une partie de l'oxygène est utilisée dans le masque pour désembuer la visière et garder l'ensemble en suppression et éviter l'introduction de fumée dans le masque.

Le rotacteur *EMERGENCY* peut non seulement être tourné mais aussi pressé. Et un appui sur le rotacteur *EMERGENCY* permet de réaliser la fonction « *PUSH-TO-TEST* » et de déclencher un débit d'oxygène dans le masque (débit équivalent à la position *EMERGENCY*), tant que le rotacteur est pressé et qu'aucun obstacle ne vient permettre à une surpression de s'établir.

Le circuit oxygène de cockpit du SU-GCC était équipé d'une bouteille d'oxygène haute pression de capacité 3 256 l (115 pieds cubes) (NTPD²⁰) à une pression de 127,5 bar (1 850 psig).

¹⁹ L'air du mélange est prélevé dans l'air ambiant du poste de pilotage.

²⁰ Normal Temperature Pressure Dry.

4.3.3.2 Procédures associées

Le FCOM précise la quantité minimale à emporter.

REF TEMPERATURE ⁽¹⁾		Deg.C	-10	0	10	20	30	40	50
		Deg.F	14	32	50	68	86	104	122
MIN ⁽²⁾ BOTTLE PRESSURE (PSI)	2 CREWMEMBERS		468	486	504	522	540	558	576
	2 CREWMEMBERS	+1 OBS	606	629	652	675	698	721	744
	2 CREWMEMBERS	+2 OBS	759	788	817	846	875	904	933

⁽¹⁾ REF TEMPERATURE :

- On ground : REF TEMPERATURE = (OAT + COCKPIT TEMP) / 2
- In flight : REF TEMPERATURE (deg. C) = CAB TEMP (deg. C) - 10 °C
or
REF TEMPERATURE (deg. F) = CAB TEMP(deg.F)-18 °F

⁽²⁾ MINIMUM BOTTLE PRESSURE TO TAKE INTO ACCOUNT :

- Preflight checks
- The use of oxygen, when only one flight crewmember is in the cockpit
- Unusable quantity (to ensure that the regulator functions with minimum pressure)
- Normal system leakage
- and
- Protection after loss of cabin pressure, with mask regulator on NORMAL (diluted oxygen):
 - During an emergency descent : For all cockpit members for 13 min
 - During cruise at FL 100 : For 2 flight crewmembers for 107 min.
- or
- Protection in case of smoke, with 100 % oxygen : For all cockpit members for 15 min at a cabin altitude of 8 000 ft.

Note: The above times are based on the use of a sealed mask, but may be shorter if the flight crewmember has a beard.

Figure 12 : minimum d'oxygène à emporter pour le vol (Source FCOM A320 Egyptair)

Vérification de la quantité d'oxygène disponible

La quantité d'oxygène disponible est vérifiée avant le vol par l'équipage. Au cours du vol, si la pression de la bouteille devient inférieure à 400 psi, la page correspondante (DOOR/OXY) s'affiche à l'ECAM.

Procédures d'exploitation relatives au système oxygène

Lors de la préparation du cockpit, l'équipage s'assure qu'il n'existe pas de bouton allumé en blanc sur l'overhead panel. Cela le conduit à mettre l'oxygène du cockpit sur ON si cela n'a pas été effectué auparavant.

Chaque masque à oxygène est ensuite vérifié.

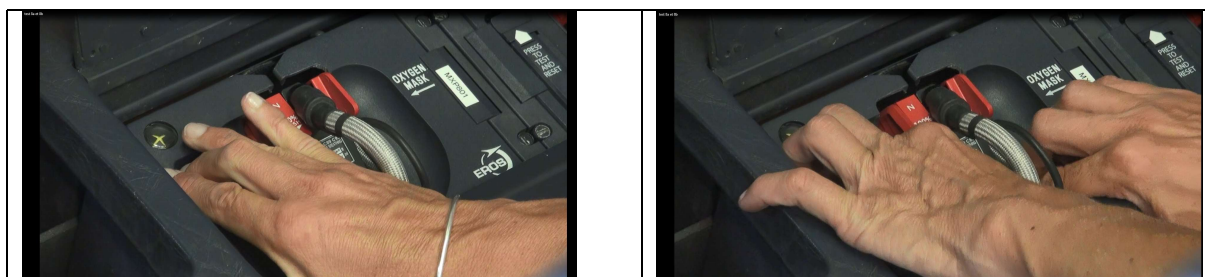
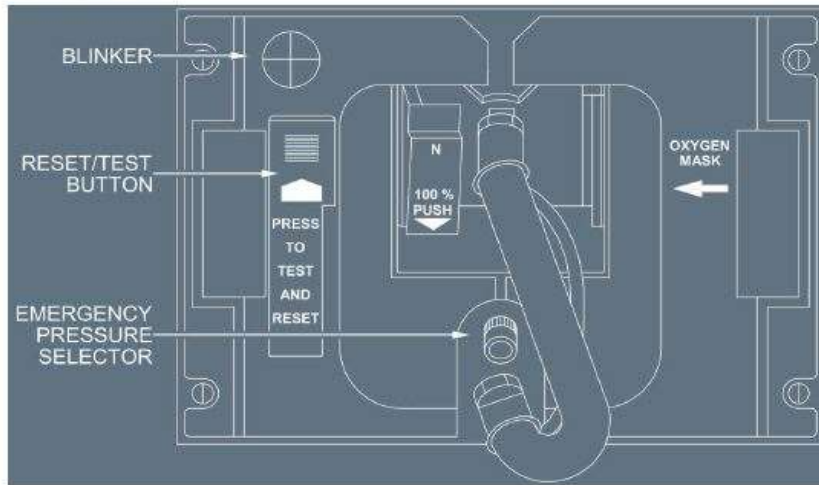


Figure 13 : vue des actions de procédure de test du masque à oxygène

La procédure de test du masque à oxygène décrite dans le FCOM est la suivante :

Ident.: PRO-NOR-SOP-06-00011249.0002001 / 23 JUN 15
 Applicable to: ALL

OXYGEN MASK TEST



WARNING To prevent hearing damage to ground mechanics connected to the intercom system, inform them that a loud noise may be heard in the headset when performing this test.

- On the OXYGEN panel:
 CREW SUPPLY pb..... CHECK ON
- On the glareshield:
 LOUDSPEAKERS.....ON
- On the audio control panel:
 INT reception knob..... PRESS OUT-ADJUST
 INT/RAD sw.....INT
- On the mask stowage box:
- Press and hold the reset/test button in the direction of the arrow.
 - Check that the blinker turns yellow for a short time, and then goes black.
 - Hold the reset/test button down, and press the emergency pressure selector.
 - Check that the blinker turns yellow and remains yellow, as long as the emergency pressure selector is pressed.
 - Listen for oxygen flow through the loudspeakers. Warn any engineer, whose headset may be connected to the nose intercom, that a loud noise may be heard when performing this check.
 - Check that the reset/test button returns to the up position and the N 100 % selector is in the 100 % position.
 - Press the emergency pressure selector again, and check that the blinker does not turn yellow. This ensures that the mask is not supplied.
- On the ECAM DOOR/OXY page:
 REGUL LO PR message.....CHECK OFF
- The crew must perform this check after having checked all masks. It ensures that the LP valve is open, (due to residual pressure between the LP valve and the oxygen masks, an LP valve failed in the closed position may not be detected during the oxygen mask test).*

Figure 14 : procédure de test du masque à oxygène PRO-NOR-SOP-06 P14 et P15/16
 (Source FCOM A320 Egyptair)

La procédure de test du masque à oxygène est destinée à vérifier :

- que la boîte de rangement du masque à oxygène est alimentée en oxygène ; en appuyant sur le bouton test, de l'oxygène est admis dans le flexible jusqu'au masque et la pression s'équilibre à 5 bar dans les flexibles de la boîte en amont du régulateur du masque à oxygène. Le témoin visuel (nommé *blinker* dans la procédure) s'ouvre et une pastille de couleur jaune apparaît lors de la mise en place de cet équilibre de pression puis se referme et présente une couleur noire quand la pression est la même partout.
Durant la durée de la pression sur le bouton test, le piston qui permet le passage de l'oxygène vers le masque du pilote se déplace et active via un contacteur électrique la liaison entre le micro et le système audio. Il n'y a pas - lors de ce test élémentaire - de bruit continu de débit d'oxygène ;
- que la boîte est alimentée en oxygène, que le masque et son microphone sont fonctionnels. En appuyant simultanément sur le bouton *PUSH TO TEST* de la boîte et sur le rotacteur *EMERGENCY* du masque, un flux continu d'oxygène s'établit depuis l'alimentation en oxygène jusque dans le groin du masque via le régulateur. L'oxygène est donc libéré dans la boîte. Le micro capte le bruit produit par ce flux d'oxygène et le son est émis sur le haut-parleur de cockpit ;
- que la boîte est bien en position resetée (c'est-à-dire que le piston qui permet le passage de l'oxygène vers le masque est en position fermé et qu'il empêche ainsi la distribution d'oxygène vers le masque). Un appui seul sur le rotacteur *EMERGENCY* du masque ne libère pas d'oxygène et le *blinker* alimenté par le flux en aval du piston ne change pas de couleur (de noir à jaune).

4.3.4 Procédures Feu-fumée dans le cockpit

4.3.4.1 Procédure Smoke/Fumes/Avionics smoke

La philosophie de la procédure décrite dans le FCOM est la suivante : en cas de feu/fumée, un déroutement doit être envisagé dès que la fumée est détectée. L'objectif est ensuite d'identifier l'origine de la fumée/du feu et de lutter contre. Si la source n'est pas identifiée, qu'elle est invisible ou inaccessible, et qu'elle ne peut être éteinte, le déroutement doit être débuté sans délai. Si la fumée est détectée par l'équipage et s'il n'y a pas de procédure affichée à l'ECAM, l'équipage doit se référer au QRH.

Les actions immédiates concernent :

- la protection de l'équipage et en particulier le port des masques à oxygène ;
- l'évitement d'une contamination plus importante (propagation) ;
- la communication avec l'équipage de cabine.

À tout moment, l'élimination des fumées, l'application de la procédure ELEC EMER et l'atterrissage immédiat doivent être considérés.

4.3.4.2 Procédure spécifique feu Batterie Lithium

Pour les feux de batterie lithium, les actions sont précisées dans le FCOM comme suit : Le PF s'équipe de son masque à oxygène tandis que le PM s'équipe du PBE/cagoule et, en cas de flamme, utilise l'extincteur au halon.

Il est rappelé que les extincteurs au halon sont efficaces sur les flammes, mais ne peuvent pas stopper un emballement thermique.

Il est d'autre part indiqué de transférer si nécessaire le contrôle de l'appareil au pilote situé du côté opposé au feu.

4.3.4.3 Équipement respiratoire de protection (PBE)

Une cagoule est située du côté droit à l'arrière du cockpit.

Une autre cagoule est située du côté gauche du cockpit.

Il est indiqué dans le FCOM que ce système assure une protection des yeux et du système respiratoire d'un membre d'équipage lorsque celui-ci lutte contre un incendie, en cas de fumée, d'émissions de gaz nocifs ou d'une dépressurisation

4.4 Renseignements sur l'épave et les débris

Une recherche au sonar a permis de localiser l'épave et de définir les limites du champ de débris. Les débris étaient dispersés dans un rectangle de 1,2 km sur 525 m. Les débris ont ensuite été identifiés, cartographiés et certains ont été récupérés. Toutes les extrémités de l'avion se trouvaient à l'intérieur du rectangle identifié : le cockpit, les ailes et la queue. Ces observations, ainsi que la petite taille des débris, permettent de conclure à un impact à haute énergie de l'avion avec la surface de l'eau et permettent d'exclure un scénario de dislocation de l'avion en vol.

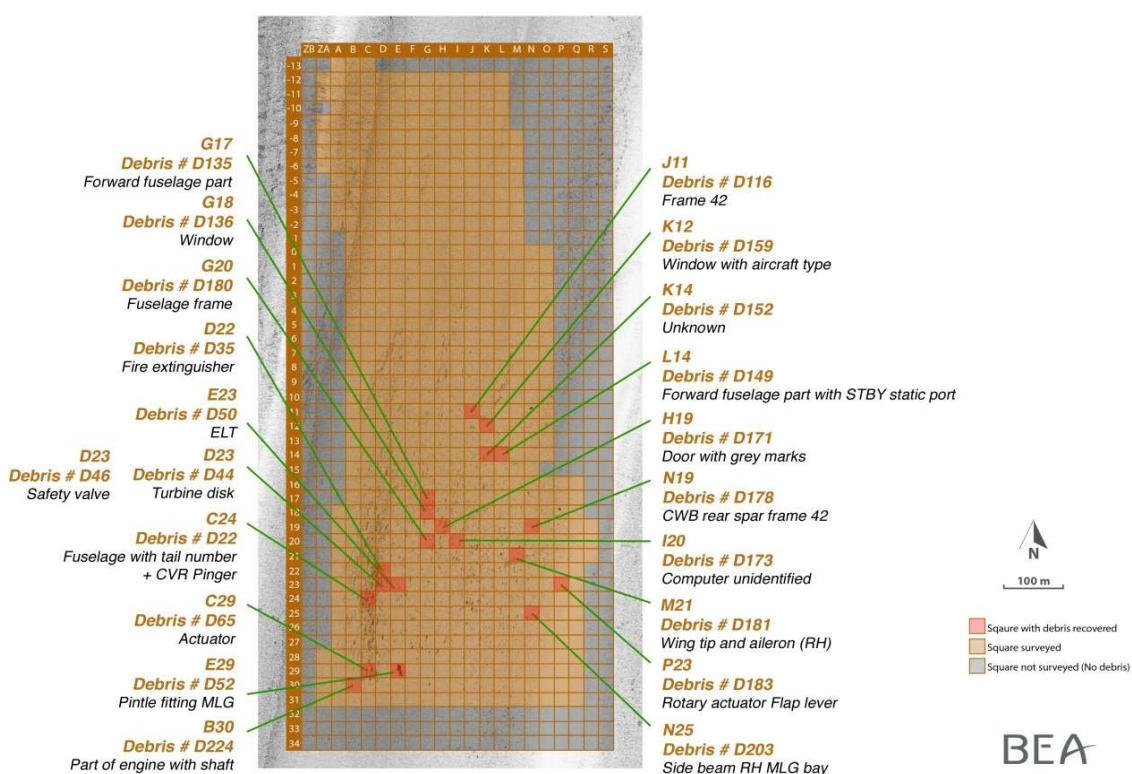


Figure 15 : champs de débris (Source BEA/EEAID)

Certains débris portaient des traces de haute température et de suie. En particulier, de la suie était visible sur le côté du cockpit entre les cadres 4 et 8, comme l'illustre l'image ci-dessous.



Figure 16 : débris du cockpit portant des dépôts noirs (Source BEA/EEAID)

La figure ci-dessous montre approximativement la zone correspondante.

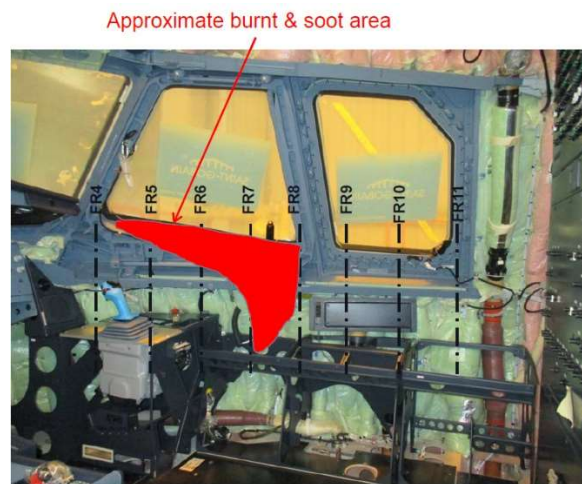


Figure 17 : zone correspondante sur un A320 (source BEA/EEAID)

4.5 Enregistrements CFR et FDR

4.5.1 Rapports de vols (CFR)

Le CFR est un rapport généré par les systèmes de l'avion. Il enregistre les défaillances ou les dysfonctionnements des systèmes, y compris les alertes ECAM et les messages de maintenance. Le CFR a une fonction de maintenance et permet à l'exploitant d'anticiper toute action de maintenance avant l'atterrissage de l'aéronef.

Le CFR du vol a été récupéré par le constructeur de l'avion et l'exploitant.

Il contenait les données suivantes relatives aux dysfonctionnements/alertes pendant la phase de croisière du vol.

Time	Message	Message type
00:26	ANTI ICE R WINDOW	ECAM alert
00:26	R SLIDING WINDOW SENSOR	Maintenance message
00:28	R FIXED WINDOW SENSOR	Maintenance message
00:26	SMOKE LAVATORY SMOKE	ECAM alert
00:27	AVIONICS SMOKE	ECAM alert
00:29	AUTO FLT FCU 2 FAULT	ECAM alert
00:29	F/ CTL SEC 3 FAULT	ECAM alert

4.5.2 Enregistreur de paramètres de vol (FDR)

Le FDR a cessé de fonctionner alors que l'avion était en croisière au FL 370. Aussi, environ sept minutes de vol n'ont pas été enregistrées entre la fin du fonctionnement du FDR et l'impact estimé avec l'eau (estimation à partir de l'heure d'émission de l'ELT).

À 00 h 26 min 14, l'alarme « LAVATORY SMOKE » se déclenche. Cette alarme reste active jusqu'à la fin des données enregistrées par le FDR. Dans le cockpit, une alarme de type CRC (gong répétitif) et le voyant *master warning* se déclenchent côté commandant de bord et copilote.

L'alerte « AVIONICS SMOKE » se déclenche 46 secondes plus tard. Aucun son ni voyant spécifique n'est associé à cette alerte.

À 00 h 29 min 39, les systèmes de bord déconnectent le pilote automatique. L'alarme CRC liée à l'alarme LAVATORY SMOKE s'arrête et l'alarme sonore (*Cavalry charge*) associée à la déconnexion du pilote automatique retentit dans le cockpit²¹ à deux reprises.

La lecture du FDR montre que plusieurs calculateurs de bord sont tombés en panne successivement à partir de 00 h 29 min 26 dans un intervalle de 30 secondes.

La seule perte de ces calculateurs n'affecte pas immédiatement la capacité de l'avion à voler, naviguer ou envoyer des informations. À la fin de l'enregistrement, la trajectoire de l'avion et sa vitesse étaient stables.

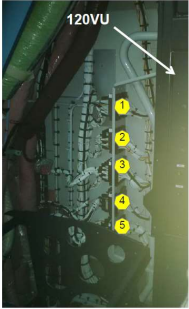
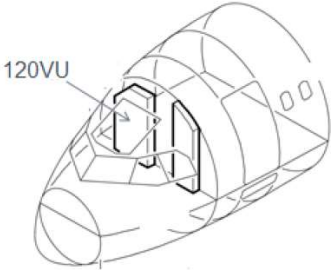
Ces calculateurs sont localisés à différents emplacements de l'avion. Cependant, les câbles d'alimentation de ces calculateurs sont tous connectés au même endroit, dans une zone à l'arrière droit du cockpit.

²¹ Les procédures demandent aux pilotes d'annuler l'alarme en appuyant sur le bouton « MASTER WARN » ou sur le bouton de prise de contrôle du side-stick (Take over pb).

Connection of the lost computers to power supply – DFDR analysis

- According to the DFDR analysis and the CFR stop, the following computers were lost. The wires of their respective power supply are located in the same area.

<ul style="list-style-type: none"> ✓ DMC3 ✓ TCAS ✓ CFDIU ✓ EVMU ✓ Rudder Pedal Force sensor 	⇒ Connector ①
<ul style="list-style-type: none"> ✓ ATSU 	⇒ Connector ②
<ul style="list-style-type: none"> ✓ EEC2 channel B 	⇒ Connector ④
<ul style="list-style-type: none"> ✓ FMGC2 ✓ FAC2 ✓ Weather radar ✓ FCDC2 ✓ SEC2 ✓ SEC3 ✓ SDCU ✓ DFDR ✓ FCU2 	⇒ Connector ⑤

La région commune au passage de l'ensemble des câbles d'alimentation est située entre le plancher du cockpit et le panneau électrique repéré « 120VU »

Note : L'alerte ECAM « ANTI ICE R WINDOWS » présente dans le CFR ne fait pas partie des paramètres enregistrés par le FDR.

4.6 Enregistreur phonique (CVR)

4.6.1 Contenu

De façon identique au FDR, le CVR a cessé de fonctionner alors que l'avion était en croisière au FL 370. Aussi, environ sept minutes de vol n'ont pas été enregistrées entre la fin du fonctionnement du CVR et l'impact estimé avec l'eau.

L'enregistrement CVR a une durée totale de 02h05min26. Le modèle d'enregistreur CVR qui équipe le SU-GCC stocke les informations des quatre voies d'entrée dans cinq espaces mémoires :

- fichier Voie 1 CVR (CDB) : Il contient le signal d'écoute du pilote de gauche (radio et interphones) et le signal de ses microphones*. La durée de ce fichier est de 30 min 30 ;
- fichier Voie 2 CVR (COPILOT) : Il contient le signal d'écoute du pilote de droite (radio et interphones) et le signal de ses microphones*. La durée de ce fichier est de 30 min 30 ;
- fichier Voie 3 CVR (3 rd/PA) : Il contient le signal d'écoute du troisième homme (placé sur le siège amovible situé derrière le siège du copilote) (radio et interphones) et le signal de ses microphones*. Il contient aussi les échanges réalisés entre le cockpit et la cabine (PNC) via l'interphone de cabine. La durée de ce fichier est de 30 min 30 ;
- fichier Mix CVR (MIX) : il contient le mélange des entrées Voies 1 à 3 CVR sur une durée de 2 h 05 min 26 ;
- fichier Voie 4 CVR (CAM) : il contient le signal du microphone qui capture l'ambiance sonore dans le cockpit. La durée de ce fichier est de 2 h 01 min 03.

* : micro du casque, micro à main, et micro du masque à oxygène lorsque ce dernier est actif.

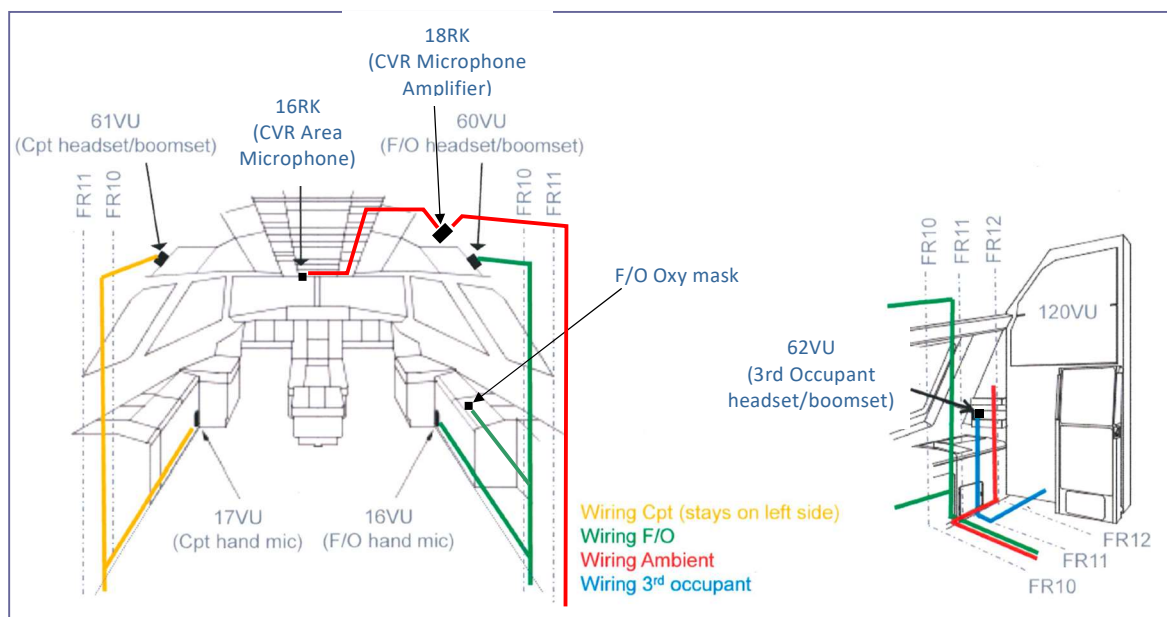
4.6.2 Sources de captation

L'écoute CVR et l'observation des formes d'onde mettent en évidence - peu après les premières évocations de feu de l'équipage²² - la perte successive des différentes sources de captation qui alimentent les systèmes audio et CVR.

Heure UTC	Temps cumulé	Événements
00:25:30	0	Annonce « feu ! » par l'équipage
	+4 s	Le signal du microphone du masque à oxygène du copilote ne parvient plus au système audio-CVR
	+17,5 s	Le signal du microphone du casque du copilote (boomset) ne parvient plus au système audio-CVR
	+1 min 11	Le signal du microphone du casque du 3 ^{ème} homme (boomset) ne parvient plus au système audio-CVR
	+2 min 03	Début de dégradation du signal audio provenant de la chaîne de captation de l'ambiance (CAM /microphone et/ou CU)
	+3 min 30	Le signal provenant de la chaîne de captation de l'ambiance (CAM /microphone et/ou CU) ne parvient plus au CVR
	+4 min 24	Fin de l'enregistrement CVR

Note : le microphone du boomset du commandant de bord a continué de fonctionner sans dégradation notable de sa capture sonore et a ainsi capturé en partie l'ambiance sonore jusqu'à la fin de l'enregistrement CVR.

La vue ci-dessous précise le cheminement des faisceaux électriques qui véhiculent dans le cockpit les signaux sonores vers leurs systèmes respectifs (AMU et CVR) :



(Source BEA à partir de document

Figure 18 : zone des faisceaux électriques associés au CVR sur un A320

²² Voir § 4.6.5

4.6.3 Utilisation des casques et communications ATC

Chacun des pilotes dispose d'un ensemble d'équipements nécessaire à ses communications. Cet ensemble est composé de plusieurs microphones et de boîtiers d'interface et de sélection. L'annexe *Description fonctionnelle du système Audio-CVR* présente un descriptif fonctionnel de ce dispositif.

En vol d'exploitation de transport commercial le port du casque et l'usage du microphone du casque boomset par les pilotes sont préconisés par les procédures opérationnelles lorsque l'appareil est en dessous du FL100. En croisière les activités radio et interphone (échanges avec la cabine) sont veillées par le pilote monitoring au travers de l'écoute sur son haut-parleur ; les messages vocaux sont généralement transmis en utilisant le micro à main.

L'analyse détaillée du contenu audio des deux voies CVR attribuées à chacun des pilotes a permis de déterminer que les pilotes du vol MS804 ne portaient pas leur casque audio depuis le début de l'enregistrement CVR. Au cours des deux dernières heures d'enregistrement, les communications radio ont été principalement passées par le commandant de bord via le micro à main ; deux ont probablement été émises par le copilote via le micro à main.

L'analyse audio de la voie CVR du copilote a permis de mettre en évidence qu'un bruit de fond « caverneux » caractéristique de la captation assurée par le micro interne du masque à oxygène est présent depuis le début de l'enregistrement CVR. Ce micro se trouve placé à l'intérieur du masque à oxygène, dans le support de visière, à la base du régulateur (détendeur) qui délivre le mélange air ambiant + oxygène au pilote.

La captation sonore du micro du masque à oxygène présente une signature acoustique composée de l'émergence de cinq bosses de bruit caractéristiques. L'annexe *Captation sonore par le micro du masque à oxygène* présente le comparatif réalisé avec une série d'échantillons audio prélevés dans la base de données audio du BEA. La vue spectrale ci-dessous présente le comparatif entre le signal enregistré par la voie CVR du commandant de bord et celui enregistré par la voie CVR du copilote.

La bosse de bruit basse fréquence (de 100 à 500 Hz) et les quatre bosses large bande (780, 1300, 2090 et 2640 Hz) confirment que le micro du masque à oxygène du copilote est actif.

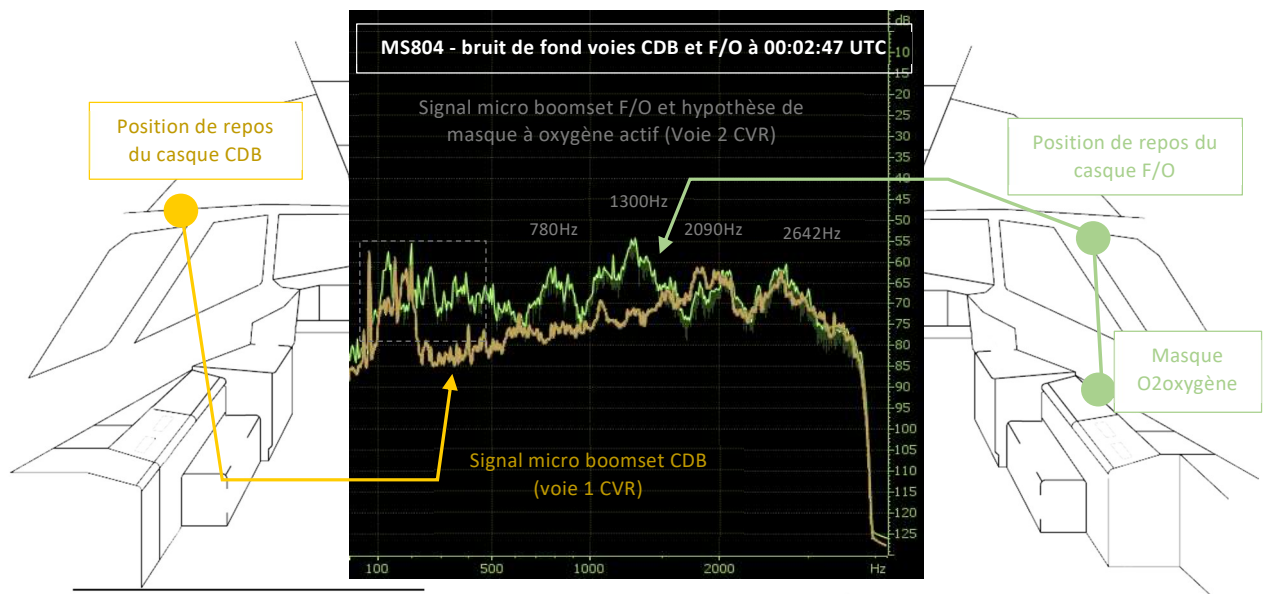


Figure 19 - comparatif du spectre de bruit capté par les boomsets du pilote et du copilote

Résultat intermédiaire (Fait établi ou probable)

Le micro du masque à oxygène du copilote était actif dans les 30 dernières minutes d'enregistrement du CVR, très probablement depuis le début de l'enregistrement du CVR.

Les voies d'entrée du CVR qui sont dédiées à l'enregistrement des émissions sonores (conversations et radiocommunications) et des signaux d'écoute des pilotes reçoivent un signal composite résultant d'un mélange réalisé par le système de gestion des sources audio du bord. Pour rappel, l'annexe *Description fonctionnelle du système Audio-CVR* présente le dispositif audio du bord.

Le système audio aiguille la/les sources de captation (i. e les différents microphones) vers la/les sources d'émission (i. e la radio sélectionnée, l'interphone, le haut-parleur...). Cette aiguillage répond à des règles de priorité. L'une d'elle consiste à définir, pour la fonction « radio », la priorité suivante :

- micro à main ;
- masque à oxygène ;
- microphone du casque du pilote (*boomset*).

Dans le cas présent l'activation permanente du micro du masque à oxygène du copilote ne permettait pas l'usage du *boomset* de ce dernier pour émettre les messages de radiocommunication. L'appareil se trouvait en croisière dès le début de l'enregistrement CVR ; les pilotes ne faisaient plus usage de leur *boomset* respectif.

Résultat intermédiaire (Fait établi ou probable)

Le boomset du copilote n'a pas pu être utilisé pour l'émission de communications radio pendant les trente dernières minutes, de façon très probable dans les deux dernières heures. Le copilote, en raison de son rôle de PF sur le vol, n'avait pas besoin d'utiliser son boomset avant d'avoir atteint le niveau 100 et a utilisé le micro à main en croisière. Ainsi, le copilote n'avait pas d'opportunité de détecter que son micro casque était inactif. Ce qui explique que l'activation du micro du masque puisse ne pas avoir été détectée.

À la pression normale de fonctionnement dans le circuit, le fait que le micro du masque à oxygène soit actif peut être lié à :

- une action sur la boîte de rangement du masque. La boîte de rangement du masque aurait été ouverte et non resettée. Le reset est une action habituelle lors de la procédure de test à chaque premier vol de la journée ;
- un switch d'activation du microphone défaillant ou mal réglé.

Le constructeur du masque et de la boîte à oxygène indique qu'une surpression dans le système de distribution pourrait placer et maintenir la boîte de rangement en position non resettée. Il précise cependant que la surpression nécessaire au déplacement du piston est supérieure à celle qui entraînerait un débit via le régulateur du masque.

4.6.4 Analyse des conversations du CVR :

L'enregistrement phonique (micro d'ambiance et microphones *boomset* des casques) assuré par le CVR ne permet qu'une perception partielle de l'activité dans le cockpit et des communications avec l'extérieur (avec le contrôle ou les opérations) et internes (entre membres d'équipages technique et commercial). Ceci est à prendre en compte dans les conclusions pouvant être établies à partir de l'interprétation et de la traduction des locutions audibles sur les enregistrements CVR.

4.6.4.1 Éléments de contexte précédant la séquence accidentelle

L'enregistrement CVR du vol MS804 contient les 02 h 01 min 04 des derniers échanges dans le cockpit. Les échanges vocaux au sein de l'équipage (entre PNC et/ou entre PNC et PNT) sont réalisés en arabe Égyptien. Au début de l'enregistrement l'appareil est en croisière. Les communications ATC sont principalement assurées par le commandant de bord. Une ambiance musicale est présente en permanence dans le cockpit. L'équipage de cabine (PNC) s'occupe d'un passager malade dont l'état de santé se dégrade (malaise). Cet événement entraîne durant la première heure d'enregistrement un nombre important d'allées et venues de PNC dans le cockpit pour informer le commandant de bord de l'évolution de l'état de santé de ce passager. Durant la seconde heure d'enregistrement un PNC prend place dans le cockpit et les conversations ne concernent plus la conduite du vol. Quarante minutes avant la fin de l'enregistrement, l'équipage prend un repas.

Dans les dix dernières minutes d'enregistrement CVR, le commandant de bord demande à un PNC une couverture ainsi qu'un oreiller. Une fois ces éléments apportés, ce PNC sort. Sont alors présents dans le cockpit les deux pilotes et le premier PNC.

4.6.4.2 Éléments relatifs à l'action de fumer dans le cockpit

Le 26 avril 2022 un média italien²³ a diffusé par voie de presse des informations présentées comme une synthèse du rapport confidentiel établi par des experts judiciaires français ; il y était mentionné qu'un bruit de fuite d'oxygène avait eu lieu dans le masque à oxygène d'un pilote et « *qu'un début d'incendie avait été déclenché par une étincelle ou une flamme* », ajoutant qu'une cigarette allumée pourrait être à l'origine du feu. L'article italien indiquait que le rapport mentionnait que l'usage de cigarette était fréquent dans cet avion puisque les cendriers avaient été récemment remplacés.

²³https://www.corriere.it/cronache/22_aprile_26/volo-egyptair-incendio-pilotti-fumo-fb725f4c-c4d3-11ec-8db2-dfe15c68e9dd.shtml

Les travaux préliminaires d'écoute du CVR réalisés par le BEA mentionnaient la présence d'une locution traduite initialement de l'arabe comme suit : « *souffle ta fumée sur moi* » ; cette locution pouvait potentiellement traduire l'action de fumer d'un des membres d'équipage.

Des travaux complémentaires sollicitant sept linguistes arabophones - dont deux natifs d'Égypte - ont été menés pour réaliser une analyse approfondie du contenu des conversations enregistrées. La locution précédemment mentionnée a été corrigée et sa traduction modifiée comme suit : « *il s'évanouit* » ou encore « *il a fait un malaise* », faisant probablement référence au passager malade. Cette locution précède une discussion entre les deux pilotes évoquant l'éventualité d'un déroutement vers Athènes ou l'Albanie.

Une seconde locution, plus tardive, pouvait potentiellement évoquer les habitudes de fumeur d'un des deux pilotes « *As-tu arrêté de fumer [ou quoi/ou non], je ne sens pas [la fumée/d'odeur] ?* ».

En conclusion sur cet aspect, aucun élément de langage entendu dans les conversations enregistrées par le CVR ne mentionne clairement l'intention ou l'action de fumer de l'équipage.

Résultat intermédiaire (Fait établi ou probable)

Aucun élément issu de l'enregistrement de conversation dans le cockpit ne vient confirmer ou infirmer l'hypothèse de personnes fumant dans le cockpit

4.6.5 Descriptif audio de la séquence accidentelle

Conversations/Voix/locutions pendant la séquence accidentelle

À 00 h 25 min 23, un fort sifflement d'une durée de 2,6 s est perceptible dans l'enregistrement CVR. Ce bruit est considéré comme étant le démarrage de la séquence accidentelle (dénommé « *TO* »).

Le commandant de bord interpelle à cet instant le copilote juste avant un fort bruit transitoire suivi immédiatement d'un sifflement, d'un phénomène d'emballement sonore²⁴ et d'un bruit de fuite²⁵ continue.

L'équipage mentionne à plusieurs reprises les termes « *feu* » et « *extincteur* ». De courtes quintes de toux et sons voisés (mot ou locutions inintelligibles) sont émis peu après. Le niveau sonore du bruit de fuite continue décroît progressivement laissant percevoir de multiples bruits de crépitements et laissant réapparaître l'ambiance musicale.

Une succession d'alarmes sonores est audible dans l'enregistrement CVR ; elle est composée essentiellement des alarmes de MASTER WARNING, SMOKE DETECTOR, puis CAVALRY CHARGE 15 s avant la fin de l'enregistrement CVR.

²⁴ Présence de bosses de bruit - bosses d'énergie large bande - dont la fréquence augmente rapidement pour se concentrer autour de 1,2 et 2 kHz (le phénomène pourrait être décrit de manière psychoacoustique comme un « sifflement montant »). L'emballement sonore s'accompagne d'une hausse du niveau sonore global.

²⁵ Bruit large bande réparti sur toute la bande passante du microphone qui assure la capture sonore.

Formes d'onde et événements d'intérêt

L'annexe Formes d'onde de l'enregistrement CVR présente graphiquement le contenu CVR et décrit de manière chronologique la succession des différents événements sonores durant les cinq dernières minutes d'enregistrement CVR.

La vue ci-dessous présente un extrait, d'une durée d'une minute, relatif au début de la séquence accidentelle. Les différents événements (bruits, sons, annonces équipage...) sont dénommés *EVT1* à *EVT9*. Les événements sont en majorité contenus dans les 18 secondes qui suivent le premier bruit de débit (*EVT2*).

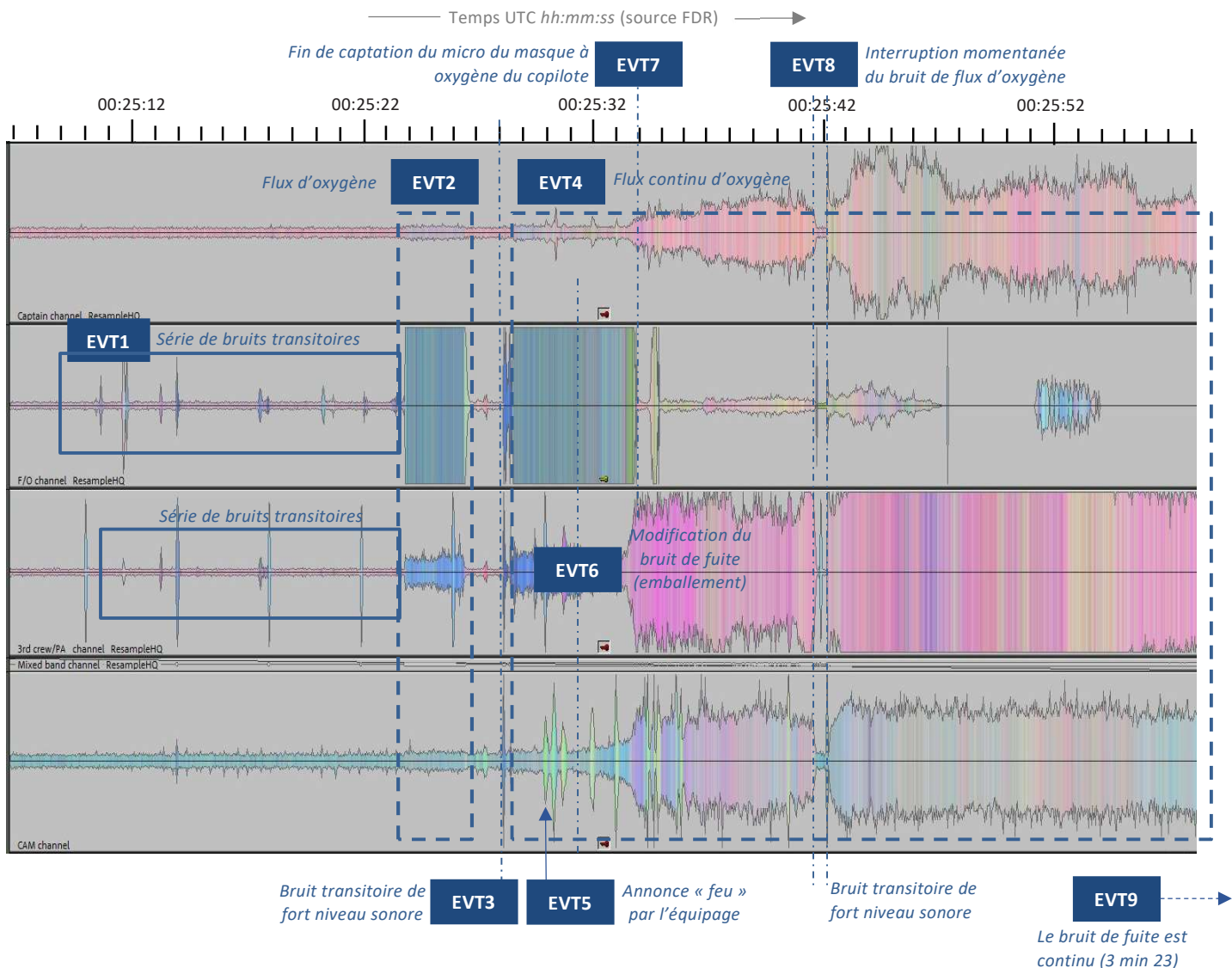


Figure 20 : séquence d'événements audio – détail chronologique (vue forme d'onde – source BEA)

Les neuf événements sonores considérés sont les suivants :

- *EVT1* De nombreux bruits transitoires sont présents sur la voie audio-CVR du copilote et dans une moindre mesure sur celle du troisième homme/PA ;
- *EVT 2* Un bruit de fuite de courte durée (2,6 s) est enregistré avec un très fort niveau sur la voie audio-CVR du copilote. Le début du bruit de fuite constitue le T0 de la séquence d'événement ;

- EVT 3 Un bruit transitoire de fort niveau est entendu à T0 + 4.3 s ;
- EVT 4 Un bruit de fuite continue débute (et durera plus de 3 min) à T0 + 4.7 s ;
- EVT 5 Première annonce de « feu » à T0 + 6.1 s ;
- EVT 6 Modification du bruit de fuite continue à T0 + 7.6 s ;
- EVT 7 Perte du signal du micro du masque à oxygène du copilote à T0 + 9.6 s ;
- EVT 8 Courte interruption du bruit de fuite à T0+17.9s (durée : 0,5 s) ;
- EVT 9 Fin du bruit de fuite à T0 + 3 min 23 : le niveau du bruit de fuite continue décroît jusqu'à disparaître dans le bruit de fond du cockpit

4.7 Essais et recherches

4.7.1 Présentation des essais et recherches

Des essais et recherches ont été menés dans le but d'identifier les neuf événements sonores isolés dans la séquence accidentelle.

Ces essais ont été réalisés au sein du BEA et chez le constructeur du système oxygène. Les moyens d'essais comprenaient principalement :

- une chaîne mobile CVR de captation audio ;
- un ensemble de distribution de l'oxygène dans le cockpit.

4.7.2 EVT1 : Bruits transitoires sur la voie audio du copilote

La série de transitoires enregistrés sur la voie copilote correspond au mélange de la captation par le micro du masque et du casque d'écoute (*headset*) du copilote.

Certains de ces transitoires sont présents avec une amplitude plus faible sur la voie 3^{ème} homme. Ils sont peu détectables sur la voie CAM. D'après les mesures effectuées dans un cockpit (voir l'annexe EVT1), ces transitoires correspondent à des manipulations à proximité du vide-poche.

Les essais dans le cockpit montrent de plus que les bruits de manipulations sont diffusés par le haut-parleur du copilote et qu'ils sont perceptibles depuis la place du copilote. En revanche ces mêmes événements sont peu ou pas capturés par le microphone d'ambiance (à l'exception de ceux de fort niveau).

Résultat intermédiaire (Fait établi ou probable)

L'enregistrement CVR contient sur toute sa durée la captation sonore par le micro du masque à oxygène du copilote de manipulations à proximité du vide-poche se traduisant par des transitoires de faible niveau. Cette captation peut être perçue sur le haut-parleur d'écoute du copilote (en fonction du volume sélectionné)

4.7.3 EVT2 : Bruit de fuite de courte durée (2,6 s) enregistré avec un fort niveau sur la voie audio CVR du copilote

La figure suivante représente l'analyse de l'EVT2 d'un point de vue acoustique. En bleu, la forme d'onde correspond à la représentation de l'amplitude du bruit en fonction du temps. La bande dans les tons orangés représente la répartition des fréquences en fonction du temps.

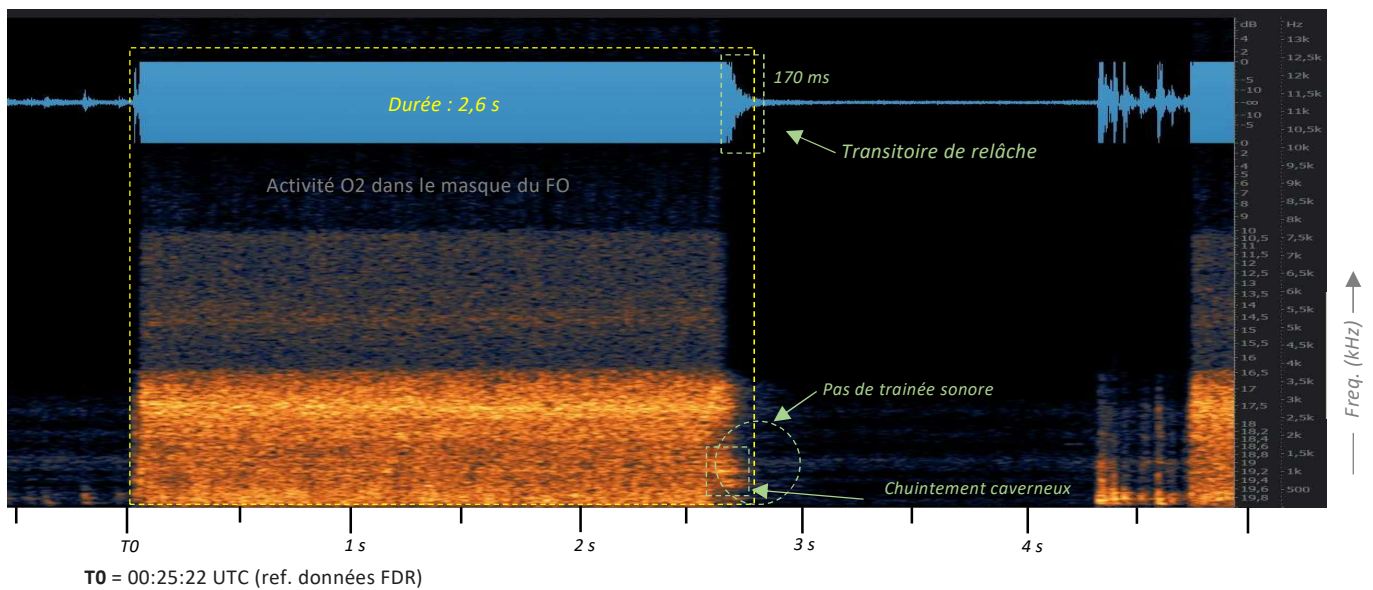


Figure 21 : première activité de débit d'oxygène dans le masque du copilote (vue spectrale – source BEA)

Cette séquence a été comparée à différents enregistrements sonores effectués lors de la manipulation de masques à oxygène et de boîtes de rangement du masque (Voir l'annexe EVT2).

La durée du transitoire de relâche (170 ms) correspond à la fin de mise en pression à 5 bar de l'ensemble des flexibles en amont du régulateur :

- c'est le cas lorsque le masque n'est pas en *EMERGENCY* et que l'on fait un appui simple sur le bouton test de la porte de la boîte de rangement du masque à oxygène ;
- ou lorsque la boîte n'est pas resetée à la fin d'un appui sur le rotacteur *EMERGENCY*.

L'absence de trainée sonore indique qu'il n'y a pas de purge et correspond à une boîte avec une pression identique dans l'ensemble des flexibles, donc non resetée.

Le bruit de fuite a une durée très supérieure à celui que crée un appui sur le test de la porte de la boîte de rangement du masque (observé entre 700 et 900ms durant les essais réalisés en laboratoire et sur des avions en service).

Ainsi le bruit de fuite d'une durée de 2,6 s qui survient à t0 correspond à un débit d'oxygène via le régulateur du masque à oxygène ; il est comparable à celui que produit un appui sur le rotacteur du masque *EMERGENCY* alors que la boîte n'est pas resetée.

De plus, le chuintement caverneux indique que le mélangeur du masque du copilote est en position 100 % oxygène.

Résultats intermédiaires (Faits établis ou probables)

Le masque à oxygène du copilote n'était pas en position permanente *EMERGENCY* avant le t0, début du bruit de débit d'oxygène

Le mélangeur du masque à oxygène du copilote était en position 100 %

La boîte de rangement du masque à oxygène du copilote n'était pas en position resettée

Un débit d'oxygène via le masque du copilote d'une durée de 2,6s débute à 00 h 25 min 30 (t0).

Le débit est équivalent à celui provoqué par un appui sur le rotacteur *EMERGENCY* du masque

Les éléments disponibles dans le cadre de l'enquête ne permettent pas de déterminer si le débit d'oxygène résulte d'une action humaine sur le rotacteur *EMERGENCY*, qu'elle soit involontaire ou volontaire. :

- Appui involontaire

L'appui involontaire paraît peu probable d'une part en raison de la durée de l'appui (2,6 s), d'autre part en raison de la relative difficulté d'accès du rotacteur (le rotacteur est protégé par le flexible qui passe au-dessus). De plus, en vol, un couvercle est normalement fermé sur les boîtes de rangement de masque.²⁶

- Appui volontaire

L'une des explications possibles est que le copilote ait été interpellé par les bruits émis sur le haut-parleur par les manipulations à proximité captés par le micro du masque à oxygène. En effet, le niveau de sonore dans cockpit est faible comparé à la période précédente. De plus, le commandant de bord désirait se reposer et même si le CVR ne contient aucune mention d'un transfert, il a pu passer les communications au copilote et celui-ci augmenter le volume du haut-parleur. Il est possible que le copilote ait alors effectué des actions correspondant à la procédure de test du masque. Dans l'obscurité liée au vol de nuit, le siège avancé en position de pilote en fonction, cette action a pu se réduire à un appui sur le rotacteur *EMERGENCY* du masque ; l'appui sur le poussoir de la boîte étant plus difficile à effectuer. Aucune mention d'une coordination pour une telle action n'est présente dans le CVR.

Aucune activité « oxygène » n'a été enregistrée par le CVR avant le t0 – c'est-à-dire aucune manipulation volontaire du dispositif individuel d'oxygène, ou de bruit caractéristique d'une fuite. Aucune activité « oxygène » de pilotes (mise en place et usage normal d'un masque à oxygène de cockpit) n'a été enregistrée par le CVR après le t0. Le seul élément en lien avec le dispositif oxygène de cockpit est la fuite continue précédemment mentionnée.

Résultat intermédiaire (Fait établi ou probable)

Il n'y a aucune mention d'une intention ou d'une action d'usage des dispositifs individuels d'oxygène de la part d'un ou des pilotes.

4.7.4 EVT3 : Transitoire de fort niveau

Un transitoire de fort niveau se produit à t0 + 4,3 s et est perceptible de façon importante sur la voie copilote, avec un niveau plus faible sur la voie 3ème homme et avec un niveau encore plus faible sur le CAM. La différence de niveau indique une localisation dans la boîte de rangement du masque du copilote. L'origine n'est pas identifiée.

²⁶ Aucun élément ne permet de déterminer si c'était le cas lors du vol MS804.

Résultat intermédiaire (Fait établi ou probable)

Un événement entraînant un transitoire de fort niveau d'origine inconnue a lieu dans la boîte de rangement du masque du copilote 4,3 s après le début du premier débit d'oxygène dans le masque ($t_0 + 4,3$ s).

4.7.5 EVT4 et EVT9 : Fuite continue

Des vidanges complètes d'une bouteille d'oxygène de cockpit ont été réalisées en laboratoire en provoquant une fuite continue d'oxygène (Voir les annexes EVT4 et EVT9).

La fuite d'oxygène produite par la rupture d'un flexible, soit en amont de la boîte de rangement du masque soit au niveau du flexible reliant le masque à la boîte, génère un bruit large bande de plusieurs minutes, dont le niveau sonore décroît progressivement à compter d'une pression restante dans la bouteille d'oxygène inférieure à 20 bar.

Les essais confirment que le long bruit de débit de gaz présent sur l'enregistrement CVR du vol MS804 correspond à une fuite continue sur le dispositif oxygène du cockpit. Les signatures acoustiques relevées durant ces essais tendent à attribuer la fuite à une rupture d'alimentation en oxygène dans la boîte, en amont d'un masque de façon plus probable qu'à une fuite en amont de la boîte de rangement du masque.

Le bruit de fuite continue ne donne pas lieu à un emballement sonore comme c'est le cas sur l'enregistrement du vol MS804 (EVT6).

Le temps de vidange complet de la bouteille d'O₂ sur le vol MS804 est très inférieur à la valeur théorique calculée par l'équipementier (11 min). Plusieurs hypothèses peuvent être formulées :

- soit la valeur théorique est surestimée ;
- soit le débit dans l'événement est supérieur à celui obtenu avec une pression de 5 bar ²⁷;
- soit la bouteille était peu remplie.

Résultat intermédiaire (Fait établi ou probable)

Une fuite continue non contrôlée d'une durée de 3 min 23 correspondant à la vidange complète de la bouteille d'oxygène a lieu dans la boîte de rangement du masque du copilote (début à $t_0 + 4,7$ s).

4.7.6 EVT8 : Interruption du bruit de fuite

On observe une interruption du bruit de fuite d'une durée de 0,6 s à $t_0 + 17,9$ s. Des essais ont été réalisés afin de tenter de reproduire cette interruption au moyen d'un double appui sur le bouton CREW SUPPLY ON de l'*overhead panel*.

²⁷ En cas de surpression en amont du régulateur de pression de la bouteille (ou dans la bouteille) et avec un fonctionnement nominal du régulateur, une vanne évacue l'oxygène vers l'extérieur de l'avion. Durant cette vidange rapide dans un tel scénario, la boîte de rangement du masque peut s'activer et placer le masque en position de fuite (permanente ou temporaire).

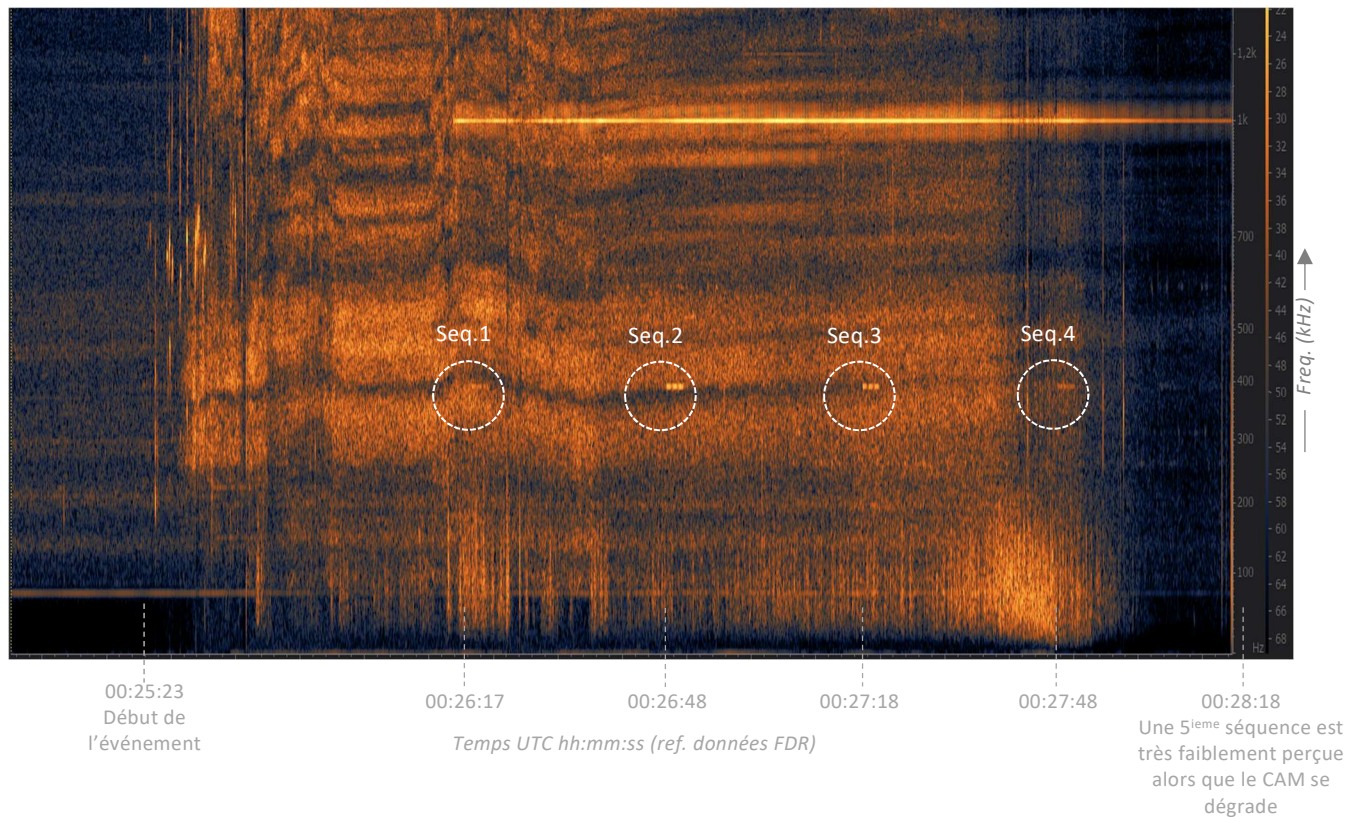
Les essais sur une reproduction de chaîne d'oxygène d'A320 et sur plusieurs avions du même type montrent que l'interruption du débit commandée au moyen de ce bouton est d'une durée minimale de 0,9 s. Le détail des essais est reporté en annexe EVT8

L'appui sur ce bouton est le seul moyen pour l'équipage de couper l'arrivée d'oxygène. Ainsi l'interruption observée n'est pas liée à une action de l'équipage.

Résultat intermédiaire (Fait établi ou probable)

L'interruption du bruit de fuite d'oxygène (à t0 + 17,9 s) d'une durée de 0,6 s n'est pas liée à une action de l'équipage.

4.7.7 Porte du cockpit ouverte ou fermée



Le « triple low chime », correspondant à l'alarme « Lavatory Smoke », est perceptible sur le CVR (première émission à 00 h 26 min 17 soit à t0 + 47 s) via la voie du CAM. Ce signal est généré sur les haut-parleurs de cabine toutes les trente secondes. Les trois émissions suivantes sont également perceptibles ; le CAM est ensuite trop dégradé pour les capter.

Une augmentation de 10 dB du signal « triple low chime » est mesurée sur les séquences 2 et 3. Ce gain de niveau est compatible avec une captation de l'alarme lorsque la porte du cockpit est ouverte (voir détail en annexe Lavatory). Les séquences 1 et 4 sont en conséquence très probablement captées porte fermée.

De plus, un bruit pouvant correspondre à une manipulation de la porte du cockpit est perceptible à 00 h 26 min 46.

Résultat intermédiaire (Fait établi ou probable)

Lors de la première émission de l'alarme « lavatory smoke », soit 47 secondes après le début de l'événement à 00 h 26 min 17, la porte du cockpit est fermée. Elle est ensuite en position ouverte (à 00 h 26 min 48 et à 00 h 27 min 18, potentiellement de façon continue sur cette période) puis de nouveau fermée.

Lorsque le bruit de fuite permanente cesse - ou qu'il atteint un niveau sonore si faible qu'il disparaît dans le bruit de fond du cockpit - l'ambiance sonore du cockpit (c'est-à-dire le fond musical) réapparaît, l'alarme sonore CRC cesse et l'alerte sonore de désengagement du pilote automatique se déclenche. Il n'y a à ce moment aucun mouvement ou bruit de porte perceptibles sur le CVR. La porte du cockpit est probablement fermée à cet instant.

Résultat intermédiaire (Fait établi ou probable)

La porte du cockpit est probablement fermée lorsque le pilote automatique se désengage et lorsque le CVR cesse de fonctionner à 00 h 29 min 54 soit t0+4min24s.

4.7.8 Déconnexion du Pilote automatique

À 00 h 29 min 39, l'alarme sonore (Cavalry charge) associée à la déconnexion de l'autopilote retentit à deux reprises dans le cockpit.

Les procédures demandent aux pilotes d'annuler l'alarme en appuyant sur le bouton MASTER WARN ou sur le bouton de prise de contrôle du side-stick (Take over pb).

Résultat intermédiaire (Fait établi ou probable)

L'enregistreur de paramètres n'a enregistré aucun changement de paramètres pouvant résulter d'une action de l'équipage après la déconnexion du pilote automatique.

5 ÉTUDE FEU – OXYGÈNE

Note : L'objectif de l'étude est double. D'une part, étudier certains phénomènes et notamment enregistrer le bruit produit pour pouvoir valider ou invalider des hypothèses quant au scénario de l'accident survenu lors du vol MS804 ; d'autre part tirer des enseignements plus larges sur les feux en présence d'oxygène en cockpit. C'est pourquoi, le périmètre de l'étude couvre des scénarios d'accidents plus vastes que ceux potentiels de l'accident survenu au SU_GCC. Le fait que les batteries et cigarettes aient par exemple été choisis comme sources externes d'ignition ne signifie pas que ce sont des sources d'ignition privilégiées. De la même façon, les effets du Halon sont étudiés sans que les conclusions ne soient directement transposées au vol MS804. Les conclusions spécifiques au vol MS804 sont établies au chapitre 5.6.

5.1 Introduction

Un feu est défini comme la combustion d'un carburant par de l'oxygène et apparaît lorsque de l'oxygène, un combustible et de la chaleur se combinent pour créer une réaction chimique autoentretenue.

La réaction chimique est une oxydation d'hydrocarbures. Lorsque du bois, du papier, du pétrole ou du gaz, brûlent par exemple, ce sont les hydrocarbures composant les matériaux qui s'oxydent au cours de la combustion.

Il est nécessaire d'initier la réaction d'oxydation par un apport de chaleur. L'oxydation dégageant de la chaleur, la réaction s'entretient ensuite dans le temps.

La pression d'oxygène et sa concentration influent sur l'inflammabilité d'un matériau. Plus l'oxygène est présent et plus le matériau sera facile à enflammer et plus la combustion sera rapide, de grande ampleur et atteindra des températures élevées.

La présence du dispositif de distribution d'oxygène a un impact double : (1) l'atmosphère peut se trouver enrichie en oxygène à proximité du dispositif d'alimentation ; la présence d'oxygène rend les éléments plus inflammables et un départ de feu plus probable. (2) Un feu qui endommage les circuits oxygène, s'il provoque la rupture d'un flexible, devient un feu enrichi en oxygène qui devient difficilement maîtrisable.

Ainsi, le circuit d'oxygène du cockpit est particulièrement critique et doit être résistant à divers mécanismes d'ignition (internes au dispositif et externes) afin d'éviter sa contribution à un feu dans le cockpit.

Des essais à taille réelle ont été réalisés pour étudier

- certains mécanismes d'ignition susceptibles d'affecter le système oxygène du cockpit ;
- la propagation d'un feu alimenté en oxygène ;
- les moyens d'extinction d'un feu alimenté en oxygène disponibles dans le cockpit.

Les essais ont été organisés avec l'aide du constructeur des équipements oxygène, en utilisant des équipements provenant d'aéronefs en démantèlement, dans les locaux de l'INERIS²⁸.

²⁸ Institut national de l'environnement industriel et des risques

5.2 Déclenchement d'un feu affectant le système oxygène

Les mécanismes d'ignition qui ont été étudiés sont les suivants :

- l'impact d'une source extérieure de chaleur ;
- une ignition interne aux flexibles par :
 - création d'une étincelle,
 - impact de particules,
 - décharge électrostatique,
- l'inflammation de graisses et poussières dans l'environnement proche du dispositif susceptible d'être enrichi en oxygène

5.2.1 Une source extérieure de chaleur

La certification demande que le système oxygène soit conçu et installé de telle sorte que les impacts d'une source d'ignition externe soient minimisés. Pour rappel, par convention dans le présent document, on parle de mécanismes d'ignition externes lorsqu'il s'agit d'éléments se trouvant à l'extérieur du dispositif oxygène, c'est-à-dire d'éléments se trouvant à l'origine en dehors des boîtes de rangement des masques.

Deux sources potentielles extérieures de chaleur ont été sélectionnées et testées :

- une batterie au lithium d'appareil électronique (smartphone, tablette, cigarette électronique) ;
- une cigarette incandescente.

5.2.1.1 Essais des batteries au lithium

L'objectif des essais était d'étudier l'emballage thermique de batteries au lithium d'équipements électroniques et d'appréhender leur capacité à endommager le circuit d'oxygène.

En vol, des équipements électroniques tels que smartphone, tablette ou cigarette électronique peuvent être posés sur la structure du cockpit ou dans les vide-poches qui se situent sur les côtés du cockpit, à proximité des masques à oxygène.



Figure 23 : vide-poche d'avion (ici Airbus A320)

Lors des essais, les smartphones, les cigarettes électroniques et les tablettes ont été placés sur une plaque chauffante pouvant atteindre une température de 400 °C et ainsi entraîner un emballement thermique des batteries internes. Les équipements ont été testés en champ libre (posés sur un bloc de béton cellulaire) ou placés dans un vide-poche d'avion. La température de la plaque chauffante a été augmentée progressivement jusqu'à provoquer l'emballement thermique de la batterie de l'équipement.

En tout, huit essais ont été réalisés :

	Équipement testé	Position
Batterie_Lithium_01 ²⁹	Smartphone	Champ libre
Batterie_Lithium_02	Smartphone	Champ libre
Batterie_Lithium_03	Smartphone	Vide-Poche
Batterie_Lithium_04	Tablette	Champ libre
Batterie_Lithium_05	Tablette	Vide-Poche
Batterie_Lithium_06	Cigarette électronique	Champ libre
Batterie_Lithium_07	Cigarette électronique	Champ libre
Batterie_Lithium_08	Cigarette électronique	Vide-Poche

Lors des essais, l'emballement thermique des batteries s'est caractérisé visuellement par une libération soudaine de fumées blanches et épaisses. Aucun phénomène sonore violent (craquement soudain, détonation) n'a été produit ; seul un souffle ou un sifflement pouvait être perçu durant l'éjection des gaz. L'éjection de particules incandescentes a été souvent observée durant ces essais, mais la combustion de ces particules s'est avérée être très rapide et insuffisante pour propager le feu à l'environnement. Les emballements ont tous été précédés de dégagement de fumées pendant plusieurs minutes.

²⁹ Les vidéos de ces essais sont annexées à l'étude.



Figure 24 : exemple de libération de fumée lors de l’emballement thermique d’une batterie (essai Batterie_Lithium_04)

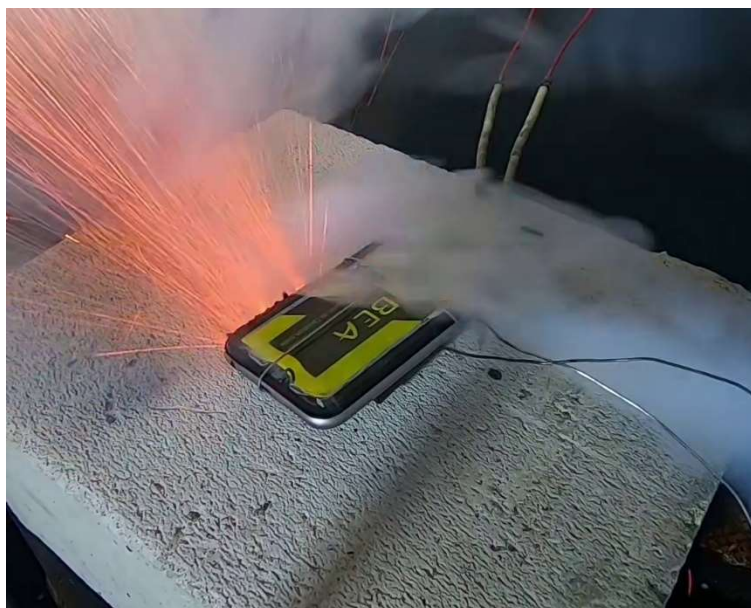


Figure 25 : libération de particules incandescentes lors de l’emballement thermique d’une batterie (essai Batterie_Lithium_02)

Une apparition de flammes a été observée sur un seul essai effectué sur une cigarette électronique en champ libre (essai Batterie_Lithium_07). Il est probable que cette inflammation a été due à la présence d’un ruban adhésif collé³⁰ sur le corps de la cigarette, qui s’est embrasé lors de l’essai.

³⁰ Ce scotch avait été apposé par le BEA pour les besoins de l’essai.

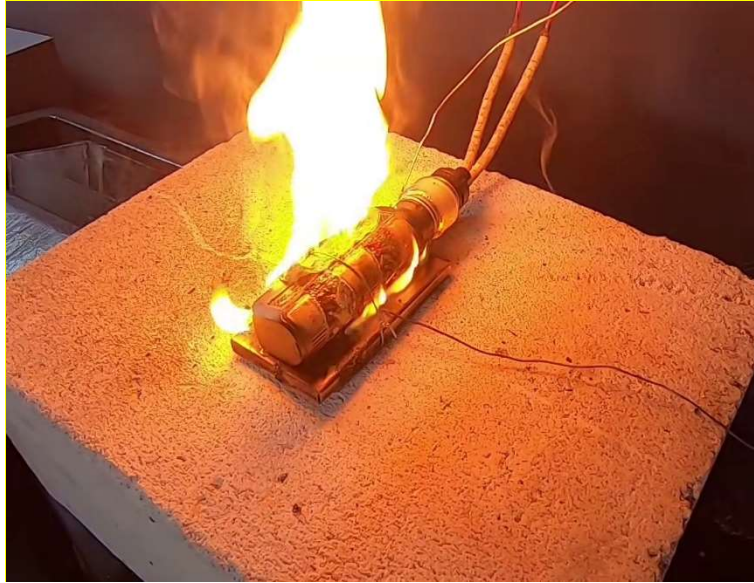


Figure 26 : flammes visibles lors de l'essai Batterie_Lithium_07

Dans les conditions des essais, seul un élément extérieur à la cigarette électronique (ruban adhésif) a probablement favorisé un départ de feu à l'issue de l'emballage de la batterie.

Il est possible que certains des équipements électroniques testés, aient été équipés de batteries protégées par un dispositif de soupapes de surpression qui libèrent les gaz en cas de gonflement de la batterie ; ce dispositif évite l'auto-inflammation des gaz.

Les tablettes sont généralement dotées de batteries de fortes capacités. Leur architecture interne est souvent composée de plusieurs modules de batteries de petite taille (trois dans le cas des tablettes qui ont été testées). Ainsi, l'emballage thermique d'une tablette n'est pas plus violent que celle d'un smartphone ou d'une cigarette électronique ; l'événement se décompose en une succession d'emballages thermiques correspondant à chacune des batteries.

Lors des essais réalisés sur les équipements placés dans les vide-poches, aucun départ d'incendie n'a été constaté. Seul le dégagement de denses fumées blanches a été observé.



Figure 27 : dégagement de fumées constaté lors de l'essai Batterie_Lithium_05

Plusieurs thermocouples étaient installés afin de mesurer la température de la plaque chauffante, celle de la batterie³¹, ainsi que la température à différents endroits dans le volume environnant les équipements électroniques.

Les courbes de température sont représentées sur les graphes ci-dessous.

³¹ Un seul thermocouple était placé sur la batterie. La valeur de température mesurée ne représente pas nécessairement la température maximale de cette dernière.

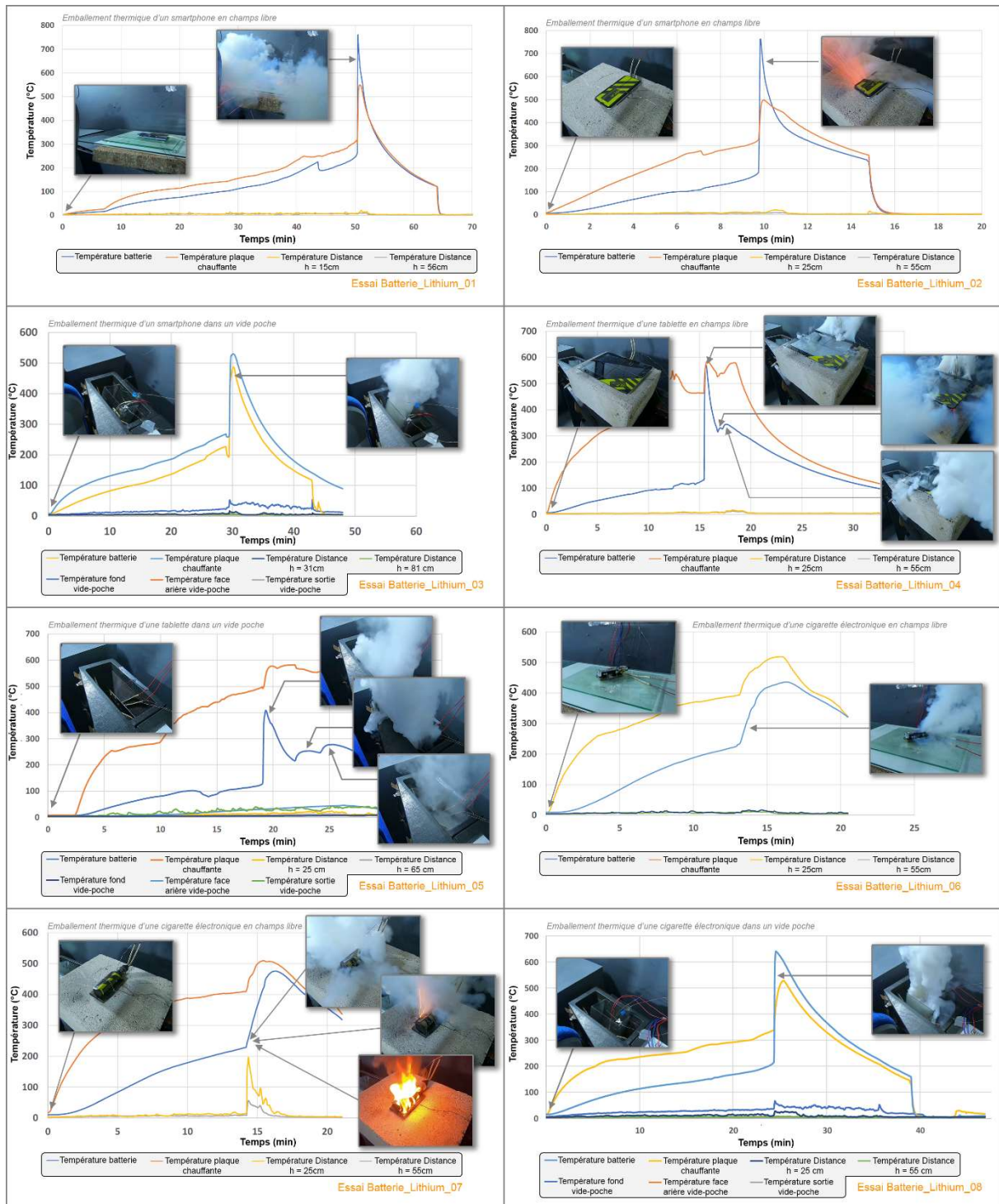


Figure 28 : courbes de températures – Essais Batteries Lithium - (Source BEA - INERIS)

Les emballages thermiques sont apparus à des températures de batterie comprises entre 100 °C (cas des tablettes) et 250 °C (cas des smartphones) suivant les appareils. La température de la batterie augmentait alors quasi instantanément jusqu'à 550 °C en moyenne, les valeurs pouvant atteindre 750 °C (cas des smartphones).

Aucune élévation significative de température dans l'air environnant les batteries n'a été mesurée. Lors des essais réalisés dans le vide-poche, la température à l'intérieur de la boîte a augmenté sans dépasser les 50 °C.

Une seule élévation de la température a été observée dans l'environnement (env. 200 °C à 25 cm de distance et env. 50 °C à 55 cm de distance), lors de l'essai Batterie_Lithium_07 durant lequel le scotch sur la cigarette électronique a pris feu.

D'un point de vue psychoacoustique, le son produit par l'emballage d'une batterie lithium a été semblable à un bruit de souffle de niveau sonore moyen à faible. La durée du souffle a varié entre 1,5 et 4 secondes selon l'équipement testé ; sa tonalité variait sur la durée et le bruit de souffle a parfois été associé à des sifflements légers.

CONCLUSION

Dans les conditions utilisées pour les essais sur les batteries au lithium des appareils électroniques, l'emballage thermique d'une batterie a eu pour conséquence la libération soudaine de fumées denses blanches avec une élévation forte et rapide de la température de cette dernière, sans transfert significatif de chaleur au milieu environnant. Les particules incandescentes éjectées n'ont pas eu une énergie thermique suffisante pour enflammer les matériaux. Le seul départ de feu constaté a eu lieu lors de l'enflamment d'un scotch apposé sur une cigarette électronique.

5.2.1.2 Manipulation d'une cigarette incandescente

5.2.1.2.1 Essai sur boîte sans apport extérieur d'oxygène

L'objectif de l'essai était d'étudier la résistance d'un flexible de masque à oxygène à une cigarette incandescente. L'essai correspondait au scénario de chute d'une cigarette allumée dans la boîte de rangement du masque à oxygène.

Séquence de l'essai :

Une cigarette incandescente a été mise en contact avec le flexible d'un masque à oxygène. La pression d'oxygène dans le flexible était de 5 bar et l'ensemble du dispositif était placé à l'air ambiant.

La cigarette s'est éteinte au bout d'une dizaine de secondes. La protection extérieure tressée du flexible ainsi que son âme (tuyau souple en silicone) ne présentaient pas de dégradation ou d'altération.

Ainsi, dans les conditions de tests, une cigarette incandescente placée dans une enceinte à l'air libre, au contact d'un flexible d'oxygène sous pression, n'a pas dégradé le système et n'a pas déclenché d'incendie. L'absence de dégradation est cohérente avec la certification qui demande aux équipementiers d'utiliser des matériaux résistants au feu pour limiter les départs d'incendies et leur propagation.



Figure 29 : essai à l'air libre (source BEA)

5.2.1.2.2 Essais sur boîtes enrichies en oxygène

Plusieurs sources d'enrichissement ponctuel de la boîte de rangement du masque peuvent survenir en service. Une fuite d'oxygène de l'ensemble boîte et masque à oxygène est tolérée par le constructeur ; elle peut être de quelques millilitres par minute et l'oxygène peut s'accumuler dans la boîte de rangement du masque à oxygène. De plus l'équipage doit réaliser le test d'alimentation en oxygène des masques lors de la préparation des vols.

Il est ainsi possible que la boîte de rangement du masque soit accidentellement ou occasionnellement enrichie en oxygène. L'oxygène est plus lourd que l'air majoritairement composé d'azote et se concentre dans le fond de la boîte, cette dernière étant relativement hermétique.

Les essais de manipulation de cigarettes incandescentes ont été réalisés dans des boîtes enrichies en oxygène via une pression sur le rotacteur *EMERGENCY* du régulateur du masque. Lors de la pression sur le rotacteur *EMERGENCY*, il a été mesuré dans la boîte de rangement du masque une augmentation de la concentration en oxygène de 2 à 3 % par seconde.

Pour chacun des essais, une boîte de rangement de masque ajourée, a été utilisée ; une surface vitrée rendait visible l'intérieur de la boîte afin d'observer la succession d'événements produits lors d'un potentiel endommagement de l'ensemble boîte et masque à oxygène.

Un masque à oxygène et son flexible sous une pression de 5 bar d'oxygène étaient rangés dans la boîte. Une cigarette incandescente fixée à l'extrémité d'une perche a été manipulée à proximité de la boîte puis dans un second temps la cigarette a été introduite (chute) à l'intérieur.

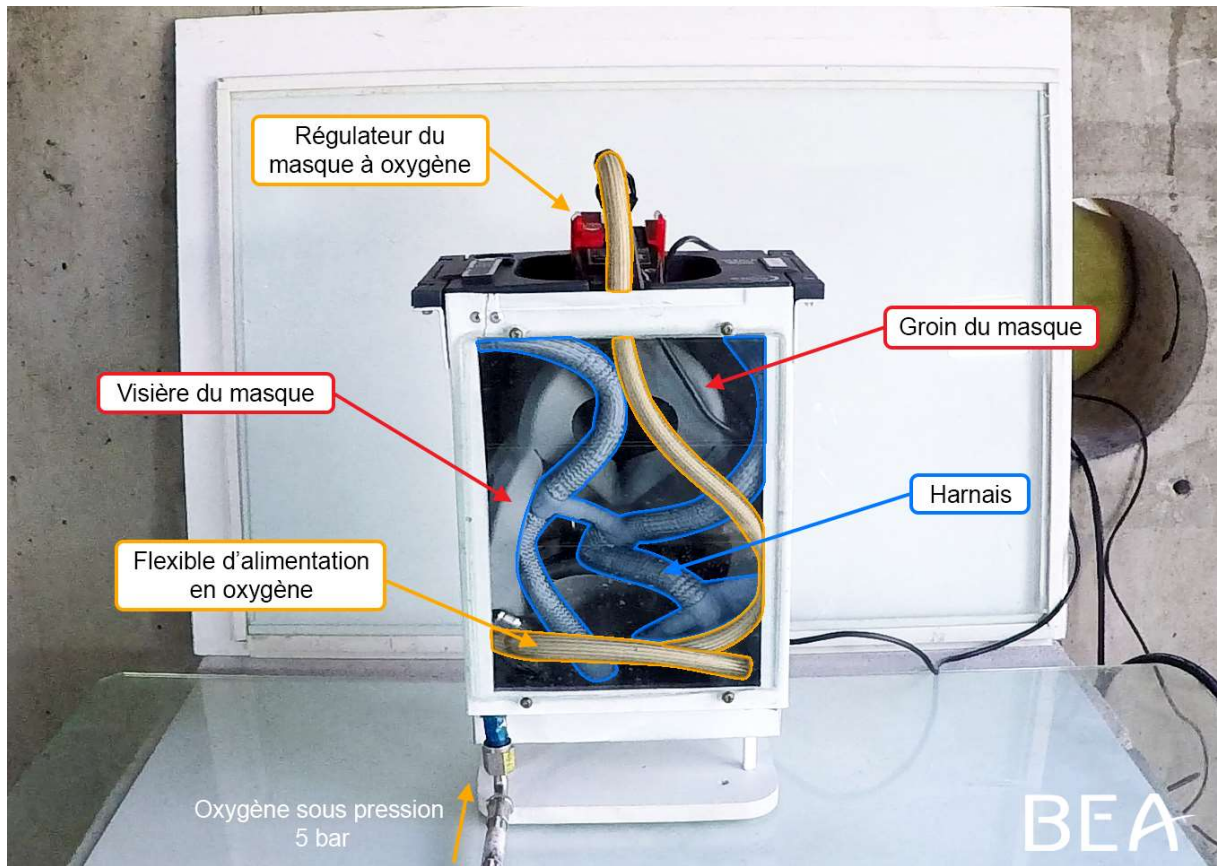


Figure 30 : boîte de rangement du masque ajourée (source BEA)

Chaque essai a été subdivisé en plusieurs séquences :

- manipulation de la cigarette à proximité de la boîte ;
- manipulation de la cigarette à l'entrée de la boîte au niveau du régulateur du masque ;
- introduction de cendres dans la boîte de rangement du masque ;
- introduction de la cigarette entière dans la boîte.

Ces essais ont été réalisés trois fois avec différentes concentrations en oxygène dans la boîte.

	Durée d'enrichissement en oxygène
Cigarette_01	15 s via l'électrovanne du circuit avec le rotacteur du masque en position <i>EMERGENCY</i>
Cigarette_02	20 s par un appui sur le rotacteur <i>EMERGENCY</i>
Cigarette_03	20 s par un appui sur le rotacteur <i>EMERGENCY</i>
Cigarette_04	7 s par un appui sur le rotacteur <i>EMERGENCY</i>

Séquences 1 & 2 : Manipulation de la cigarette à proximité de la boîte

Lors de la manipulation de la cigarette incandescente à proximité de la boîte, aucune variation de l'intensité de la combustion n'a été observée. La cigarette s'est à chaque fois consommée à la même vitesse qu'à l'air libre. L'oxygène étant plus lourd que l'air, bien que la boîte soit enrichie en oxygène, à l'extérieur de la boîte ou à proximité directe du régulateur, la composition de l'atmosphère est restée voisine de la composition normale de l'air ambiant.

Séquences 3 : Introduction de cendres

Aucune inflammation ne s'est produite lors de l'introduction de cendres dans la boîte. La masse de ces dernières était probablement trop faible pour conserver la chaleur nécessaire à l'apparition d'une flamme. La cendre s'est consumée instantanément.

Séquences 4 : Introduction d'une cigarette

Lors de l'introduction d'une cigarette incandescente dans la boîte, une augmentation soudaine de l'inflammation de cette dernière s'est produite. La combustion était plus intense et plus blanche. Des flammes étaient visibles et une fumée noire se dégageait.

Lors du premier essai (Cigarette_01), la cigarette s'est posée sur le harnais de maintien du masque et l'a perforé. Le feu ne s'est pas propagé à d'autres parties du masque et s'est éteint.



Figure 31 :essai Cigarette_01 – Séquence vidéo (Source BEA)

Lors du deuxième essai (Cigarette_02), la cigarette s'est posée sur l'enveloppe en silicone du groin du masque à oxygène et a commencé à consumer cette partie du masque. Lorsque l'oxygène contenu dans la boîte a été consommé, l'intensité du feu s'est réduite et le feu s'est éteint.

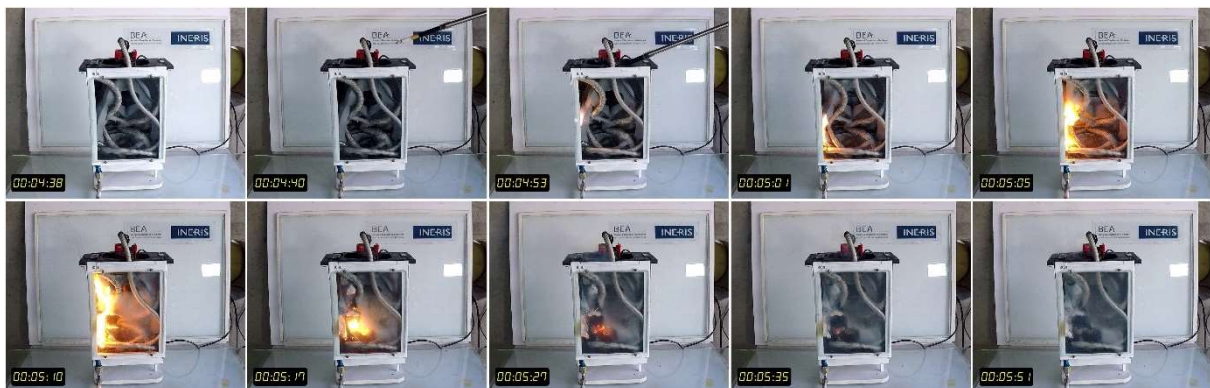


Figure 32 : essai Cigarette_02 – Séquence vidéo (Source BEA)

Lors des deux essais suivants, la cigarette a été placée en contact avec le flexible d'alimentation en oxygène du masque. Les flammes ont endommagé l'enveloppe du flexible et après quelques secondes, son âme (tuyau de silicone) s'est percée ; une fuite à une pression de 5 bar a été provoquée et l'incendie s'est rapidement développé dans la boîte, en produisant des flammes qui s'échappaient de la boîte de rangement du masque. La coupure de l'arrivée d'oxygène a permis l'extinction de l'incendie après quelques secondes.

Éléments d'analyse audio

Essai Cigarette 03 : des bruits de crépitements sont audibles sur l'enregistrement pendant 28 s, correspondant à la combustion de l'enveloppe du flexible. Le percement qui est survenu ensuite s'est traduit par un bruit large bande. L'embrassement du masque a provoqué un bruit d'emballlement sonore 1 s plus tard. Le micro du masque a cessé de fonctionner 6 s après l'embrassement du masque.

Essai Cigarette 04 : des bruits de crépitements pendant 22 s correspondent à la combustion de l'enveloppe du flexible. Le percement qui suit s'est traduit par un bruit large bande. L'embrassement du masque a provoqué un bruit d'emballlement sonore 0,5 s plus tard. L'alimentation en oxygène a été interrompue avant que le microphone du masque ne soit endommagé.

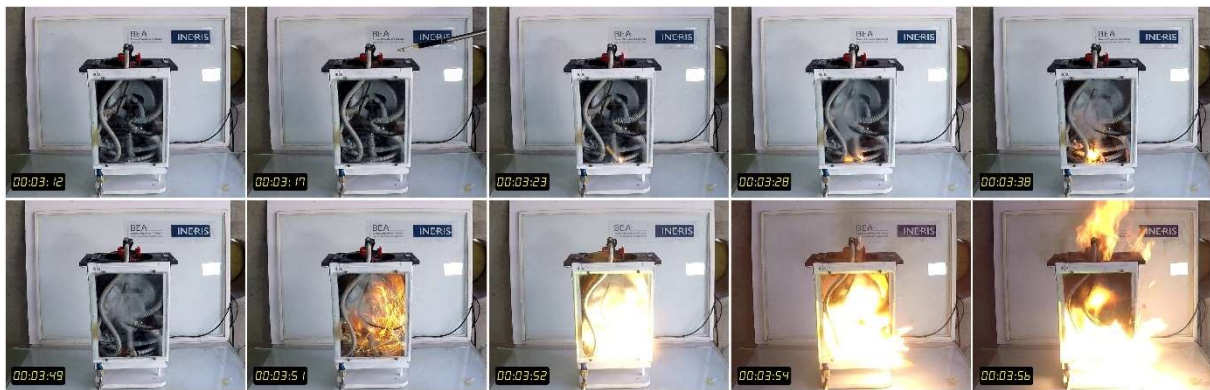


Figure 33 : essai Cigarette_03 – Séquence vidéo



Figure 34 : essai Cigarette_04 – Séquence vidéo (source : BEA)

CONCLUSION

Dans les essais réalisés, la manipulation d'une cigarette à proximité immédiate d'une boîte de rangement de masque à oxygène, même si cette dernière a été enrichie en oxygène, n'a pas entraîné de variation dans la combustion de la cigarette et n'a pas provoqué d'incendie. L'introduction de cendres chaudes dans la boîte de rangement n'a pas créé de départ de feu.

À chaque essai, l'introduction d'une cigarette dans une boîte de rangement de masque préalablement enrichie en oxygène a entraîné une accélération de sa combustion et la production d'une flamme plus intense. Dans les cas où la cigarette s'est trouvée en contact avec un flexible d'alimentation en oxygène, le feu a attaqué le flexible, percé le tuyau interne en silicone et provoqué une fuite d'oxygène sous pression. La fuite a intensifié l'incendie qui s'est ensuite propagé rapidement.

5.2.2 Mécanismes d'ignition internes

La certification indique que le système ne doit pas comporter de dangers intrinsèques. En particulier, le système doit être conçu de telle sorte que la défaillance seule d'un de ses composants ne conduise pas à un feu incontrôlé au niveau avion et que dans tous les cas, un tel feu soit extrêmement improbable.

L'analyse de risque du système oxygène doit notamment s'intéresser aux défaillances des différents composants, aux propriétés des matériaux et aux mécanismes d'ignition internes. Si un mécanisme d'ignition interne existe, la chaîne de propagation du feu associé doit être étudiée.

5.2.2.1 Une source de chaleur provoquant une ignition à l'intérieur du dispositif

L'objectif était de décrire d'un point de vue sonore (apparition de phénomènes transitoires, bruits, souffle...) la séquence que provoquerait un endommagement interne, de déterminer le niveau de dégradation produit sur le système individuel d'oxygène (boîte de rangement du masque et masque) placé sous une pression de 5 bar, et de préciser la chronologie de ces dommages (temps de propagation).

Pour provoquer artificiellement un endommagement interne du réseau de distribution d'oxygène - et plus précisément du flexible du masque à oxygène - un dispositif déclencheur d'étincelle³² a été introduit dans le flexible.



Figure 35 : dispositif de production d'étincelle (Source BEA)

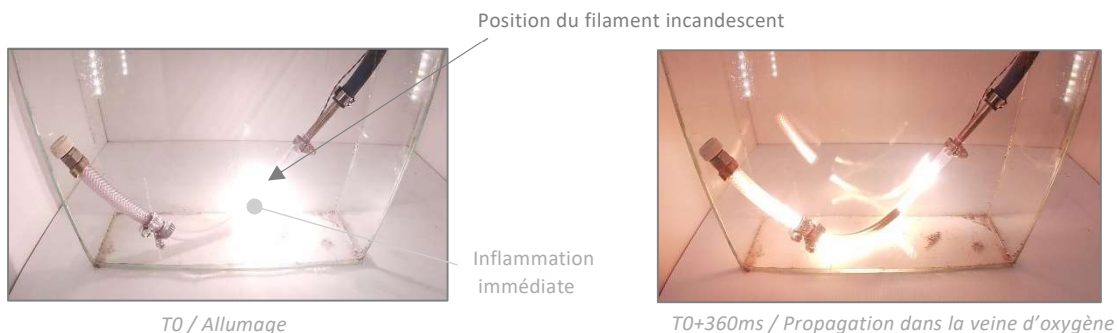


Figure 36 : feu dans le flux d'oxygène (Source BEA)

³² Liaison bifilaire qui alimente en basse tension en continu un filament ; ce dernier devient incandescent lorsqu'il est connecté – par un bouton-poussoir - à la source de tension.

Un premier essai réalisé dans un tube transparent a confirmé que l'inflammation au point de création de l'étincelle était immédiate.

Trois essais ont été réalisés à partir d'une boîte de rangement de masque ajourée en introduisant le dispositif d'endommagement à mi-longueur du flexible du masque.

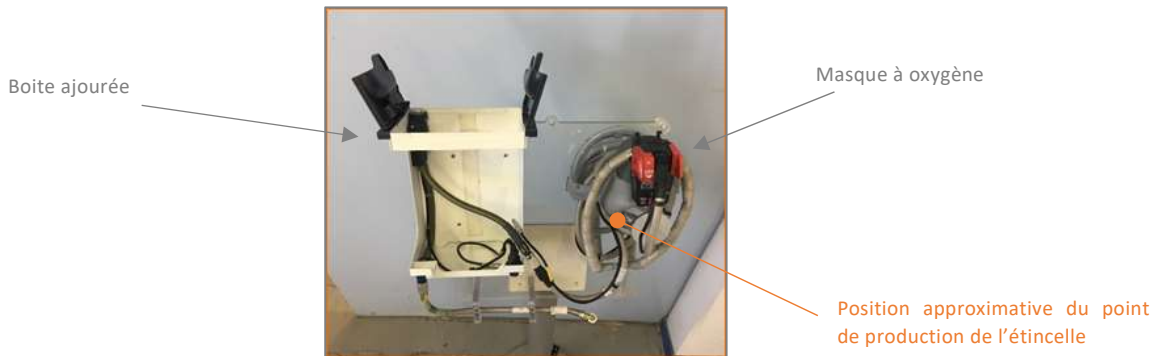


Figure 37 : introduction du dispositif dans le flexible d'oxygène du masque (Source BEA)

Note : Durant ces essais le combustible que représente le support de visière (silicone) et la visière (polycarbonate) ont été retirés.

Essais : Le volume de la boîte de rangement du masque a été préalablement enrichi par une pression de quelques secondes (5 s) sur le rotacteur *EMERGENCY* du régulateur du masque à oxygène.



Figure 38 : endommagement interne du flexible d'oxygène du masque (Source BEA)

Durant le premier essai, un dommage immédiat s'est produit à l'intérieur du flexible (apparition d'une lueur mobile dans le conduit) ; le percement du flexible et la propagation du feu aux éléments environnants se sont produits 42 secondes après la création de l'étincelle.

Lors du second essai, aucun dommage interne immédiat n'a été détecté ; le percement et la propagation à l'environnement sont intervenus 30 secondes après la création de l'étincelle.

Le dernier essai n'a pas produit d'embrasement de la boîte³³. Le percement s'est produit 18 secondes après la création d'étincelle.

La production d'une étincelle dans le flexible d'alimentation en oxygène du masque a créé un percement du flexible avec un délai de 20 à 40 secondes. Le percement s'est dans certains cas accompagné d'un feu se propageant rapidement aux éléments environnants lorsque le flux d'oxygène était maintenu.

CONCLUSION

Pour les trois essais, la création d'une étincelle dans un flexible d'arrivée d'oxygène du masque a produit instantanément une inflammation.

L'inflammation n'a pas eu un effet détonnant. Elle a conduit à un percement du flexible dans un délai de 20 à 40 s.

Le percement s'est dans certains cas accompagné d'un feu se propageant rapidement aux matériaux environnants lorsque le flux d'oxygène était maintenu.

5.2.2.2 Impact de particules métalliques dans le circuit d'oxygène

L'impact de particules fait partie des mécanismes d'ignition internes à considérer dans les analyses de dangers. Ce danger est notamment relatif aux particules qui pourraient être introduites dans le circuit lors d'opérations de maintenance

Lors de la maintenance des systèmes d'oxygène d'un avion de transport commercial, une attention particulière est apportée pour ne pas contaminer le circuit de distribution d'oxygène.

Il est cependant possible que des particules soient introduites de manière fortuite dans les conduits qui véhiculent le flux d'oxygène. Par exemple les opérations de remplacement d'un ou de plusieurs sous-ensembles du dispositif d'oxygène individuel (boîte de rangement, masque...) sont susceptibles de produire des résidus métalliques lors des opérations de connexion par vissage des éléments (exemple: rupture partielle de filets de vis, de joint métallique, ou de raccord).

Ces particules métalliques pourraient présenter un risque d'ignition du système d'oxygène lors de la circulation du gaz sous pression. Lorsque le gaz est mis en mouvement, la particule introduite accidentellement avance dans le circuit en accélérant. Les divers changements de direction des conduits souples ou rigides peuvent potentiellement provoquer des chocs entre la particule et d'autres éléments métalliques (filtre, coude...) qui composent le dispositif de distribution d'oxygène. Ce choc peut s'accompagner d'une augmentation élevée et localisée de la température (liée au transfert de l'énergie cinétique) qui, dans un environnement riche en oxygène, peut se transformer en départ d'incendie. On parle alors de « *coup de feu* ».

³³ Le percement est survenu 2 s après l'arrêt d'alimentation en oxygène de la boîte de rangement du masque et du masque.

D'après la littérature³⁴, le scénario de départ de feu lié à l'impact d'une particule métallique dans un circuit d'oxygène d'avion de transport commercial est possible. Les critères nécessaires à ce départ de feu sont :

- des particules qui circulent dans un flux d'oxygène ;
- une vitesse d'avancement des gaz supérieure à 30 m/s ; et
- un plan d'impact compris entre 45° et 90° par rapport à la trajectoire de la particule.

Des tests ont été réalisés dans un environnement de laboratoire pour tenter de reproduire ce phénomène. Un banc de test a été créé permettant de projeter à haute vitesse des particules contre un élément à tester.

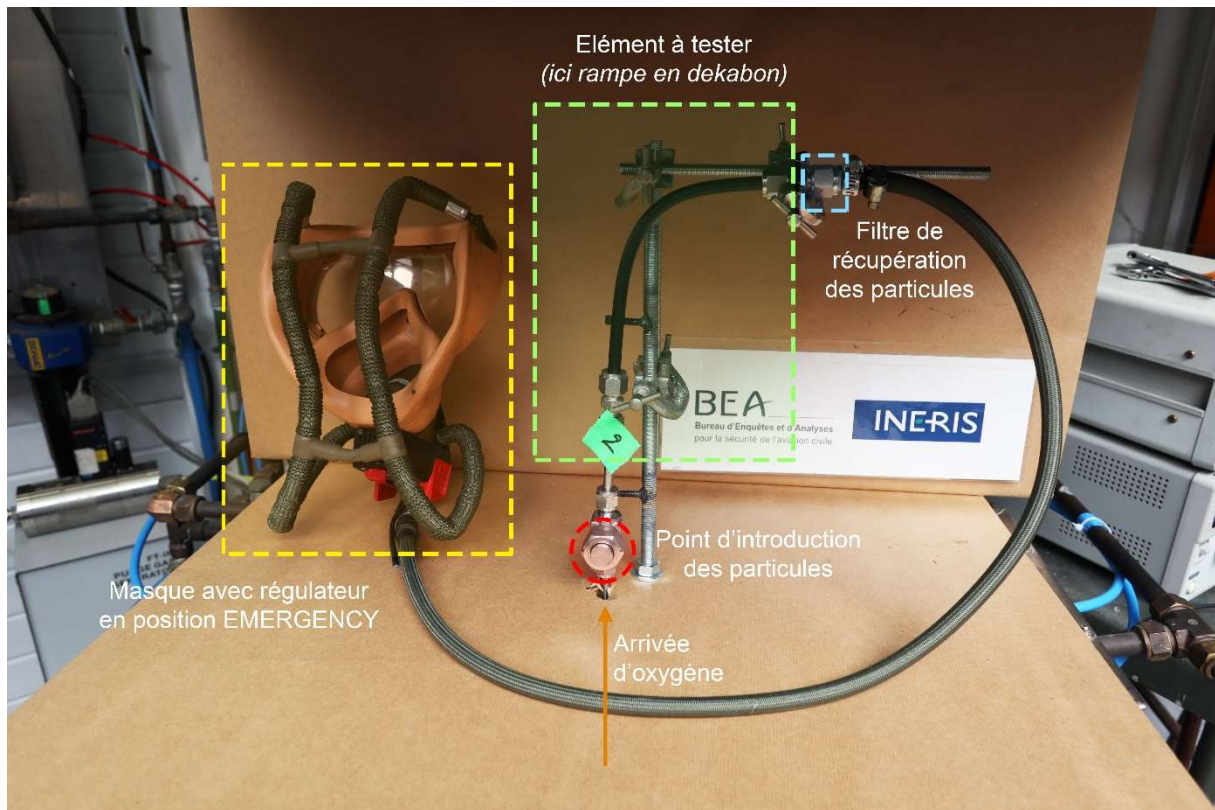


Figure 39 : circuit de test (source : BEA)

Description de l'installation : Le circuit de test était alimenté par de l'oxygène sous pression de 5 bar. Un masque positionné en bout de ligne avec le rotacteur sur la position EMERGENCY permettait d'assurer une perte de charge cohérente avec celle d'un circuit d'oxygène d'avion.

L'oxygène passait à travers un filtre sur lequel étaient déposées des particules métalliques. Le flux d'oxygène et de particules circulait dans le circuit jusqu'à l'élément à tester. Les particules étaient ensuite récupérées sur un filtre pour éviter de saturer le masque à oxygène placé en bout de ligne.

Chaque élément du circuit a été testé avec des particules de différentes tailles provenant de différents matériaux. L'objectif était d'identifier le couple « élément/particule » le plus susceptible de créer le phénomène de « coup de feu » recherché.

³⁴ Doc NASA.

Au total, cinq éléments se trouvant dans le circuit d'oxygène localisés dans la boîte de rangement ou le régulateur du masque ont été considérés :

Éléments à tester	
1	Coude d'entrée à 90°
2	Tuyau en Dekabon
3	Piston de vanne de boîte – dans cette partie du circuit, le flux d'oxygène fait un 180°
4	Raccord 135° d'entrée du régulateur de masque
5	Filtre d'entrée de masque à oxygène

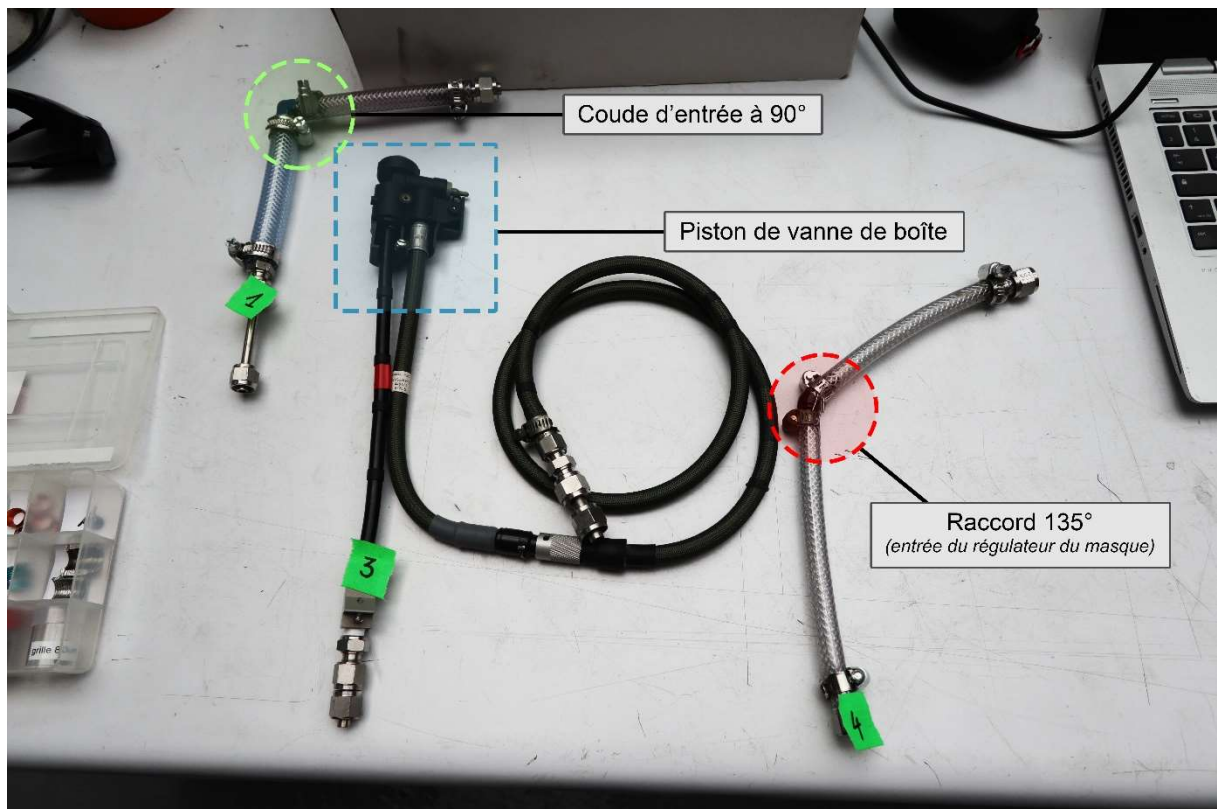


Figure 40 : éléments du masque testés lors des essais particules (Source : BEA)

Les particules ont été créées à partir d'éléments du circuit d'oxygène :

Particules	
A	Aluminium provenant du coude d'entrée de boîte de rangement du masque
B	Cuivre provenant de joints (« crushseal ») du circuit de distribution
C	Aluminium provenant du tuyau en Dekabon
D	Acier inoxydable provenant des tubes flexibles d'alimentation en oxygène

Pour chaque matériau, des particules de deux tailles ont été réalisées :

- de l'ordre de 300 µm ;
- de l'ordre du millimètre.

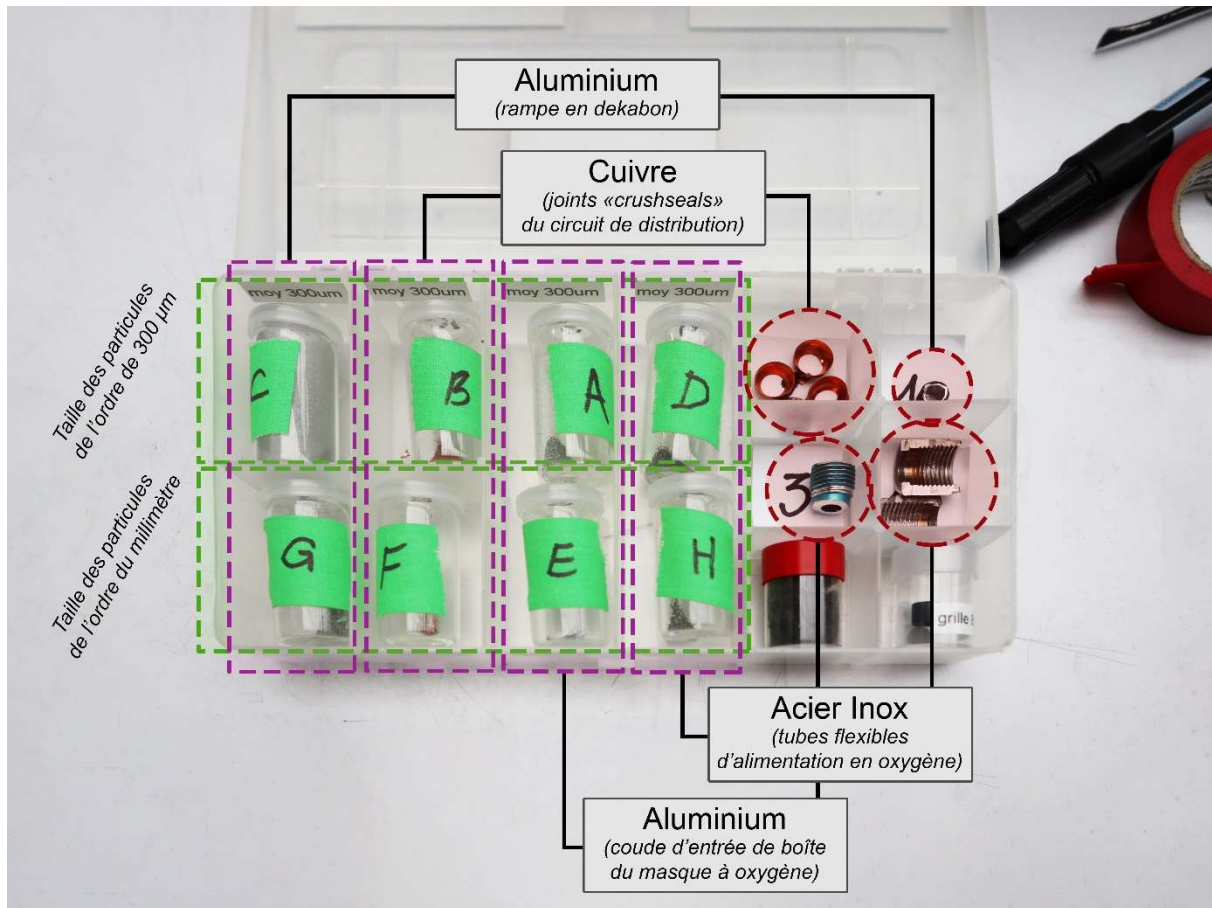


Figure 41 : particules utilisées (Source : BEA)

Pour chaque essai, plusieurs impulsions d'oxygène sous pression moyenne de 5 bar, sous un débit constant de 200 l/min ont été envoyées dans le circuit (cela correspondait à une vitesse d'avancement des gaz estimée à plus de 50 m/s). Une caméra thermique orientée sur l'élément à tester a permis de surveiller la potentielle élévation de température locale lors du coup de feu.

Les essais pour chaque couple « élément/particule » ont été réalisés entre trois et cinq fois avec différentes quantités de particules.

Au total, 76 essais ont été réalisés.

Aucun « coup de feu » ou élévation de température n'a été observé pendant les essais.

Note. En raison de l'architecture du banc, certaines particules ont pu être bloquées dans le filtre et ne pas être mises en mouvement à chaque mise en pression (trois à cinq mises en pression successives par couple « élément/particule »). Les possibilités de collision de particules avec un élément sont ainsi inférieures au nombre d'essais.

Le phénomène de « coup de feu » a un caractère aléatoire. De nouveaux tests pourraient être réalisés en modifiant les conditions d'essais pour augmenter l'échantillon et la probabilité de reproduire un « coup de feu ».

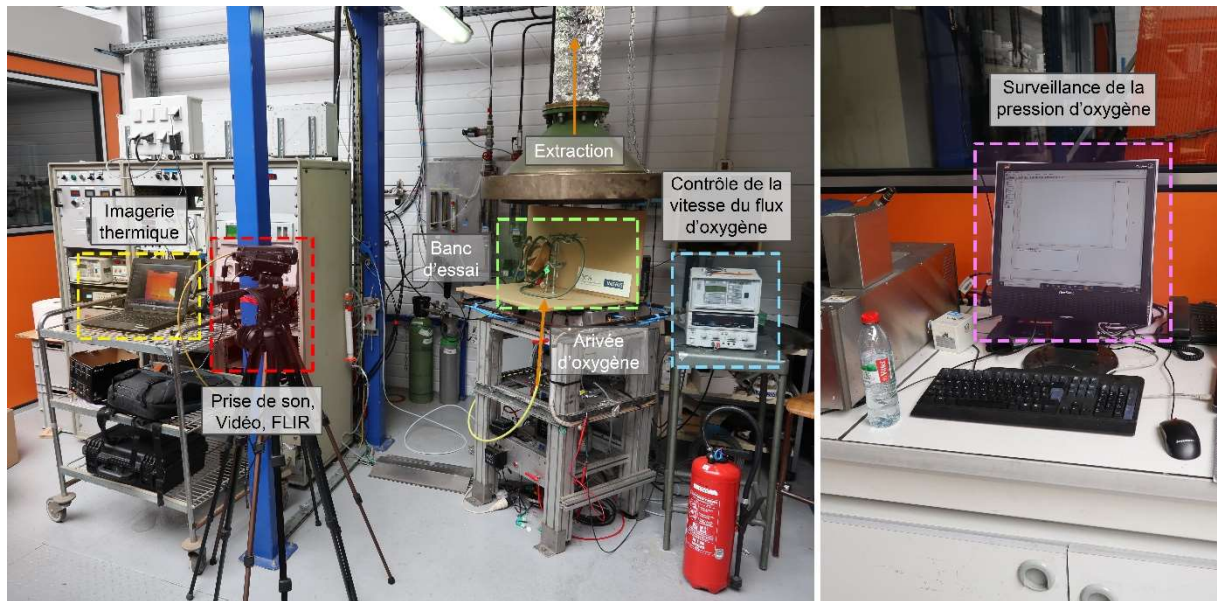


Figure 42 : vue globale du dispositif des essais particules (Source : BEA)

CONCLUSION

Le phénomène de « coup de feu » décrit dans la littérature n'a pas été reproduit dans les conditions de tests adoptées.

5.2.2.3 Ignition liée à une décharge électrostatique

La décharge de charges électrostatiques accumulées par friction ou écoulement peut dans certains cas libérer suffisamment d'énergie pour enflammer les matériaux, et plus particulièrement lorsque l'environnement est riche en oxygène. Cela peut arriver lorsque les matériaux utilisés dans des systèmes présentent des différences de potentiel électrique.

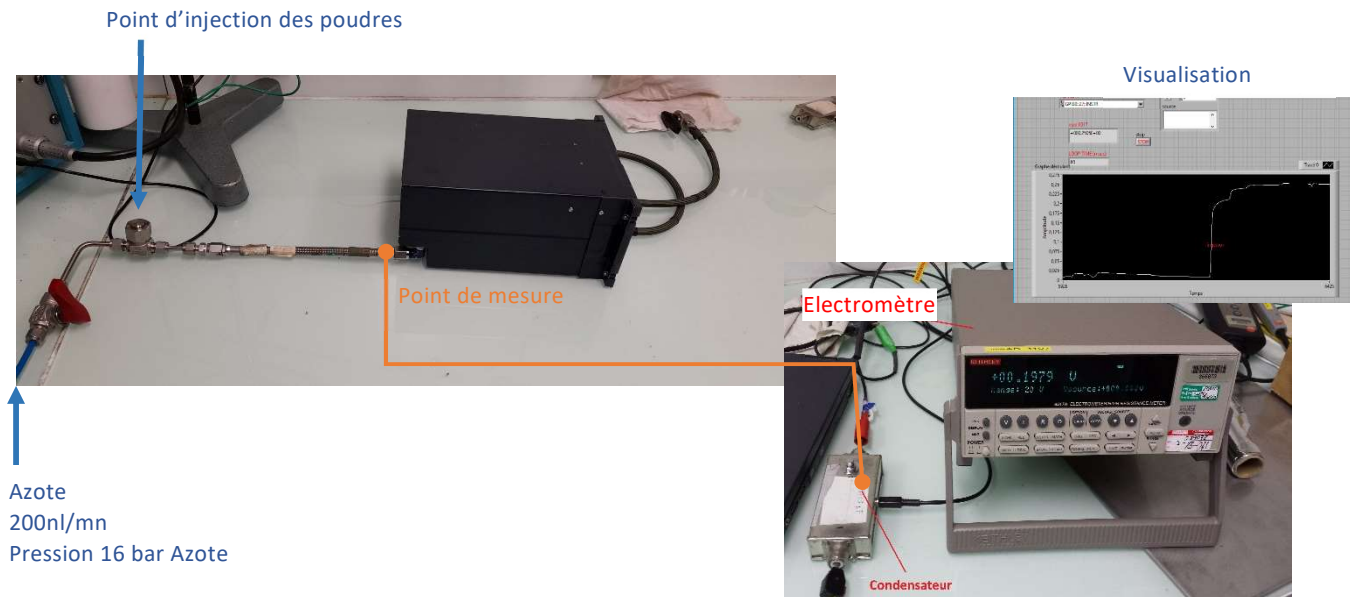
L'objectif était de déterminer si les charges électrostatiques générées par la dynamique du passage de l'oxygène, associé au mouvement de particules dans le système, pouvaient créer un arc susceptible de générer un départ de feu.

Des mesures de charges électrostatiques ont été réalisées en différents points d'un système complet d'oxygène (tuyau d'alimentation, boîte de rangement, masque) dans lequel circulait un flux d'azote sous 6 bar à un débit de 200 l/min. Deux types de poudre ont été utilisés pour ces essais :

- de la poudre métallique conductrice (Aluminium de 400 μm) ;
- de la poudre de polystyrène isolante (600 μm).

Pour ces essais, le masque était rangé dans sa boîte, où l'accumulation de charges peut potentiellement être plus importante. Trois mesures ont été effectuées :

- au niveau du raccord fileté en entrée de boîte de rangement ;
- au niveau du tuyau en entrée du régulateur du masque ;
- au niveau du filtre dans le régulateur du masque.



Note: la charge se détermine par la relation $Q=C*U$ avec Q en nC, C en Farad, et U en Volt.

Figure 43 : mesure normalisée de charge électrostatique (conformément à la spécification technique CEI/TS 60079-32-1) (Source : INERIS)

Principe de mesure :

Le potentiel électrique (mesure instantanée de tension) prélevé sur le raccord d'entrée de la boîte de rangement du masque est accumulé durant une durée définie par un condensateur dont la charge moyenne est mesurée par un électromètre. Cette charge exprimée en nanocoulomb (nC) exprime le niveau de charge électrostatique accumulé au point de relevé

Les charges mesurées en nC lors de ces essais ont été les suivantes :

	Aluminium	Polystyrène
Raccord entrée boîte	2 nC	1 nC
Tuyau entrée régulateur	16 nC	2 nC
Filtre masque	22 nC	4 nC

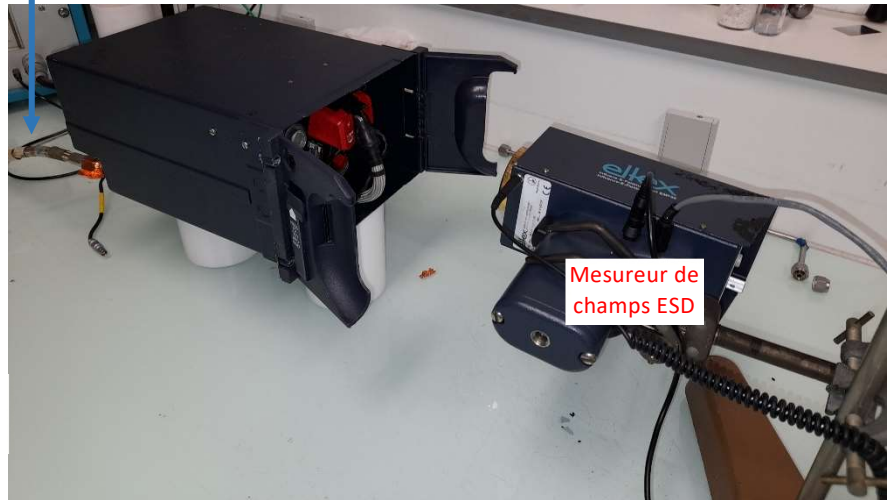
Ces valeurs étaient trop faibles pour créer une étincelle capable d'enflammer un élément du circuit d'oxygène. Par comparaison, en atmosphère explosive (ATEX), les charges électrostatiques présentent un risque pour des valeurs supérieures à 200 nC.

Une mesure de champ électrostatique a également été réalisée sur un masque rangé dans une boîte contenant des peluches de tissus polyester. Il n'est pas rare de trouver une accumulation de poussières dans le fond des boîtes de rangement des masques après plusieurs semaines ou mois d'utilisation en service. Les mesures ont été réalisées après l'injection d'azote dans le circuit.



Peluches de polyester déposées dans le fond de la boîte

Azote
200nl/mn
Pression 16 bar Azote



Mesureur de champs ESD

Figure 44 : mesure du champ électrostatique créé sur des résidus synthétiques accumulés au fond d'une boîte de rangement (Source : INERIS)

La tension maximale observée était de 255 V ; cette tension était trop faible pour générer une charge électrostatique susceptible de produire des étincelles capables d'enflammer des poussières ou particules métalliques. En environnement explosif (ATEX), la formation d'étincelles dangereuses est considérée pour une valeur supérieure à 2 kV.

CONCLUSION

Les mesures effectuées sur le circuit d'oxygène d'un avion de transport commercial semblent indiquer que les charges électrostatiques accumulées seraient trop faibles pour créer des étincelles capables d'enflammer des éléments du circuit lui-même ou des résidus organiques ou synthétiques qui seraient présents dans la boîte de rangement.

5.2.3 Inflammation de substances dans un environnement enrichi en oxygène

5.2.3.1 L'oxydation de graisse

L'article « [Fire and Explosion Hazards Due to Medical Oxygen Handling During Coronavirus Pandemic](#) » décrit précisément les réactions chimiques d'oxydation susceptibles de produire des températures atteignant l'auto-inflammation de certains matériaux. Ce document évoque le risque connu lié à l'usage de graisses en milieu oxygéné.

Selon une synthèse fournie par l'INERIS dans le cadre de l'étude :

Il est communément admis qu'une graisse peut réagir avec l'oxygène par oxydation (décomposition des molécules de graisse) conduisant à la production de radicaux (peroxydes), à l'augmentation de la température puis éventuellement à la combustion si l'apport d'énergie est suffisant (échauffement par friction ou création de charge électrostatique par exemple).

Normalement cette oxydation ne produit pas suffisamment de chaleur pour conduire à la combustion sauf dans des conditions particulières comme notamment :

- de grandes surfaces d'échange entre la graisse et l'oxygène ;
- une faible circulation de l'air (ce qui favorise l'accumulation de chaleur) ;
- une montée en pression adiabatique à la suite d'une injection rapide d'oxygène sous pression dans un système non pressurisé. Toutefois, une pression de 5 bar semble trop faible pour assurer une production suffisante d'énergie.

Tout matériau s'enflamme en présence d'oxygène à des températures plus faibles que sa température d'inflammation à l'air ambiant.

Dans le cadre de l'analyse d'événements survenus sur des systèmes oxygène de cockpit l'hypothèse de départ de feu lié à la présence de graisse ne peut être a priori immédiatement écarté, notamment si les traces de graisses incriminées sont à base d'hydrocarbures. Toutefois le départ de feu est plus difficile voire impossible si les graisses utilisées sont dites « non réactives » (par exemple des graisses fluorées). L'état de vieillissement d'une graisse doit aussi être prise en compte car il augmente le risque.

Le risque n'a pas fait l'objet d'expériences spécifiques dans le cadre de la présente étude « Feu-Oxygène ». Le seul test effectué a consisté en l'introduction volontaire de graisse lors d'un essai de propagation (Voir § 5.4) dans un raccord de boîte de rangement de masque à oxygène ; aucun feu ne s'est déclenché lors de l'admission de l'oxygène et de sa circulation dans le circuit placé sous une pression de 5 bar.

Ce test illustre que l'auto-inflammation de graisse dans un environnement riche en oxygène n'est pas systématique et qu'elle se produit dans des conditions spécifiques (type de graisse, pression d'oxygène, débit...).

Les variables à contrôler, telles que les conditions de déclenchement, le type de graisse, la pression d'oxygène, demanderaient l'établissement d'un protocole dédié et des tests multiples qui n'ont pas pu être réalisés dans le cadre de l'étude.

Le principal équipementier³⁵ de systèmes d'oxygène dédié à l'aviation de transport commercial, et l'organisme de référence³⁶ en matière d'analyse des risques sur les circuits d'oxygène et d'hydrogène ont produit une synthèse qui est présentée en annexe Inflammation des graisses et hydrocarbures. L'analyse qui y est faite indique que la seule présence de graisse exposée à une pression inférieure à 10 bar – ce qui est très supérieur à la pression de service d'une boîte de rangement de masque et du masque associé – ne peut générer un feu.

³⁵ SAFRAN Oxygen Systems.

³⁶ WHA International Inc / <https://wha-international.com/about/>

CONCLUSION

Les graisses sont des hydrocarbures qui réagissent avec l'oxygène de l'air pour former des peroxydes. Cette oxydation génère de la chaleur. La chaleur peut être en quantité suffisante pour démarrer un processus de combustion de la graisse.

Le risque représenté par la présence de graisse en milieu oxygéné est communément admis, pris en compte dans les procédures. Les conditions de déclenchement d'une auto-inflammation sont cependant peu documentées dans le domaine aéronautique.

Le seul test effectué a mis en évidence le fait que l'inflammation de graisse en milieu enrichi en oxygène n'est pas systématique.

5.2.3.2 L'embrasement de poussières

Les boîtes de rangement des masques peuvent contenir des poussières accumulées au fil du temps.

L'objectif des essais était de déterminer si un apport de chaleur peut conduire une inflammation des poussières susceptible d'endommager le système d'oxygène.

Pour reproduire une inflammation accidentelle de poussières, un dispositif produisant un arc électrique³⁷ a été introduit dans une enceinte saturée d'oxygène.



Figure 45 : étincelle produite par le système piézoélectrique (Source : BEA)

Un premier test a été réalisé sur des poussières d'origine domestique. Plusieurs tentatives d'allumage ont été réalisées en produisant une étincelle au sein de l'amas de poussières. Aucune amorce d'inflammation n'a été observée.

³⁷ La tête d'un allumeur piézoélectrique à friction est commandée à distance par une ligne bifilaire.



Figure 46 : poussières domestiques (Source : BEA)

Un second test a été réalisé sur des poussières prélevées dans trois avions au fond des boîtes de rangement de masque à oxygène. Plusieurs tentatives d'allumage ont été réalisées en produisant une étincelle au sein de l'amas de poussières. Aucune amorce d'inflammation n'a été observée.



Figure 47 : poussières d'avion (Source : BEA)

CONCLUSION

La production d'une étincelle (arc électrique) dans un amas de poussières placé dans un environnement préalablement saturé d'oxygène n'a pas produit, dans nos conditions de test, une inflammation immédiate.

5.3 Extinction d'un feu en présence d'une fuite d'oxygène : utilisation d'extincteurs au halon

Les postes de pilotage des avions de transport public sont équipés d'extincteurs portables au halon aussi connus sous le nom d'extincteurs à hydrocarbures halogénés.

Ces extincteurs contiennent du Halon 1211 expulsé par la pression d'un gaz auxiliaire (azote). Il agit par inhibition de la réaction de combustion en se combinant avec l'oxygène contenu dans l'atmosphère, privant ainsi la combustion de comburant.

L'action d'un extincteur au halon est plus rapide que celle d'un extincteur au dioxyde de carbone et nécessite une moindre quantité de produit. Ceci en fait un extincteur moins volumineux et moins lourd.

Le halon présente peu de risque à froid. À l'inverse, en présence de hautes températures qui peuvent survenir sur des feux prolongés et étendus, ses produits de pyrolyse peuvent être très toxiques et corrosifs. Le halon n'a pas d'effet refroidissant contrairement au dioxyde de carbone.

L'utilisation des extincteurs au halon doit se faire à une distance d'environ 1 m des flammes en attaquant le feu à sa base à partir du moment où des flammes sont visibles. L'angle maximal d'utilisation de ce type d'extincteur est de 45° pour conserver le tube plongeur dans l'agent extincteur liquide et ne pas expulser seulement le gaz auxiliaire de propulsion.

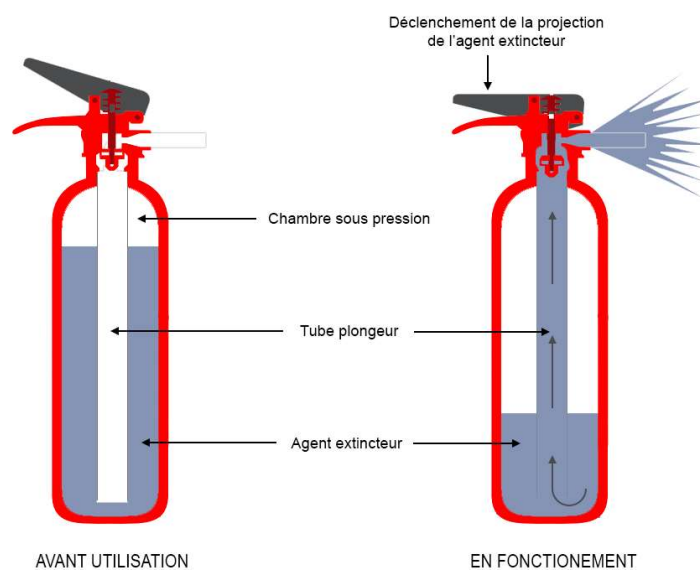


Figure 48 : principe de fonctionnement de l'extincteur au halon (Source : L'avionnaire)

L'étude s'est intéressée à l'efficacité des extincteurs disponibles dans le cockpit pour l'extinction d'un feu en présence d'une fuite d'oxygène.

Trois essais d'utilisation d'extincteurs au halon ont été réalisés sur un feu contenu dans une boîte à feu métallique dans laquelle de l'oxygène était introduit via un tuyau localisé dans le fond de la boîte pour simuler une fuite d'oxygène. Une flamme était alimentée au centre de la boîte à feu (mèche en toile de jute placée dans un bain de pétrole).

Le modèle d'extincteur utilisé pour ces essais était l'extincteur Air Total 74-20.

Extincteur_01	Extincteur sur boîte à feu non-enrichie en oxygène
Extincteur_02	Extincteur sur boîte à feu avec fuite d'oxygène
Extincteur_03	Extincteur sur boîte à feu avec fuite d'oxygène

Les mesures ont montré que la décharge complète d'un extincteur durait de 14 à 18 s.

Un premier essai a été réalisé sans apport d'oxygène (essai Extincteur_01) ; les flammes ont disparu dès la percussion de l'extincteur. Le feu n'a pas redémarré par la suite. Aucun changement de visibilité dans la pièce ne s'est produit.



Figure 49 : essai Extincteur_01 – Séquence vidéo (Source : BEA)

Lors de l'essai Extincteur_02, le feu a été enrichi en oxygène. L'extincteur au halon n'est pas parvenu à éteindre l'incendie. Aucun effet sur les flammes n'a été observé. Lors de la percussion, des fumées épaisses sont apparues et ont réduit de manière significative la visibilité.



Figure 50 : essai Extincteur_02 – Séquence vidéo (Source : BEA)

Le protocole suivi pour l'essai Extincteur_03 a été identique au précédent, à la différence près que la réserve de pétrole était quasi inexistante. L'extinction des flammes a eu lieu dès la percussion de l'extincteur³⁸. La fuite d'oxygène était présente tout au long de l'essai. Une détonation s'est produite 12 secondes après la fin de vidange de l'extincteur et les flammes sont réapparues.



Figure 51 : essai Extincteur_03 – Séquence vidéo (Source : BEA)

Les essais ont montré que l'utilisation d'un extincteur au halon n'est pas adaptée à l'extinction d'un feu enrichi en oxygène.

Le halon agit sur l'oxygène pour inhiber la réaction de combustion. L'ajout d'oxygène apporté par une fuite permanente ne permet pas à l'agent extincteur de réagir face à l'accumulation d'oxygène dans l'environnement. Ainsi, soit le feu ne s'éteint pas car de l'oxygène est présent en quantité suffisante pour servir la combustion, soit le feu s'éteint, mais l'apport soutenu d'oxygène et les hautes températures de combustion atteintes autorisent à nouveau un départ de feu.

Le halon n'ayant pas d'effet refroidissant sur les éléments, les braises résiduelles récréent les flammes en présence de l'oxygène.

CONCLUSION

Lors des essais, un incendie alimenté par une fuite d'oxygène ne pouvait pas être éteint en utilisant des extincteurs au halon. Ce résultat est en cohérence avec le mécanisme chimique d'action du gaz halon sur un feu. Le halon agit sur l'oxygène ; or la fuite continue d'alimenter en permanence l'incendie en oxygène.

Au cours des trois essais, il a été noté la présence d'une odeur désagréable et d'émanations acides et irritantes. Les moyens d'enregistrement vidéo et les matériels de captation sonore ont été endommagés par des vapeurs acides dégagées lors de l'utilisation des extincteurs (en particulier lors de l'« essai Extincteur_02 »).

L'identification des gaz produits durant chacun des trois essais³⁹ a permis de produire la liste et le niveau des gaz suivants issus de la combustion et de la dégradation du halon :

- Gaz carbonés : COF₂ – fluorure de carbonyle et CF₄ – tétrachlorure de carbone ;
- Acides : HF – fluorure d'hydrogène, HCl – chlorure d'hydrogène, et HBr – bromure d'hydrogène ;
- Halon (agent extincteur) : halon.

Les tableaux présentés en annexe Gaz halon détaillent les valeurs de niveau des gaz produits durant les trois essais.

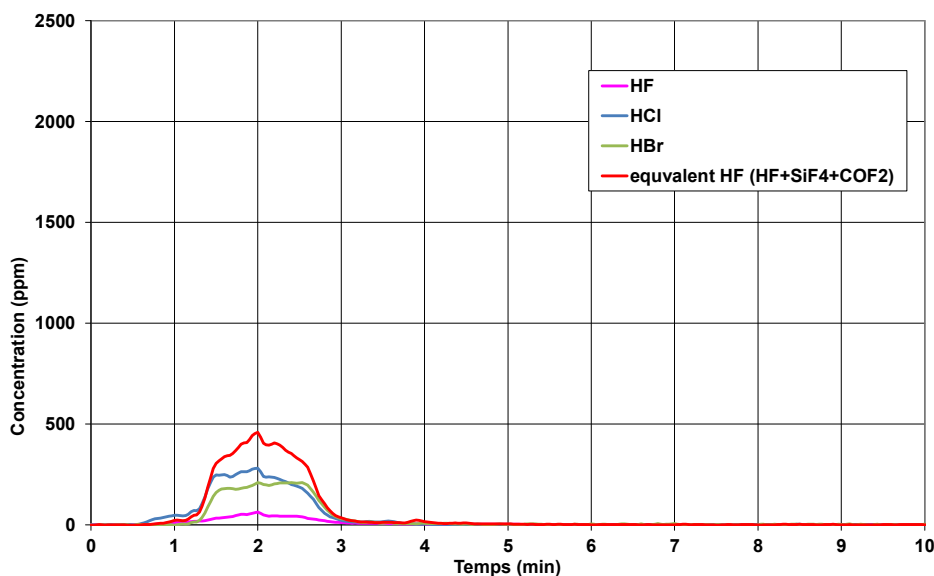


Figure 52 : exemple de tableau de relevé des gaz acides (Source : rapport INERIS)

³⁹Les échantillons d'air ambiant sont prélevés dans le système d'aspiration de la chambre d'essai

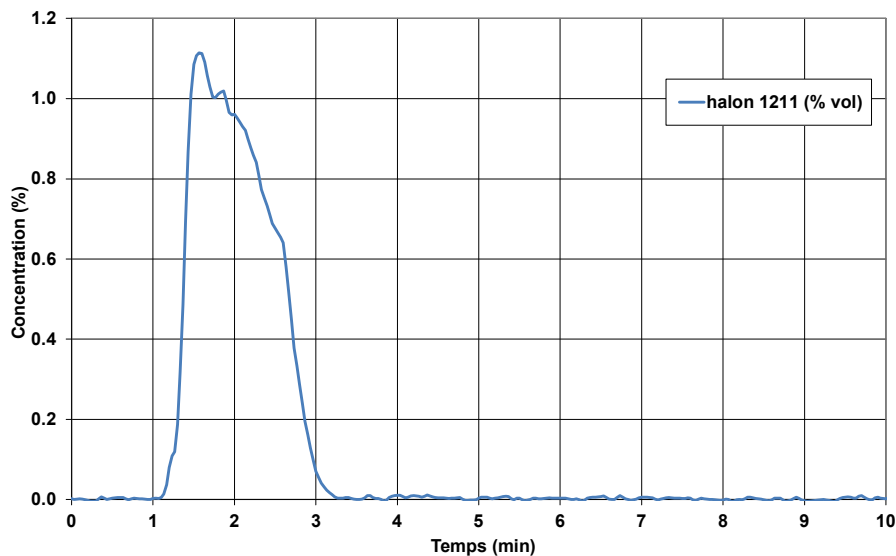


Figure 53 : exemple de tableau de relevé du niveau de halon (Source : rapport INERIS)

L'ensemble des relevés a été comparé aux seuils limites de toxicité des gaz pour une exposition de 10 minutes des personnes (voir détails en annexe Gaz halon).

Il apparaît que durant les trois essais la concentration de COF2 a dépassé le seuil d'effet irréversible (SEI). Durant l'essai réalisé sans ventilation la concentration de HF et de HCl a largement dépassé le seuil de SEI. Enfin l'INERIS indique que durant l'« essai extincteur_02 » l'exposition au cumul des gaz générés (référence à la notion de *dose toxique* décrite en annexe Gaz halon) atteint le SEI, et probablement les premiers effets létaux (SEL).

La fiche toxicologique du Bromochlorodifluorométhane (CFC2ClBr, Halon 1211) de l'INRS précise : « Lors de l'utilisation du produit en extincteur mobile, veiller à ne pas exposer les personnes aux produits de pyrolyse. » ; les gaz acides HF, HCl et HBr sont les produits de pyrolyse toxiques et corrosifs

Les gaz acides identifiés lors des essais (HF, HCl et HBr) correspondent à ces produits de pyrolyse. Ils sont toxiques et corrosifs.

CONCLUSION

Au cours des essais, l'usage d'un extincteur au halon sur un feu oxygéné a produit une fumée opaque qui a rapidement envahi l'environnement. La visibilité est devenue quasi nulle. La pyrolyse du halon a créé des gaz acides en quantité nocive pour les personnes à proximité du lieu d'extinction.

5.4 Propagation (et extinction) d'un feu en présence d'une fuite d'oxygène -

Trois essais ont concerné la propagation d'un feu déclenché dans une boîte de rangement d'un masque à oxygène.

Des éléments de structure de rangements latéraux prélevés sur des A318 et A319 en cours de démantèlement ont été utilisés pour les essais. Une boîte de rangement de masque ainsi que le masque à oxygène associé y ont été installés. Le feu était déclenché dans la boîte de rangement à l'aide d'une flamme commandée à distance. Un extincteur, actionnable depuis l'extérieur pour des raisons de sécurité, était placé sur un support fixe et orienté vers la boîte de rangement.

Les trois tests réalisés ont différé par les moyens de créer la fuite d'oxygène et par la séquence d'extinction suivie ; le tableau ci-dessous présente les différentes configurations adoptées :

	Propagation_01	Propagation_02	Propagation_03
Environnement de test	Chambre 10 m3 : Rangement latéral + boîte de rangement avec masque à oxygène		
Déclenchement du feu	Provoqué par une flamme dans la boîte de rangement		
Déclenchement de la fuite d'oxygène	Masque EMERGENCY (commande électrovanne)	en via	Par la propagation du feu
Percussion extincteur	Non	Oui	Après arrêt oxygène*

*Les essais réalisés sur la boîte à feu en présence d'oxygène ayant mis en évidence le peu d'efficacité du halon sur un feu enrichi en oxygène, l'essai propagation_03 a été conçu en intégrant ce résultat et en ajoutant une coupure d'oxygène préalable à l'utilisation de l'extincteur.

Essai Propagation_01 :

Le déclenchement du feu a été provoqué par une flamme créée dans la boîte de rangement (à 00 : 48 dans la vidéo⁴⁰). Le déclenchement de la fuite d'oxygène a été commandé depuis l'extérieur de la chambre d'essai via l'électrovanne du circuit d'alimentation en oxygène, après que le feu se fut un peu développé dans la boîte⁴¹.

Des flammes hautes sont apparues rapidement ; le feu a été intense. Dans les secondes qui ont suivi le feu a semblé se réduire, jusqu'à disparaître. Le bruit de fuite d'oxygène a semblé s'étouffer. Seule de la fumée noire est restée visible et a opacifié légèrement la pièce. Après plusieurs dizaines de secondes des flammes ont à nouveau été visibles dans la boîte de rangement du masque. Le bruit de fuite d'oxygène s'est interrompu durant une demi-seconde puis une explosion a été entendue (à 01 : 39), accompagnée d'étincelles et de rougeoiement dans l'environnement du rangement latéral. De la fumée noire s'est de plus en plus échappée.

L'incendie a été dissimulé et contenu dans le rangement latéral ; il est peu visible sur les prises de vue. Son intensité a semblé augmenter progressivement jusqu'à ce que des flammes s'échappent à nouveau par la boîte de rangement du masque à oxygène initialement enflammé (à 01 : 56). Dès que les flammes sont sorties, elles se sont propagées sur le reste du rangement latéral en particulier vers le deuxième masque à oxygène. Le feu s'est intensifié. La pièce a été envahie de fumées de

⁴⁰ Le timing indiqué correspond à celui du fichier brut d'enregistrement de la caméra.

⁴¹ Le régulateur du masque a son rotacteur positionné sur *EMERGENCY* pour permettre un débit permanent d'oxygène.

plus en plus opaques. Quelques projections de matières incandescentes se sont produites à 02 : 28 puis le capot du rangement latéral s’est refermé au-dessus des boîtes de rangement des masques. Les flammes se sont ensuite échappé des pourtours de la boîte de rangement. L’arrivée d’oxygène a ensuite été coupée et l’incendie a été éteint à l’aide d’extincteurs à eau diffusée.

Éléments audio : Le percement du flexible du masque survenu 18 s après le déclenchement du feu s’est traduit par un bruit large bande (bruit de fuite) suivi immédiatement d’un bruit d’emballement sonore. Le bruit de fuite s’est interrompu 0,5 s - sans intervention des opérateurs de l’essai – 50 s après le percement du flexible du masque. L’interruption a été suivie d’un bruit de détonation, de la reprise de la fuite et de l’enrichissement du feu.

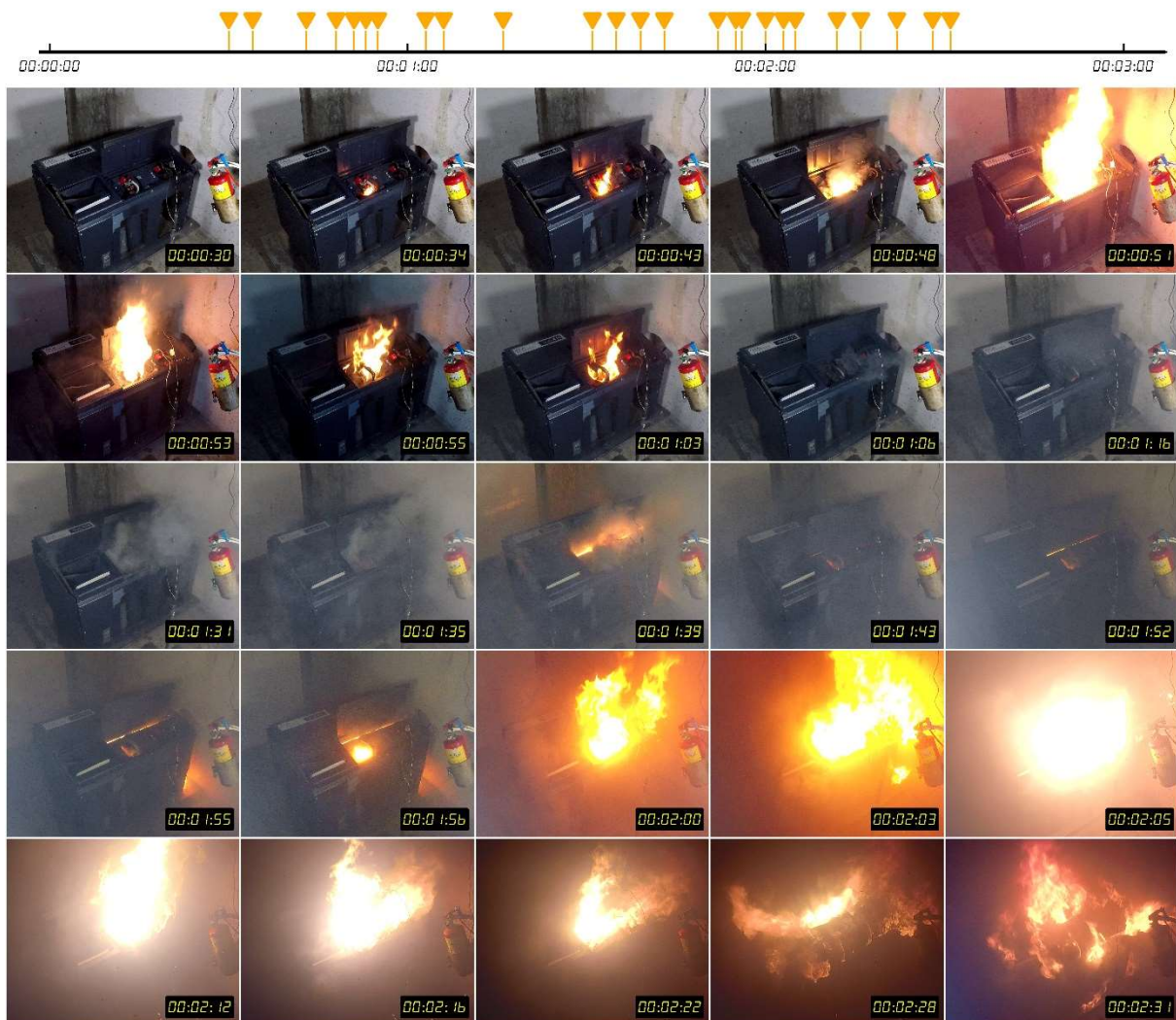


Figure 54 : essai Propagation_01 – Séquence vidéo (Source BEA)

Essai Propagation_02 :

Le déclenchement du feu a été provoqué par une flamme (à 10 : 52 sur la vidéo⁴²), créée dans la boîte de rangement du masque. La flamme était positionnée à proximité du flexible d'alimentation en oxygène du masque afin de l'endommager et de créer une fuite d'oxygène (à 10 : 58). La boîte de rangement du masque avait été préalablement enrichie en oxygène pour favoriser le départ de feu.

Après l'installation du feu en présence de la fuite d'oxygène, l'extincteur a été percuté (à 11:22). Les flammes ont rapidement été étouffées et une fumée épaisse et opaque a envahi la pièce. Une vingtaine de secondes après la percussioin de l'extincteur, malgré la fumée, des flammes rougeoyantes étaient visibles au niveau de la boîte de rangement du masque à oxygène. Le feu a continué de s'intensifier dans les secondes qui ont suivi jusqu'à la coupure volontaire de l'arrivée d'oxygène dans la chambre d'essai. L'incendie a été éteint au moyen d'extincteurs à eau diffusée.

Notons que cet essai a été réalisé au mois de février 2023 dans une pièce non isolée qui n'avait pas été préalablement chauffée.

Éléments audio : Le percement du flexible du masque survenu 13 s après la réactivation du feu. a été précédé de bruits de crépitements (captés par le microphone du masque à oxygène). Le percement du flexible se traduit par un bruit large bande (bruit de fuite). Le micro du masque a cessé de fonctionner 5 s après le percement du flexible du masque O2.

L'incendie qui a suivi le percement du flexible s'est rapidement propagé aux éléments environnants. On n'observe pas de bruit d'emballement sonore, ni d'interruption du bruit de fuite.

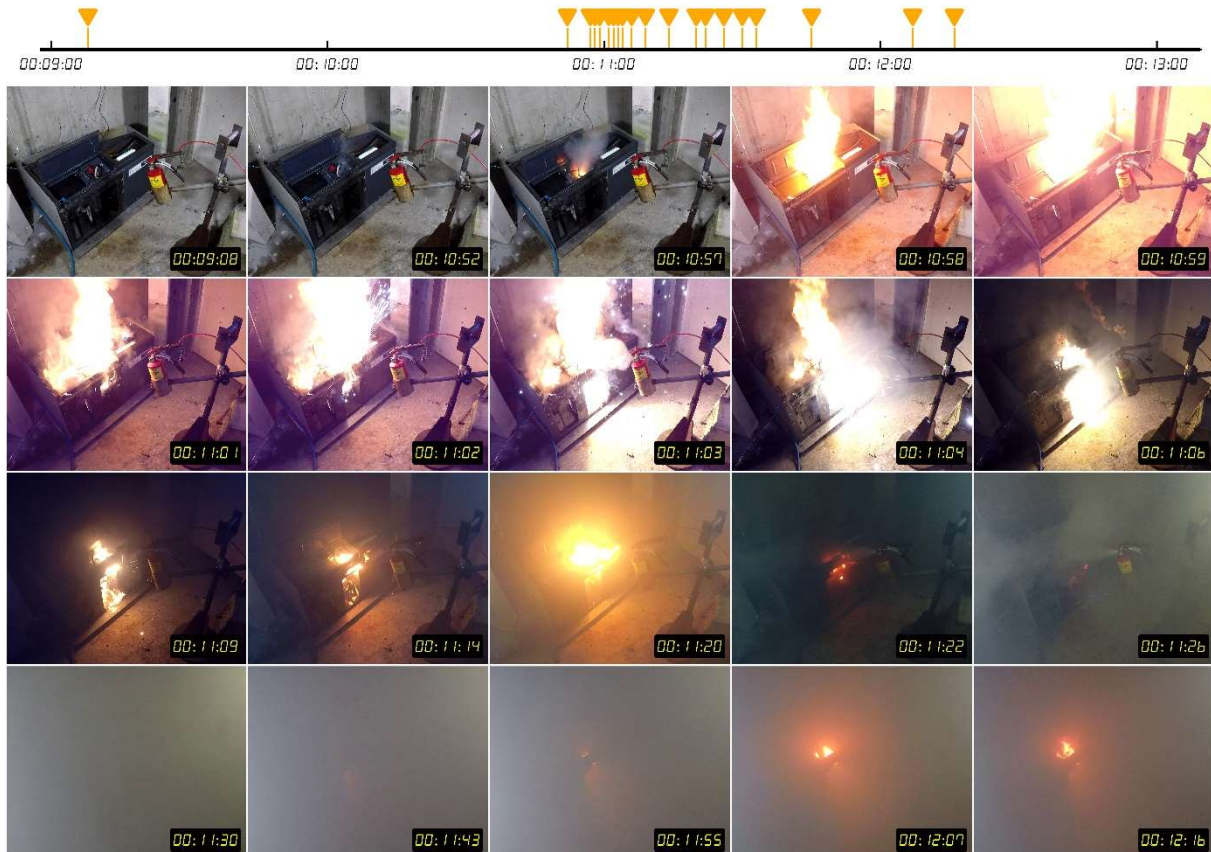


Figure 55 : essai Propagation_02 – Séquence vidéo (Source BEA)

⁴² Le timing indiqué correspond à celui du fichier brut d'enregistrement de la caméra.

Essai Propagation_03 :

L'essai Propagation_03 a été réalisé dans les mêmes conditions que l'essai précédent.

Après l'endommagement du flexible d'alimentation en oxygène (à 06 : 25 sur la vidéo⁴³), le feu est resté dissimulé à l'intérieur du rangement latéral. Des flammes et un rougeoiement ont été visibles à plusieurs reprises à l'arrière de la structure (exemple à 06 : 36 et 06 : 44), et ont semblé varier en intensité par la suite. Le débit d'oxygène a été audible tout le long de l'essai. Des étincelles étaient visibles de façon intermittente à travers le rangement latéral. De la fumée noire et épaisse a envahi petit à petit la chambre d'essai.

À 06 : 57, l'électrovanne d'alimentation en oxygène a été fermée. Le bruit de fuite a disparu et l'intensité des flammes a paru diminuer instantanément (le rougeoiement rayonné par le mur situé derrière le rangement latéral a diminué). La percussion de l'extincteur a été réalisée et une fumée épaisse et opaque a rapidement rempli la chambre d'essai rendant la visibilité quasi nulle. La visibilité est revenue progressivement au bout de quelques minutes (à 10 : 50). Aucune flamme, aucun rougeoiement n'était visible ; des bruits de crépitements étaient présents et de la fumée s'échappait de la boîte de rangement du masque. Des flammes sont réapparues aux alentours de la boîte de rangement du masque 4 minutes après la percussion de l'extincteur.

Éléments audio : Le percement du flexible du masque survenu 14 s après le déclenchement du feu a été précédé de bruits de crépitements (captés par le microphone du masque à oxygène). Le percement du flexible s'est traduit par un bruit large bande (bruit de fuite) suivi 0,5 s plus tard d'un bruit d'emballage sonore. La coupure de l'alimentation en oxygène - qui a précédé l'usage de l'extincteur - a interrompu le bruit de fuite.

⁴³ Le timing indiqué correspond à celui du fichier brut d'enregistrement de la caméra Gopro.

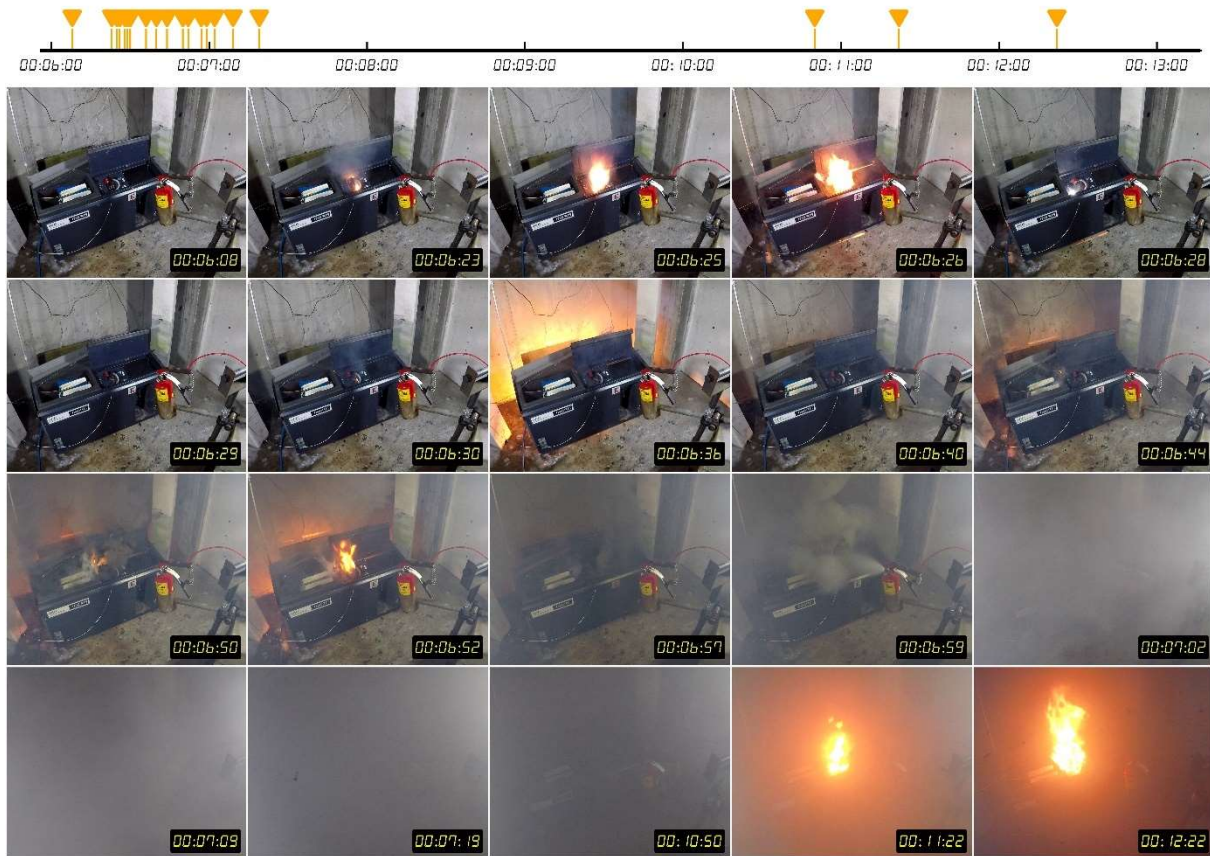


Figure 56 - Essai Propagation 03 – Séquence vidéo (Source BEA)

Durant l'essai l'incendie s'est retrouvé enfoui dans le rangement latéral. La technique d'attaque du feu avec un extincteur au halon n'a pas pu être appliquée. Il est recommandé de viser la base des flammes et, le cas échéant lorsque les flammes sont inaccessibles, de perforer la façade verticale du rangement pour y glisser l'embout de l'extincteur avant de l'actionner. L'activation de l'extincteur étant réalisé depuis l'extérieur, il n'a pas été possible d'appliquer avec précision le jet extincteur sur les flammes ce qui peut expliquer que l'incendie reparte après plusieurs minutes.

5.5 Synthèse sur la propagation du feu avec apport d'oxygène

L'apport d'oxygène sur une flamme (quelle qu'en soit l'origine) entraîne un changement physique de cette dernière. L'introduction d'une cigarette allumée dans un environnement riche en oxygène provoque instantanément l'inflammation de la partie incandescente et la combustion complète de la cigarette se fait en quelques secondes.

Le flux de gaz oxygéné donne une direction à la flamme à l'identique d'une flamme de chalumeau. Lors des essais utilisant une boîte à feu, les flammes ont été contenues dans la boîte et n'ont pas semblé en sortir (le tuyau d'arrivée d'oxygène envoyait un jet horizontal parallèle au fond de la boîte). Lors des essais à grande échelle réalisés dans des boîtes de rangement du masque placées dans ou en dehors des rangements latéraux, les flammes étaient visibles et sortaient de la boîte de rangement du masque dans laquelle la fuite avait été créée.

En situation de feu alimenté par une fuite d'oxygène, la couleur des flammes est plus blanche car la combustion est plus riche en oxygène. Cette coloration traduit la température élevée du feu. Cette variation caractéristique de la teinte de la flamme a été observée sur l'ensemble des essais

réalisés dès l'instant où une fuite d'oxygène – contrôlée ou incontrôlée – se produisait. Les flammes étaient plus intenses et plus développées, dès l'apport d'oxygène.

D'un point de vue sonore, la fuite d'oxygène était audible et le bruit venait masquer tout autre bruit de crépitements que l'on pouvait entendre lorsque le feu n'était pas alimenté en oxygène. Ces bruits de crépitements réapparaissent dès que la fuite d'oxygène était interrompue.

Les matériaux utilisés dans le cockpit respectent l'exigence CS25.853 qui précise que ces matériaux doivent être autoextinguibles. Cependant, dans le cas d'un feu alimenté en oxygène, ces matériaux sont soumis à des conditions qui dépassent celles auxquelles ils sont soumis lors des essais de certification.

Dans les essais, dans le cas d'un feu « classique », avant la présence d'une fuite d'oxygène, le feu est resté confiné à la boîte de rangement du masque d'où il était parti. Il ne s'est pas propagé au reste du rangement latéral.

En revanche, dès qu'une fuite d'oxygène était présente, le feu se propageait rapidement :

- à l'intérieur du rangement latéral, causant un feu enfoui, qui, avec le temps, pouvait ressortir pour se propager au reste du rangement latéral ;
- à l'extérieur du rangement latéral, vers l'autre boîte de rangement de masque à oxygène, vers le vide-poche pouvant contenir des matières inflammables (documentation).

CONCLUSION

Dans les essais réalisés, en présence d'oxygène, le feu s'est propagé rapidement autour de son environnement de départ, même aux matériaux résistants au feu. Les flammes ont eu une coloration plus blanche, signe d'un feu plus chaud. De la fumée noire et épaisse s'est dégagée de l'incendie. Le bruit de fuite d'oxygène a été présent jusqu'à la coupure de l'arrivée d'oxygène et a masqué les bruits de crépitements. Le bruit d'un feu alimenté par une fuite d'oxygène est caractéristique, comparable à celui d'un chalumeau.

5.6 Résultats de l'étude Feu-Oxygène en lien avec l'accident survenu à l'A320 immatriculé SU-GCC

L'analyse audio des essais effectués dans le cadre de l'étude Feu-oxygène apporte les résultats suivants :

- l'introduction dans une boîte de rangement de masque à oxygène enrichie en oxygène d'un élément extérieur, incandescent ou enflammé,
- peut provoquer une combustion lente des éléments de protection des flexibles de distribution de l'oxygène ; le percement du flexible peut intervenir entre 13 et 28 s après l'introduction de l'élément exogène. La combustion lente préalable au percement est accompagnée de bruits caractéristiques de crépitements ;
- un bruit d'emballement sonore comparable à celui produit par un chalumeau est présent lorsque l'ensemble du masque s'embrase ;

- un bruit de crissement peut précéder la perte de signal provenant du microphone du masque à oxygène ;
- le mécanisme de dégradation produit par la propagation du feu à l'environnement des boîtes de rangement (rangements latéraux) peut présenter des variations incontrôlées ; ces variations se traduisent par des variations aléatoires du niveau et du timbre sonore. Durant ces essais, un cas d'interruption du bruit de fuite durant 0,5 s suivie d'une détonation s'est produit.

Comparatif avec l'enregistrement CVR du vol MS804 (voir figure suivante) :

- aucun bruit de crépitement n'est présent dans l'enregistrement du micro du masque ;
- un emballement sonore est perceptible sur les voies micro du masque copilote et CAM à 00h 25 min 31 (EVT6) ;
- un bruit de crissement précède la perte du signal du micro du masque copilote à 00 h 25 min 33 (EVT7) ;
- une interruption momentanée (510 ms) du bruit de fuite d'oxygène a lieu à 00 h 25 min 42 (EVT8).

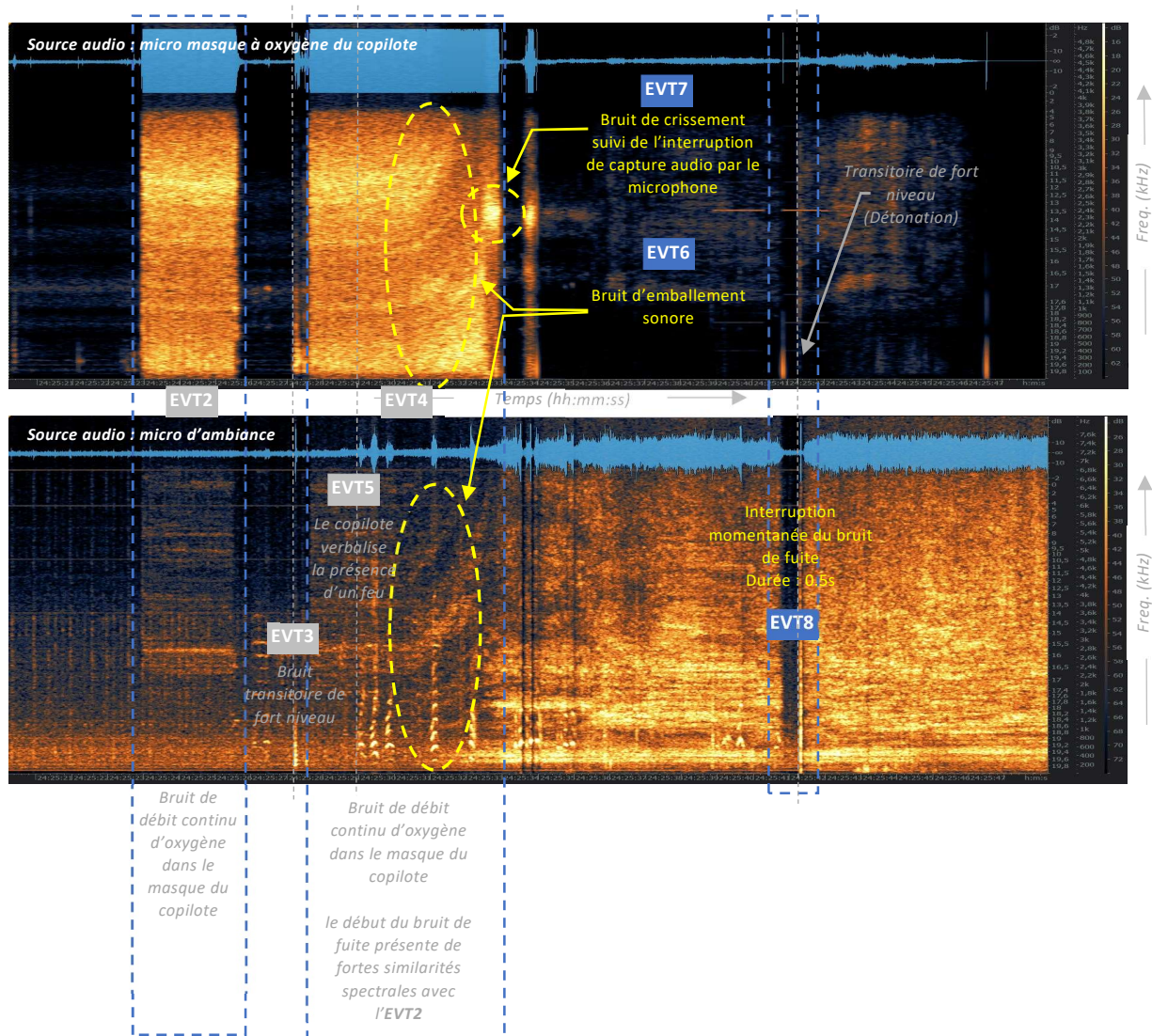


Figure 57 : extrait du spectre – Forme d'onde – Vol MS804 (Source BEA)

5.6.1 EVT3 : Transitoire de fort niveau (t0 +4,3 s)

Aucun des essais n'a produit un son semblable à celui correspondant à l'événement 3.

Dans les conditions de test, le bruit correspondant à l'emballement d'une batterie lithium ne correspond pas à l'événement 3 ; de plus la dynamique de l'événement (présence de feu dans la boîte de rangement du masque immédiatement après le transitoire) n'est pas en faveur de cette hypothèse.

Dans l'hypothèse d'un coup de feu lié à l'accélération d'une particule par le premier débit d'oxygène, il existerait un délai de 5 secondes entre l'accélération de la particule et le transitoire de fort niveau. Le transitoire ne serait pas directement le bruit correspondant à l'impact de la particule, mais à une détonation ou dégradation ultérieure. Le « coup de feu » et donc ses conséquences n'ont pas été reproduits.

De façon contrôlée, une inflammation a été créée au moyen d'une étincelle dans le dispositif, cela n'a pas engendré d'effet détonnant et la rupture du flexible qui s'en est suivie quelques secondes plus tard n'a pas produit de transitoire de fort niveau.

Pour aucun des trois événements candidats suivants, il n'a été possible de mesurer un bruit ayant les mêmes propriétés acoustiques que le transitoire correspondant à l'événement 3 :

- emballement d'une batterie lithium ;
- rupture d'un flexible d'oxygène de l'ensemble boîte de rangement et masque à oxygène ;
- endommagement consécutif à un impact de particules.

Résultat intermédiaire (Fait établi ou probable)

Le transitoire de fort niveau capté par le micro du masque à oxygène (à t0 +4,3 s) ne correspond probablement pas au bruit d'emballement d'une batterie lithium, ni à celui d'une rupture d'un flexible alimenté en oxygène sous 5 bar.

5.6.2 EVT5 : Le copilote verbalise la présence d'un feu (t0 + 6,1 s)

L'introduction dans la boîte de rangement du masque enrichie en oxygène d'un élément extérieur, incandescent ou enflammé, a provoqué une combustion lente des éléments de protection des flexibles de distribution de l'oxygène de l'ensemble. La combustion lente était accompagnée de bruits caractéristiques de crépitements perceptibles uniquement sur le signal du microphone du masque à oxygène. Le percement du flexible est intervenu entre 13 et 28 secondes après l'introduction de l'élément extérieur (flamme ou cigarette).

Aucun bruit de crépitements n'est présent dans l'enregistrement du micro du masque à oxygène du copilote.

Résultat intermédiaire (Fait établi ou probable)

L'absence de crépitements préalable à l'embrasement n'est pas en faveur de l'hypothèse de l'introduction d'un élément en combustion dans la boîte à oxygène, c'est-à-dire d'un élément extérieur au flexible oxygène comme une cigarette incandescente.

Les différents essais d'endommagement de l'ensemble oxygène réalisés (soit par un jet de cigarette, soit par une flamme placée au contact direct des éléments contenus dans la boîte de rangement du masque) ont montré qu'il était nécessaire d'assurer une longue exposition (de 15 à plus de 50 s) des éléments qui véhiculent l'oxygène dans la boîte (flexibles) avant d'atteindre l'endommagement irréversible et le percement du flexible.

La soudaineté du phénomène (EVT3__voir § 3.7.2) qui précède le début de la fuite continue (EVT4 et EVT9) et la rapidité de la séquence (événements sonores versus annonces de l'équipage) semblent favoriser l'hypothèse de la survenue d'un endommagement interne d'un/des organe(s) qui véhicule (nt) l'oxygène dans la boîte (boîte, flexibles, régulateur du masque, ...) ou d'un/des sous-ensemble(s) qui les compose (nt) (connecteurs, filtres, coudes...).

Résultat intermédiaire (Fait établi ou probable)

La rapidité de la séquence (6 s entre le premier bruit de débit d'oxygène et la première annonce de feu par l'équipage) amène à privilégier le scénario d'un endommagement interne du dispositif oxygène du copilote dans lequel l'apparition d'une fuite d'oxygène et le départ d'un feu alimenté par cette fuite seraient quasi simultanés

5.6.3 EVT6 et EVT7 : Modification du bruit de fuite continue : bruit d'emballage sonore et perte du signal du micro du masque à oxygène du copilote (t0 + 7,6 s et t0 + 9,6 s)

Le bruit d'emballage sonore a été reproduit lors des essais cigarette et des essais propagation de feu au rangement latéral.

Lors des essais cigarette, l'utilisation d'une boîte de rangement de masque ajourée a permis d'identifier que l'emballage sonore correspondait à l'embrassement du contenu de la boîte de rangement (masque et flexibles).

Le bruit de crissement qui précède la perte de signal provenant du microphone du masque a été reproduit lors d'un essai cigarette.

Résultats intermédiaires (Faits établis ou probables)

Le contenu de la boîte de rangement du masque à oxygène du copilote s'embrasse à 00 h 25 min 31 soit à t0 +7,6 s (provoquant un emballage sonore)

Le microphone du masque à oxygène du copilote est détruit par les flammes à 00 h 25 min 33 soit à t0 +9,6 s

5.6.4 EVT8 : interruption du bruit de fuite (t0 + 17,9 s)

Les essais de feu sur rangements latéraux ont montré que le mécanisme de dégradation produit par la propagation du feu à l'environnement de la boîte de rangement du masque présente des variations notables et non contrôlées ; ces variations se traduisent par des différences de phénomènes audio perçus avec des variations aléatoires du niveau et du timbre sonore. Durant ces essais, un cas inexplicable d'interruption du bruit de fuite suivi d'une détonation a été reproduit.

Résultat intermédiaire (Fait établi ou probable)

L'interruption momentanée du bruit de fuite peut être liée à un endommagement de l'ensemble oxygène, situé dans ou sous le rangement latéral

5.6.5 EVT EXT : Percussion d'un extincteur

Le bruit généré par la percussion d'un extincteur (voir l'annexe Air Formation) a été enregistré et comparé à l'enregistrement audio du CVR du vol MS804. Cette comparaison n'a pas permis d'isoler un bruit d'une durée de 12 à 17 secondes caractéristique de l'utilisation d'un extincteur.

Résultat intermédiaire (Fait établi ou probable)

Aucun élément audio ne permet d'infirmer ou de confirmer l'utilisation d'un extincteur dans le cockpit.

6 CONCLUSIONS SUR L'ACCIDENT SURVENU À L'A320 IMMATRICULÉ SU-GCC EXPLOITÉ PAR EGYPTAIR LE 19 MAI 2016

6.1 Faits établis ou probables

Seuls sont indiqués les faits relatifs à la fuite d'oxygène et au feu dans le cockpit.

Le micro du masque à oxygène du copilote était actif dans les 30 dernières minutes d'enregistrement du CVR, très probablement depuis le début de l'enregistrement du CVR.

Le boomset du copilote n'a pas pu être utilisé pour l'émission de communications radio pendant les trente dernières minutes, de façon très probable dans les deux dernières heures. Le copilote, en raison de son rôle de PF sur le vol, n'avait pas besoin d'utiliser son boomset avant d'avoir atteint le niveau 100 et a utilisé le micro à main en croisière. Ainsi, le copilote n'avait pas d'opportunité de détecter que son micro casque était inactif. Ce qui explique que l'activation du micro du masque puisse ne pas avoir été détectée.

L'enregistrement CVR contient sur toute sa durée la captation sonore par le micro du masque à oxygène du copilote de manipulations à proximité du vide-poche se traduisant par des transitoires de faible niveau. Cette captation peut être perçue sur le haut-parleur d'écoute du copilote (en fonction du volume sélectionné)

Aucun élément issu de l'enregistrement de conversation dans le cockpit ne vient confirmer ou infirmer l'hypothèse de personnes fumant dans le cockpit.

Il n'y a aucune mention d'une intention ou d'une action d'usage des dispositifs individuels d'oxygène de la part d'un ou des pilotes.

Le masque à oxygène du copilote n'était pas en position permanente *EMERGENCY* avant le t0, début du bruit de débit d'oxygène.

Le mélangeur du masque à oxygène du copilote était en position 100 %.

La boîte de rangement du masque à oxygène du copilote n'était pas en position resettée

Un débit d'oxygène via le masque du copilote d'une durée de 2,6 secondes débute à 00 h 25 min 30 (t0).

Le débit est équivalent à celui provoqué par un appui sur le rotacteur *EMERGENCY* du masque.

Un événement entraînant un transitoire de fort niveau d'origine inconnue a lieu dans la boîte de rangement du masque du copilote 4,3 secondes après le début du premier débit d'oxygène dans le masque ($t_0 + 4,3$ s).

Le transitoire de fort niveau capté par le micro du masque à oxygène (à $t_0 + 4,3$ s) ne correspond probablement pas au bruit d'emballage d'une batterie lithium, ni à celui d'une rupture d'un flexible alimenté en oxygène sous 5 bar.

Une fuite continue non contrôlée d'une durée de 3 minutes 23 correspondant à la vidange complète de la bouteille d'oxygène a lieu dans la boîte de rangement du masque du copilote. (début à $t_0 + 4,7$ s).

Un feu est présent dans le cockpit à $t_0 + 6$ s.

Le contenu de la boîte de rangement du masque à oxygène du copilote s'embrase à 00 h 25 min 31, soit $t_0 + 7,6$ s (provoquant un emballement sonore).

Le microphone du masque à oxygène du copilote est détruit par les flammes à 00 h 25 min 33, soit $t_0 + 9,6$ s.

L'absence de crépitement préalable à l'embrassement n'est pas en faveur de l'hypothèse de l'introduction d'un élément en combustion dans la boîte à oxygène (c'est-à-dire d'un élément extérieur au flexible oxygène)

La rapidité de la séquence (6 secondes entre le premier bruit de débit d'oxygène et la première annonce de feu par l'équipage) amène à privilégier le scénario d'un endommagement interne du dispositif oxygène du copilote dans lequel l'apparition d'une fuite d'oxygène et le départ d'un feu alimenté par cette fuite seraient quasi simultanés

L'interruption du bruit de fuite d'oxygène (à $t_0 + 17,9$ s) d'une durée de 0,6 s n'est pas liée à une action de l'équipage

L'interruption momentanée du bruit de fuite peut être liée à un endommagement de l'ensemble oxygène, situé dans ou sous le rangement latéral

Aucun élément audio ne permet d'infirmer ou de confirmer l'utilisation d'un extincteur dans le cockpit

Lors de la première émission de l'alarme « lavatory smoke » soit 47 secondes après le début de l'événement, à 00 h 26 min 17 la porte du cockpit est fermée. Elle est ensuite en position ouverte (à 00 h 26 min 48 et à 00 h 27 min 18, potentiellement de façon continue sur cette période) puis de nouveau fermée.

La porte du cockpit est probablement fermée lorsque le pilote automatique se désengage et lorsque le CVR cesse de fonctionner à 00 h 29 min 54 soit $t_0 + 4$ min 24 s.

L'enregistreur de paramètres n'a enregistré aucun changement de paramètres pouvant résulter d'une action de l'équipage après la déconnexion du pilote automatique.

6.2 Scénario

Contexte du vol

L'Airbus A320 immatriculé SU-GCC, a décollé depuis Paris-Charles de Gaulle pour un vol vers Le Caire à 21 h 21. L'événement s'est produit alors que l'avion était en croisière au niveau FL370 sous pilote automatique après trois heures de vol. Le copilote était le pilote aux commandes (PF) et le commandant de bord le pilote monitoring (PM).

Auparavant, de nombreux allers-retours avaient eu lieu dans le cockpit pour gérer un passager malade. Après un moment de discussion entre membres d'équipages, le commandant de bord venait d'annoncer qu'il voulait se reposer et venait de demander une couverture et un oreiller. Initialement PM, il avait probablement passé les communications au copilote. Avant cela, le copilote avait déjà passé des communications en utilisant son micro à main. Comme habituellement au-dessus du niveau 100, aucun des pilotes ne portait son casque.

Restaient présents dans le cockpit les deux PNT et un PNC. Une musique était perceptible dans le cockpit (la musique est présente sur toute la durée de l'enregistrement de l'ambiance sonore).

Boîte de rangement du masque copilote non resettée et micro du masque actif

Des manipulations à proximité du vide-poche du copilote ont également été enregistrées sur le CVR. Elles pouvaient potentiellement être perçues sur le haut-parleur du copilote, le micro du masque à oxygène du copilote étant actif.

Le fait que le micro du masque à oxygène du copilote était actif peut être lié à :

- la boîte de rangement en position non resettée ;
- un élément défailant de la boîte de rangement.

Premier débit d'oxygène

Le premier événement de la séquence accidentelle qui a pu être identifié a été un débit d'oxygène d'une durée de 2,6 secondes via le régulateur du masque du copilote. Ce débit a les mêmes caractéristiques qu'un appui sur le rotacteur *EMERGENCY* du masque alors que la boîte n'est pas resettée. L'enquête n'a pas permis de déterminer si ce débit était lié à une action humaine.

Le bruit relatif à ce débit d'oxygène était perceptible dans le cockpit. Une interrogation potentiellement liée à la perception de ce bruit a été émise à ce moment par le commandant de bord à l'adresse du copilote.

La boîte de rangement du masque du copilote s'est retrouvée fortement enrichie en oxygène à la suite de ce débit.

Départ de la fuite

Un événement entraînant un transitoire de fort niveau d'origine inconnue a eu lieu à ce moment dans la boîte de rangement du masque. Il n'a pas été possible de déterminer ce qui a généré ce fort bruit.

Moins d'une demi-seconde après, un bruit de débit d'oxygène de même type que celui résultant d'un appui sur le rotacteur *EMERGENCY* est de nouveau apparu. Le bruit a évolué en un bruit de fuite continue dans la boîte de rangement du masque du copilote.

Feu et propagation du feu

Les annonces du copilote indiquent que du feu était présent moins de deux secondes après le début de fuite continue. Le bruit d'embrassement indique que le feu était présent dans la boîte de rangement du masque du copilote. Le feu s'est propagé à l'extérieur de la boîte de rangement du masque.

Le commandant de bord a demandé qu'un extincteur soit apporté. Il n'a pas été possible de déterminer si l'extincteur a été utilisé. Aucun des pilotes n'a utilisé de masque. L'une des deux cagoules et l'extincteur au halon se trouvant du côté du copilote à proximité immédiate du feu, il est probable que ces deux équipements soient rapidement devenus inaccessibles par l'équipage.

Des sons de toux ont été émis. Il n'a pas été possible de déterminer le niveau de respirabilité de l'air et le niveau de visibilité dans le cockpit à ce moment-là. Il est possible que les fumées aient rendu l'atmosphère difficilement respirable et aient réduit la visibilité à partir de ce moment.

De la fumée s'est propagée dans les toilettes et dans la soute avionique.

La porte du cockpit a été actionnée plusieurs fois.

Le bruit de fuite s'est interrompu pendant 0,5 seconde, cette interruption n'est pas liée à une action volontaire de coupure de l'oxygène mais probablement à la dégradation par le feu des différents éléments. La fuite s'est arrêtée au bout de 3 minutes 23.

Le feu a continué à se propager comme l'indiquent les crépitements présents sur les enregistrements audio.

Les câbles correspondant à l'alimentation de plusieurs calculateurs ont été endommagés et plusieurs redondances ont été perdues. Les systèmes de bord ont déconnecté l'autopilote.

Aucune action de l'équipage n'est enregistrée dans le cockpit. Il n'a pas été possible de déterminer si l'équipage est resté dans le cockpit, s'il s'y trouvait inconscient ou s'il a fui le feu, puis, est revenu ou resté hors du cockpit.

Les enregistreurs ont cessé de fonctionner alors que l'avion était toujours au FL 370. L'avion a viré successivement à gauche puis à droite dans un virage en descente puis est entré en collision avec la mer.

6.3 Scénario lié à des explosifs

En décembre 2016, l'EAAID a annoncé la découverte de traces d'explosifs sur des victimes. Cela a conduit le BEA à étudier ce possible scénario.

La cartographie du site d'accident au fond de la mer montre que toutes les extrémités de l'avion se trouvaient à l'intérieur du rectangle identifié : le cockpit, les ailes et la queue. Ces observations, ainsi que la petite taille des débris, permettent de conclure à un impact à haute énergie de l'avion avec la surface de l'eau et permettent d'exclure un scénario de dislocation de l'avion en vol.

La base de données audio du BEA contient des échantillons de bruits d'explosion au sol et en vol, produits par des matières explosives ou des tirs de missiles. Le son produit par l'explosion capté par les microphones du cockpit est très différent des sons enregistrés dans le CVR de l'événement.

La base de données audio BEA contient des échantillons sonores de dépressurisations accidentelles en vol. Il s'agit notamment de la perte d'un pare-brise dans le cockpit, d'une charge explosive sur un passager, de la perte d'une porte de soute, d'un explosif dans la soute. Les bruits associés diffèrent : saturation totale de tous les microphones pendant une longue période, explosion suivie d'un souffle ou d'un bruit fort avec un bruit de relâchement ou un bruit fort et arrêt immédiat du CVR. Tous ces bruits sont très éloignés de ceux du MS804. La dépressurisation soudaine de l'avion produit un son très différent de celui enregistré dans le CVR de l'événement pour lequel il y a eu un long phénomène audio (3min) associé à une baisse de niveau et de timbre, et de plus aucune alarme de dépressurisation.

Aucune explication liée à la présence d'un explosif n'expliquerait le premier événement de la séquence d'accident qui a pu être identifié, à savoir un flux d'oxygène pendant 2,6 s via le régulateur du masque du copilote.

En ce qui concerne l'événement à l'origine d'un fort bruit transitoire qui s'est produit plus tard, la comparaison du niveau de bruit transitoire sur les quatre pistes audio enregistrées par le CVR a montré que le bruit était plus fort (et plus long) sur la piste CVR du copilote que sur les pistes du 3e homme et du microphone d'ambiance. Cela permet de conclure que le bruit transitoire provenait de l'intérieur de la boîte du masque O2 du copilote ou de son voisinage immédiat et que ce bruit n'était pas assez fort pour être attribué à des explosifs.

En conclusion,

La découverte éventuelle de traces d'explosifs sur les occupants de l'avion, même à plusieurs endroits, ne permet pas en soi de conclure à une explosion à bord, alors que tous les autres indices physiques sont incompatibles avec le scénario d'une explosion ayant endommagé la structure ou les systèmes de l'avion au point de le rendre incontrôlable.

6.4 Enjeux de sécurité

Les exigences de certification demandent que le système oxygène soit exempt de dangers intrinsèques, dans son utilisation et dans ses effets sur les composants. Il est également demandé que les impacts d'une source d'ignition externe soient minimisés et que l'environnement proche soit préservé, c'est-à-dire qu'une fuite d'oxygène ne peut pas provoquer l'ignition de substances à proximité.

Lors du vol MS804, la présence d'oxygène de secours dans le cockpit a clairement contribué sinon au déclenchement, du moins à la vitesse et à l'ampleur de propagation d'un feu dans le cockpit.

Cela a été également le cas de plusieurs événements au sol. Pour tous ces événements que l'on pourrait qualifier de précurseurs, un feu alimenté par une fuite d'oxygène s'est produit au sol, l'avion a été évacué et l'incendie n'a pu être maîtrisé que par les services de lutte contre incendie.

Les données disponibles pour l'analyse de l'accident du vol MS804 et les essais réalisés dans le cadre de l'étude Feu-Oxygène amènent à considérer les enjeux de sécurité suivants :

- Les sources de chaleur externes qui à proximité de l'oxygène seraient à l'origine d'un départ de feu affectant les composants du système oxygène.
- Les impacts d'une contamination et les processus d'ignition internes. Le changement de la boîte de rangement du masque du copilote quelques vols auparavant le vol MS804 conduit à considérer l'hypothèse d'une contamination du flexible d'alimentation du masque lors de l'opération de maintenance.
- La défaillance même d'un des composants du système pouvant provoquer une fuite.
- La propagation d'un feu alimenté par une fuite d'oxygène.
- Les moyens de protection à la disposition de l'équipage.
- Les moyens d'extinction d'un feu alimenté par une fuite d'oxygène.

6.4.1 Sources d'ignition externes au système oxygène

Les données disponibles relatives au vol MS804 n'ont pas permis de déterminer la source d'ignition à l'origine du feu dans la boîte de rangement du masque du copilote.

Au cours de l'enquête, deux potentielles sources d'ignition externes au système oxygène ont été évoquées : l'emballage thermique d'une batterie au lithium, une cigarette allumée.

6.4.1.1 Emballage thermique

Comme détaillé au § 5.2.1.1, les vide-poches situés sur les côtés du cockpit, à proximité des masques à oxygène, peuvent être utilisés pour stocker des appareils électroniques comprenant des batteries lithium (smartphone, tablette ou cigarette électronique). Des procédures spécifiques au feu liées à l'emballage de batteries lithium sont prévues. Dans le cas du vol MS804, elles détaillaient notamment le rôle du PF, du PM ; l'utilisation des moyens de protection (masque et cagoule) et des moyens d'extinction (extincteur au halon en cas de flamme).

À la suite de l'événement, une étude tests effectuée chez Airbus a révélé une potentielle fragilité quant à la résistance à la chaleur de la colle utilisée pour assembler les panneaux de certains vide-poches faisant craindre un scénario de propagation de feu initié par l'emballage d'une batterie lithium, suivi par l'écroulement du vide-poche et l'inflammation du système de distribution d'oxygène. À la suite de cette identification de risque, Airbus a créé une modification qui consiste

à changer le matériau des boîtes d'arrimage latérales du nid d'abeille à l'aluminium. Cette modification a fait l'objet d'une campagne de retrofit monitorée.

Dans le cadre de l'étude Feu-Oxygène, le BEA a testé certains appareils électroniques : l'emballage de leur(s) batterie(s) lithium a été provoqué par apport de chaleur ; les effets sonores et thermiques ont été analysés.

Les tests ont apporté les résultats suivants. D'une part, la signature acoustique des emballages de batteries lithium ne correspond pas aux bruits enregistrés sur le CVR du vol MS804. D'autre part, dans les conditions de test de l'étude, l'élévation de température des batteries lithium de tablette électronique, cigarette électronique et smartphone, ne s'est pas transférée au milieu environnant et les particules incandescentes n'ont pas conduit à une inflammation des matériaux. Un départ de feu a pu être observé, lié à la présence de matériel hautement inflammable (scotch) à proximité immédiate de la batterie.

L'emballage de batterie lithium a constitué ces dernières décennies un nouveau risque à prendre en compte notamment dans le cockpit en raison de l'utilisation de tablettes électroniques.

Les tests effectués n'ont pas révélé de fragilité particulière susceptible de correspondre à un scénario de l'accident du vol MS804 (en se basant sur les données disponibles). En d'autres termes, il est très peu probable que l'emballage d'une batterie lithium soit un élément du scénario accidentel du vol MS804.

6.4.1.2 Cigarette incandescente

La réglementation internationale n'est pas explicite quant à l'interdiction de fumer dans le cockpit des avions de transport commercial. Autant il existe des mises en garde sur le fait de fumer à proximité de l'oxygène dans l'espace passagers autant il n'existe rien concernant le cockpit. La décision semble être du ressort du commandant de bord.

Dans le cadre du vol MS804, la presse a fait part d'éléments qui seraient issus de l'enquête judiciaire évoquant la possibilité d'un équipage fumant dans le cockpit. Aucun élément issu de l'enregistrement de conversation dans le cockpit ne vient confirmer ou infirmer l'hypothèse de personnes fumant dans le cockpit.

Concernant l'événement du Boeing 737 s'étant produit au sol avant l'accident du SU-GCC, l'enquête a montré que le commandant de bord avait allumé une cigarette deux minutes avant le déclenchement du feu et de la fuite de l'oxygène. Les éléments d'enquête pointent une fragilité possible créée par le fait de fumer à proximité d'un masque laissé en position *EMERGENCY*.

Au cours des essais réalisés, la manipulation d'une cigarette à proximité immédiate d'une boîte de rangement de masque à oxygène enrichie en oxygène n'a pas créé de départ de feu. Il en a été de même lors de l'introduction de cendres chaudes dans la boîte. En revanche, l'introduction d'une cigarette dans une boîte enrichie en oxygène entraîne une accélération de sa combustion et, si la cigarette est en contact avec un flexible d'alimentation en oxygène, le feu peut perforer le tuyau entraînant une fuite d'oxygène sous pression venant créer un feu enrichi en oxygène susceptible de se propager rapidement.

Il n'a pas été établi de danger immédiat, systématique et évident à fumer à proximité d'une boîte de rangement de masque à oxygène même avec un masque en position *EMERGENCY* ou une boîte non resettée.

Cependant, en cas d'introduction de la cigarette dans la boîte de rangement, événement qui paraît improbable, néanmoins possible, un départ de feu, accompagné d'une fuite en oxygène, est possible. Dans ce cas, les flammes sont importantes et le feu se propage rapidement à l'environnement de la boîte de rangement.

6.4.2 Sources d'ignition internes

Lors du vol MS804, le contenu de la boîte de rangement du masque à oxygène du copilote s'est embrasé. L'absence de crépitement préalable, rend l'hypothèse de l'introduction d'un élément en combustion dans la boîte peu probable. La rapidité de la séquence amène à privilégier le scénario d'un endommagement interne du dispositif oxygène du copilote.

Les tests ont montré qu'en cas d'inflammation à l'intérieur du dispositif, après un délai de quelques secondes, le flexible se perce et il en résulte potentiellement un feu alimenté par la fuite d'oxygène créée par la rupture du flexible.

Le changement de la boîte de rangement du masque du copilote quelques vols auparavant a conduit à considérer l'hypothèse d'une contamination du flexible d'alimentation du masque lors de l'opération de maintenance qui aurait pu jouer un rôle dans un mécanisme interne d'ignition.

Le phénomène de coup de feu décrit dans la littérature, c'est-à-dire le dégagement de chaleur lié à la collision d'une particule sur un élément métallique, n'a pas été reproduit sur le banc d'essai utilisé. Cependant, les limitations des conditions d'essai ne permettent pas d'exclure cette hypothèse.

Les résultats des mesures électrostatiques effectuées sur le dispositif rendent très peu probable l'hypothèse d'une inflammation d'éléments du circuit ou de résidus organiques ou synthétiques présents dans la boîte de rangement en lien avec des charges électrostatiques.

En complément, l'introduction simple de graisse n'est pas synonyme de départ de feu. En d'autres termes, un départ de feu n'est pas systématique dès lors que l'on met en présence de la graisse et de l'oxygène. L'hypothèse n'est pas exclue pour autant.

En conclusion, bien que l'hypothèse d'un endommagement interne au dispositif soit privilégiée, les données disponibles et les essais effectués n'ont pas permis de déterminer quel mécanisme d'inflammation interne est susceptible de s'être produit lors du vol MS804.

Les essais effectués par le BEA ont été réalisés avec le postulat que la pression dans le circuit était de 5 bar. Les mécanismes d'ignition interne tels que l'impact de particules, l'oxydation de graisse ou l'inflammation par décharge électrostatique peuvent dépendre de la pression d'oxygène.

Des tests complémentaires pourraient permettre

- de déterminer les conditions d'auto-inflammation de graisse ;
- de déterminer les conditions de production d'un coup de feu et les effets en résultant.

6.4.3 Propagation d'un feu alimenté en oxygène

Les analyses de danger des systèmes oxygène doivent s'intéresser à la capacité du feu à se propager et à brûler un composant.

Pour l'incendie du vol MS804, l'analyse de l'enregistrement audio et de ceux réalisés dans le cadre des essais met en évidence la rapidité de la fuite, l'ampleur de l'embrassement et la vitesse de propagation du feu. Le fait qu'aucune action de l'équipage ne soit enregistrée par la suite semble également témoigner de l'ampleur et de la rapidité du phénomène.

C'est également le cas dans des événements s'étant produits au sol. Pour trois des événements étudiés (voir § 3), la rupture d'un flexible sous l'action du feu crée une fuite d'oxygène qui alimente le feu. Ces trois événements ont entraîné l'évacuation du cockpit.

En présence d'oxygène, les flammes de coloration plus blanche sont le signe d'un feu plus chaud, l'inflammabilité des matériaux est plus importante. En environnement enrichi en oxygène, un incendie se propage rapidement en dépit de la résistance au feu des matériaux composant l'environnement immédiat du point de départ.

6.4.4 Équipements respiratoires de protection

Lors de la survenue de fumées ou feu dans le cockpit, l'une des actions immédiates concerne la protection de l'équipage.

Dans les quatre accidents survenus au sol passés en revue, l'incendie s'étant produit au sol, les membres d'équipage ont eu la possibilité d'évacuer le cockpit et l'avion.

Lors de l'incendie du vol MS804, le copilote ne pouvait pas utiliser son masque à oxygène et de façon très probable ne pouvait pas rester sur son siège. Il est possible que l'intensité de l'incendie et la rapidité de celui-ci aient rendu également impossible l'utilisation de la cagoule (PBE) située du côté droit du cockpit.

Dans le cas du SU-GCC, une deuxième cagoule se trouvait du côté du commandant de bord. Cependant cette configuration n'est pas systématique, le cas d'un feu se propageant dans l'environnement d'un masque à oxygène du même côté que la cagoule, semble ne pas avoir été envisagé dans la définition des procédures feu et dans l'établissement des moyens de protection de l'équipage.

6.4.5 Moyens d'extinction

Au moins un extincteur doit être présent dans le cockpit et celui-ci doit être adapté à la lutte contre les feux de liquides et les feux d'équipements électriques. Le Halon 1211 a été l'un des agents les plus utilisés. Le SU-CGC était équipé d'extincteur au halon en cabine passager et dans le cockpit.

Au cours du vol MS804, lorsque l'incendie s'est déclenché, le commandant de bord a demandé qu'un extincteur lui soit apporté. L'extincteur du cockpit se trouvant à proximité immédiate de l'endroit où le feu s'est déclaré, il n'est pas possible de savoir si le commandant de bord faisait allusion à cet extincteur ou à un extincteur présent en cabine. D'un point de vue acoustique, il n'a pas été possible d'isoler une séquence correspondant à la percussion d'un extincteur.

Dans les quatre événements s'étant produits au sol, l'incendie a nécessité l'intervention des pompiers. Dans deux des événements, les membres d'équipage ont tenté d'éteindre le feu avec les moyens dont ils disposaient et ont constaté la difficulté d'accéder au cockpit (fumées noires) et l'inefficacité du halon.

Lors des essais menés par le BEA (voir § 5.3), les extincteurs au halon n'ont pas été efficaces pour éteindre un incendie alimenté par une fuite continue d'oxygène. Pour stopper le feu, le halon se combine avec l'oxygène pour réduire l'effet amplificateur que produit ce dernier sur l'incendie ; or la fuite alimente en permanence l'incendie en oxygène. Dans les conditions des essais, une fumée opaque envahit rapidement l'environnement dès l'utilisation de l'extincteur sur un feu enrichi en oxygène, dégradant considérablement la visibilité. De plus, la pyrolyse du halon crée des gaz acides (HF, HCl, HBr) en quantité nocive en cas de présence à proximité.

Les extincteurs au halon sont ainsi non indiqués pour traiter les feux alimentés par une fuite d'oxygène. Or, dans beaucoup de cockpits, c'est le seul moyen d'extinction à disposition.

Dans l'un des essais réalisés, l'arrivée d'oxygène a été volontairement coupée avant l'utilisation de l'extincteur. L'idée était d'agir sur la fuite d'oxygène et donc sur la source d'enrichissement du feu avant d'en tenter l'extinction avec un extincteur au halon. Le bruit de fuite a disparu instantanément, les flammes ont diminué et la propagation du feu a ralenti.

6.5 Conclusion

La séquence accidentelle a débuté alors que l'avion était en croisière au FL 370, un PNC présent dans le cockpit, le commandant de bord se reposant sur son siège, le copilote aux commandes.

Il n'a pas été possible d'expliquer avec précision le début de la séquence accidentelle. Il est probable que cela soit un débit d'oxygène résultant soit d'un appui sur le rotacteur *EMERGENCY* du masque à oxygène du copilote soit de la défaillance d'un composant. Un feu a ensuite commencé dans la boîte de rangement du masque, et a été alimenté par une fuite d'oxygène sous pression. Il n'a pas été possible de déterminer ce qui est arrivé en premier : le feu ou la fuite d'oxygène.

Quoiqu'il en soit, le feu alimenté en oxygène s'est propagé à l'extérieur de la boîte de rangement. Ce type de feu est rapide, d'ampleur importante et difficile à maîtriser. Il produit un bruit caractéristique comparable à celui d'un chalumeau. Les moyens de protection et d'extinction présents dans le cockpit n'étaient pas suffisants pour le maîtriser.

Le feu a endommagé des circuits d'alimentation de calculateurs, conduisant notamment à la déconnexion du pilote automatique.

Aucune action de l'équipage n'est enregistrée dans le cockpit. Il n'a pas été possible de déterminer si l'équipage est resté dans le cockpit, s'il s'y trouvait inconscient ou s'il a fui le feu, puis, est revenu ou resté hors du cockpit.

L'avion a eu une trajectoire non contrôlée et est entré en collision avec la mer.

7 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.

7.1 Poursuite de travaux en considérant les effets d'une surpression dans le circuit oxygène

Le constructeur des équipements d'oxygène a informé le BEA que trois événements récents de fuite d'oxygène s'étaient produits en vol. Les essais de la présente étude Feu-Oxygène étaient achevés lorsque le BEA en a eu connaissance.

Ces événements sont classés en incidents et n'ont pas donné lieu à une ouverture d'enquête. Pour les trois événements, les principaux éléments sont les suivants :

- Événement 1 : En croisière au niveau 380 sur un A321 le 29 mars 2022

Avis ECAM - Oxygène équipage 500psi en baisse.

L'équipage est alerté par l'ECAM d'une baisse de la pression d'oxygène. Le blinker de la boîte de rangement du masque à oxygène du commandant de bord indique un débit. L'équipage tente un reset de la boîte. Le débit d'oxygène est soudainement rapide et bruyant. Le pilote sort le masque pour tenter de résoudre le problème. Un débit rapide et simultané se produit dans tous les autres masques à oxygène du cockpit. Le débit ne peut pas être arrêté.

Il semble qu'au moins un microphone de masque soit activé, mais qu'il ne puisse pas être réinitialisé. L'oxygène de l'équipage est désactivé pour éviter le bruit élevé.

Le reste du vol est effectué au niveau FL100, deux bouteilles d'oxygène portable ont été apportées dans le cockpit en prévention.

Une première analyse indique qu'un défaut de réglage du détendeur de la bouteille d'oxygène pourrait être à l'origine de la fuite.

- Événement 2 : En croisière sur un A319 en janvier 2023

L'équipage a constaté un bruit de fuite et a coupé la ligne d'alimentation. Cependant, la fuite s'est poursuivie jusqu'à ce que la bouteille soit vide. Après avoir remplacé la bouteille lors du vol suivant, la fuite s'est à nouveau produite.

- Événement 3 : En descente depuis le FL370 sur un A319 le 28 mai 2023

Le masque du commandant de bord commence à perdre de l'oxygène alors qu'il n'a pas été touché et qu'il est rangé dans sa boîte. La pression d'oxygène de la bouteille descend de 1300 psi à 150 psi en 5 secondes.

À l'issue d'une première analyse, il apparaît qu'un défaut d'installation ou de réglage du détendeur installé sur une bouteille d'oxygène alimentant le cockpit pourrait conduire à une surpression dans l'ensemble du circuit. Face à une suppression (à partir de 13 bars), la boîte pourrait passer en

position non resettée, le régulateur du masque pourrait être mis en défaut et une fuite à forte pression pourrait se produire sur l'un ou l'ensemble des masques du cockpit.

Une analyse complémentaire est nécessaire pour considérer si ces événements peuvent conduire à examiner de nouvelles hypothèses pour tenter d'expliquer l'accident du vol MS804.

En particulier,

Une surpression dans le système de distribution est une hypothèse supplémentaire à considérer dans l'explication du fait que le micro du masque soit actif.

Le premier débit d'oxygène présent dans l'enregistrement du vol MS804 est celui d'un débit via le régulateur du masque. Une première hypothèse était un appui sur le rotacteur du masque, la surpression dans le circuit pourrait être une autre explication.

Quelques vols avant celui de l'accident, la boîte de rangement du masque à oxygène du copilote a été changée. Un défaut de détendeur pourrait être l'explication commune à deux faits inhabituels :
- le changement de la boîte de rangement et la fuite dans le cockpit.

La surpression est également une hypothèse à considérer pour l'explication du temps de vidange de la bouteille faible au regard des valeurs théoriques.

Les essais effectués par le BEA dans le cadre de cette étude ont été réalisés avec le postulat que la pression dans le circuit était de 5 bar. Les mécanismes d'ignition interne tels que l'impact de particules, l'oxydation de graisse ou l'inflammation par décharge électrostatique peuvent dépendre de la pression d'oxygène. De même, la fragilité créée par une source externe d'inflammation à proximité pourrait être supérieure en cas de fuite à haute pression.

L'architecture générale des systèmes de distribution d'oxygène - une bouteille haute pression, un détendeur, des boîtes de rangement, des masques avec régulateur - se retrouve sur la plupart des avions lourds de transport commercial.

En conséquence, le BEA recommande que l'AESA en collaboration avec les constructeurs conduise des analyses de risque complémentaires pour prendre en compte l'hypothèse d'une surpression dans le circuit de distribution et ses conséquences en termes de mécanismes de défaillances. Les résultats devront notamment être analysés au regard de facteurs explicatifs potentiels de l'accident du vol MS804. Ces analyses pourront nécessiter la conduite d'essais complémentaires dans le cadre d'un programme de recherche [Recommandation FRAN-2023-024].

7.2 Propagation d'un feu alimenté par une fuite d'oxygène

La présence du dispositif de distribution d'oxygène a un impact double : (1) l'atmosphère peut se trouver enrichie en oxygène à proximité du dispositif d'alimentation, soit en raison de micro-fuites, de tests du masque ou d'une rupture d'un élément du dispositif d'alimentation. La présence d'oxygène rend les éléments plus inflammables et un départ de feu plus probable. (2) Un feu qui endommage les circuits oxygène, s'il provoque la rupture d'un flexible, entraîne alors un feu enrichi en oxygène qui devient difficilement maîtrisable.

La certification exige que l'occurrence d'un feu oxygéné non contrôlé soit extrêmement improbable. L'occurrence de l'accident du vol MS804 et précédemment d'événements similaires (au sol), amène à considérer outre les moyens de prévention de ces incendies, leur propagation et les moyens de lutter contre.

Ces événements et les essais réalisés ont mis en évidence l'ampleur de l'embrassement et la vitesse de propagation du feu dans le cas d'un feu alimenté par une fuite d'oxygène. Ces feux produisent un son caractéristique, comparable à celui d'un chalumeau et une chaleur importante (reconnaissable à la blancheur de la flamme).

Au cours du vol MS804, lorsque l'incendie s'est déclenché, le commandant de bord a demandé à ce qu'un extincteur lui soit apporté. L'avion était équipé d'un extincteur au halon présent dans le cockpit. Celui-ci se trouvant à proximité immédiate de l'endroit où le feu s'est déclaré, il n'est pas possible de savoir si le commandant de bord faisait allusion à cet extincteur ou à un extincteur présent en cabine. D'un point de vue acoustique, il n'a pas été possible d'isoler de façon certaine, une séquence correspondant à la percussion d'un extincteur.

Dans les quatre événements s'étant produits au sol, l'incendie a nécessité l'intervention des pompiers. Dans deux des événements, les membres d'équipage ont tenté d'éteindre le feu avec les moyens dont ils disposaient et ont constaté la difficulté d'accéder au cockpit (fumées noires) et l'inefficacité du halon.

Lors des essais, les extincteurs au halon n'ont pas été efficaces pour éteindre un incendie alimenté par une fuite continue d'oxygène. Pour stopper le feu, le halon se combine avec l'oxygène pour réduire l'effet amplificateur que produit ce dernier sur l'incendie ; or la fuite alimente en permanence l'incendie en oxygène. Dans les conditions des essais, une fumée opaque envahit rapidement l'environnement dès l'utilisation de l'extincteur sur un feu enrichi en oxygène, dégradant considérablement la visibilité. De plus, la pyrolyse du halon a créé des gaz acides (HF, HCl, HBr) en quantité nocive.

Les extincteurs au halon sont ainsi non indiqués pour traiter les feux alimentés par une fuite d'oxygène. Or, dans beaucoup de cockpits, c'est le seul moyen d'extinction à disposition.

Les procédures existantes de lutte contre le feu n'ont pas été conçues pour traiter le cas spécifique d'un feu oxygéné. Les essais réalisés par le BEA montrent que ces procédures sont inefficaces voire contre-productives dans le cas d'un feu oxygéné.

Dans les événements au sol, les équipages n'ont pas réussi à maîtriser les incendies et ont évacué le cockpit. En vol, la lutte contre un feu enrichi en oxygène nécessite de stopper sans délai l'apport d'oxygène.

En conséquence, le BEA recommande que :

- *considérant l'occurrence d'événements au sol et d'un événement en vol pour lesquels s'est produit un feu oxygéné non contrôlé,*
- *considérant qu'un feu alimenté par une fuite d'oxygène se propage rapidement et avec une grande ampleur,*
- *considérant qu'un tel feu présente des caractéristiques identifiables telles que le bruit comparable à celui d'un chalumeau et la couleur des flammes,*
- *considérant que la lutte contre un incendie de ce type nécessite en premier lieu de stopper l'apport en oxygène,*
- *considérant que le masque à oxygène constitue un des équipements respiratoires de protection,*

l'AESA évalue la pertinence que les procédures feu/fumée dans le cockpit intègrent une reconnaissance d'un feu oxygéné (identifiable par un bruit caractéristique comparable à celui d'un chalumeau) et une coupure immédiate de l'arrivée d'oxygène dans ce cas, et qu'elle revoie le cas échéant les exigences d'installation et d'emport de moyens de protection indépendants du système de distribution d'oxygène [Recommandation FRAN-2023-025].

7.3 Risque lié à l'utilisation de cigarettes dans le cockpit

La réglementation internationale n'est pas explicite quant à l'interdiction de fumer dans le cockpit des avions de transport commercial. Autant il existe des mises en garde sur le fait de fumer à proximité de l'oxygène dans l'espace passager autant il n'existe rien concernant celui du cockpit. La décision semble être du ressort du commandant de bord.

Dans le cadre du vol MS804, la presse a fait part d'éléments qui seraient issus de l'enquête judiciaire française évoquant la possibilité d'un équipage fumant dans le cockpit. Aucun élément issu de l'enregistrement de conversation dans le cockpit ne vient confirmer ou infirmer l'hypothèse de personnes fumant dans le cockpit. Les résultats des tests effectués ne vont pas dans le sens d'une contribution d'une cigarette allumée à la séquence accidentelle.

Dans le cadre de l'événement s'étant produit au sol quatre ans auparavant sur un Boeing 737, l'enquête a montré que le commandant de bord avait allumé une cigarette deux minutes avant le déclenchement du feu et de la fuite de l'oxygène. L'enquête pointe une fragilité possible créée par le fait de fumer à proximité d'un masque laissé en position *EMERGENCY*.

Au cours des essais réalisés dans le cadre de la présente étude, la manipulation d'une cigarette à proximité immédiate d'une boîte de rangement de masque à oxygène, n'a pas créé de départ de feu même si cette dernière a été enrichie en oxygène. Il en a été de même lors de l'introduction de cendres chaudes dans la boîte. En revanche, l'introduction d'une cigarette dans une boîte enrichie en oxygène entraîne une accélération de sa combustion et si la cigarette est en contact avec un flexible d'alimentation en oxygène, le feu peut perforer le tuyau entraînant une fuite d'oxygène sous pression venant créer un feu enrichi en oxygène susceptible de se propager rapidement.

Il n'a pas été établi de danger systématique et évident à fumer à proximité d'une boîte de rangement du masque à oxygène même avec un masque en position *EMERGENCY* ou une boîte non

resetée. Cependant, en cas d'introduction de la cigarette dans la boîte de rangement, événement qui paraît improbable néanmoins possible, un départ de feu, accompagné d'une fuite en oxygène, est possible. Dans ce cas les flammes sont importantes et le feu se propage rapidement à l'environnement de la boîte de rangement.

En conséquence, le BEA recommande que l'AESA s'assure que :

- *le danger représenté par une cigarette incandescente dans le cockpit soit pris en compte et les risques associés évalués et,*
- *la réglementation de certification ou opérationnelle soit amendée le cas échéant [Recommandation-FRAN 2023-026].*

8 ANNEXES

Annexe Description fonctionnelle du système audio-CVR

Annexe Captation sonore par le microphone du masque à oxygène

Annexe Formes d'onde de l'enregistrement CVR

Annexe EVT1

Annexe EVT2

Annexe EVT4 et 9

Annexe EVT8

Annexe Lavatory

Annexe Air Formation

Annexe Gaz halon

Annexe Analyse audio comparative étude EVTS 6 7 8

Annexe Inflammation des graisses et hydrocarbures

Vidéos 1,2,3 & 4