

La perte de capacité du pilote de ligne par inhalation d'air cabine pollué

L'incapacité du pilote par inhalation de gaz toxiques dans le cockpit est un phénomène peu connu mais réel. Ce type d'événement est connu depuis plus de 20 ans, avec conséquences et sévérité variables tant sur la sécurité du vol que sur la santé des équipages et passagers. Le spectre de la pollution débouchant sur une intoxication humaine va des yeux irrités, toux, nausées jusqu'à la perte de connaissance d'une partie des équipages. Plusieurs rapports sur le sujet transmis aux compagnies et autorités aériennes ont déjà permis de comprendre quelques problèmes techniques.

Jean-Christophe Balouet, co-auteur de cet article, nous a quittés récemment. Docteur en environnement, il a œuvré toute sa vie dans la recherche sur la protection de l'environnement et la composition de l'air pollué.

Nous avons tous vu l'incident aérien du Boeing 777 le 21 février 2021 avec son moteur gauche en feu. Nous avons tous entendu les voix calmes, posées et sereines de l'équipage. Nous ne savons pas tous que cette panne de moteur est arrivée au pire moment du vol, avec un avion lourd et une nécessité absolue de disposer des deux moteurs. Personne n'a félicité dans ses commentaires l'équipage qui a potentiellement sauvé un avion, un équipage et ses passagers. Il faut signaler cette ingratitude des réseaux sociaux qui ne posent pas la bonne question : « que se serait-il passé en cas de phénomène incapacitant les pilotes ? ».

La définition même de « l'incapacitation »¹ est l'absence de réaction adaptée à une situation complexe. Celle-ci peut avoir pour origine un défaut de :

- l'avion, qu'il soit technique ou opérationnel non prévu par le constructeur ;
- de l'humain qui occulte la prise en compte d'un événement par une surcharge de travail temporaire ;
- Un défaut d'autre nature encore mal identifiée aujourd'hui du fait de son aspect insidieux.

Il nous faut analyser ces situations afin de les inclure dans nos réflexions lors d'expertises techniques où la réponse à la question posée ne vient pas naturellement. Il s'agit d'attirer l'attention sur un phénomène peu connu mais réel : l'incapacité du pilote par inhalation de gaz toxiques dans le cockpit, que nos amis anglosaxons nomment le « fume EVENT », tel que défini dans le document de l'OACI DOC 8984².

En effet, l'expertise qu'elle soit scientifique ou technique repose sur des faits et raisonnements acquis, reconnus et acceptés. À travers la comparaison entre les niveaux d'expertise liés à l'annexe 13 de l'OACI et de l'expert judiciaire, il faut différencier deux phénomènes peu connus de pollution gazeuse dans les avions, afin d'en déterminer la toxicité et leurs symptômes.

1. L'EXPERT JUDICIAIRE ET L'ENQUÊTEUR DU BEA N'ONT PAS LES MÊMES MOYENS D'INVESTIGATION

S'il est possible de prévoir la prochaine éclipse solaire ou de lune avec une précision redoutable et pour des siècles, nous devons considérer que la méca-

nique céleste est particulièrement maîtrisée. Toutefois, ce niveau d'expertise se complique fortement lorsqu'il faut faire appel à plusieurs disciplines. Cette méthodologie transversale permet une intervention pluridisciplinaire. Il s'agit dès lors de définir le large spectre d'expertises dans les domaines médicaux, toxicologiques, mécaniques, aéronautiques, juridiques et environnementaux. Il faut convenir que l'ensemble de ces disciplines ne peut être maîtrisé par un expert judiciaire unique. Dans ce cadre, les tribunaux et magistrats ne sont pas habitués à cette multiplicité de compétences aussi distinctes et complémentaires que nécessaires. Seul le bon sens de l'expert judiciaire doit prévaloir par l'appel aux sages.

Il faut rappeler que l'appellation « expert » ne repose sur aucun concept autre que celle de l'expérience professionnelle, alors que le titre d'expert judiciaire est parfaitement encadré. Sur ce sujet, il faut intégrer des notions édictées par l'O.A.C.I.³ notamment dans son annexe 13 concernant les accidents d'aéronefs.

En France, la D.G.A.C.⁴ dispose d'un pôle d'experts et d'enquêteurs au



Jean-Christophe Balouet
Expert en environnement
et pollution de l'air
PhD/Postdoc Smithsonian



Philippe Julienne
Expert judiciaire
en aéronautique et espace
près la cour d'appel d'Amiens
Secrétaire général
et trésorier de la Compagnie
nationale des experts
judiciaires en aéronautique
et espace (CNEJAE)

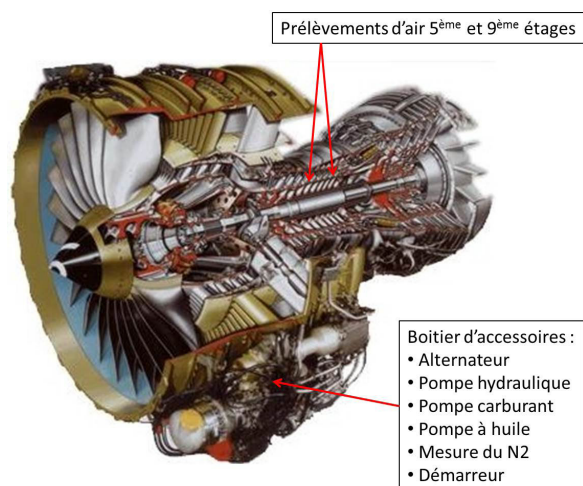


Image d'un réacteur CFM 56.

sein du B.E.A.⁵ dont la fonction principale est de continuer à améliorer la sécurité aérienne et maintenir la confiance du public au travers de ses enquêtes et études de sécurité conduites en toute indépendance avec efficacité et impartialité. La méthodologie d'investigation répond à une structure d'analyse définie en fonction de secteurs précis qui couvrent l'intégralité des spécialisations aéronautiques. Il s'agit là d'une différence notable entre l'expert judiciaire, seul face aux questions judiciaires posées et l'expert du B.E.A. qui dispose des ressources nécessaires au bon déroulement de l'enquête.

Il ne faut pas sous-estimer la complémentarité de ces deux pôles d'experts, qui travaillent pour deux ministères distincts, mais dans une direction commune de vérité et de qualité de l'explication.

2. LE PRINCIPE DE L'ENQUÊTE : L'AÉROTOXICITÉ, UN PHÉNOMÈNE INSIDIEUX

Afin de valider les niveaux d'expertise, il convient de prendre un premier exemple pratique.

Dans un rapport de décembre 2020, le BEA conclut à un incident sérieux lié à un phénomène « nouveau et insidieux ».

Lors du vol Genève-Barcelone du 17 novembre 2017, l'équipage d'un Airbus de la compagnie Vueling évoque les fortes émanations des moteurs de l'avion qu'ils suivaient au sol. Le commandant de bord informe qu'il se sent nauséux, qu'il va faire un rapport d'odeurs dans le cockpit, le copilote informe le capitaine qu'il se sent également intoxiqué. Puis, la situation évolue.

L'analyse du B.E.A. est la suivante : « Après avoir stationné quelques minutes derrière un avion d'affaire Citation, est autorisé au décollage à 8h51. Qui a lieu à 8h57. À 8h59, le capitaine suggère d'augmenter le débit d'air dans le cockpit, suite à l'apparition de symptômes et d'une indisposition.

À 9h05, le capitaine informe le copilote de ses nausées, ce dernier fait alors déployer le masque à oxygène du commandant avant de se rendre aux toilettes, admettant avoir été pris de fortes nausées.

À 9h07, l'équipage technique envisage ensemble le déroutement de l'appareil en cas de dégradation de la situation.

À 9h17, le capitaine lance le message d'urgence universel "PAN ! PAN ! PAN !" et indique le déroutement de l'appareil sur Marseille, où l'avion se posera à 9h36. »

La sécurité du vol a été compromise par l'état d'incapacité partielle de l'équipage du cockpit. L'incident a fait l'objet d'un compte rendu sécuritaire, qui a mandaté le B.E.A. pour réaliser l'investigation.

Le rapport relatant l'incapacitation de l'équipage de conduite, une inspection diligentée sur les deux avions ne démontre aucune anomalie sur leurs moteurs. L'origine de l'incapacité partielle de l'équipage sera toutefois considérée par le B.E.A., à défaut d'identification factuelle de la cause, comme provenant d'une contamination de l'air soit par ingestion des contaminants émis par un appareil précédant au roulage et introduits dans le système d'air conditionné de l'Airbus, soit générée par le système de conditionnement d'air de l'Airbus, par les moteurs, dont l'auxiliaire (APU).

Le B.E.A. reconnaît un lien de temporalité, toutefois malgré l'intervention de sachants de toutes les spécialités, l'enquête n'a pu préciser le lien de causalité impliquant l'origine de la pollution de l'air, en précisant la toxicité des contaminants possibles.

L'enquêteur du B.E.A. et l'expert judiciaire ne sont pas omniscients. De ce fait, ils doivent l'un et l'autre s'entourer de collaboration d'autres spécialités. Il est établi que ce genre d'enquête ou d'expertise est plus liée à une pollution de l'air. Il est conseillé au magistrat de procéder à une désignation duale de spécialistes qualifiés « environnement » et « aéronautique », afin de cadrer, d'expliquer et de mettre en évidence les différents doutes liés à l'aspect insidieux du phénomène nommé le « FUME EVENT » ou « SMOKE EVENT ».

3. L'AÉROTOXICITÉ DE L'AIR CABINE : LE SMOKE EVENT

Il faut préciser que la méconnaissance du phénomène pousse les diverses autorités à réagir, notamment avec la création récemment d'une commission « qualité de l'air à bord des avions » au sein de l'A.N.S.E.S.⁶ ou de programmes E.A.S.A.⁷.

Ce type d'événement est connu depuis plus de 20 ans, avec conséquences et sévérité variables tant sur la sécurité du vol que sur la santé des équipages et passagers. Le spectre de la pollution débouchant sur une intoxication humaine va des yeux irrités, toux, nausées jusqu'à la perte de connaissance d'une partie des équipages. Il faut noter que lorsque certaines odeurs apparaissent plus ou moins inconfortables dont celle de chaussette sale, il y a apparition de premiers symptômes légers pour les personnes les plus intoxiquées.

Le phénomène est qualifié de « SMOKE EVENT » lorsqu'il est associé à l'apparition de fumée ou brouillard visible, ou de « FUME EVENT » lorsqu'il est associé à l'apparition d'odeurs (vol Vueling). D'une manière pragmatique, il faut considérer que l'apparition d'odeur ou de fumée est généralement liée à l'ingestion d'huiles d'origines diverses et de leur dégradation olfactive par chauffage (odeur de sardine pourrie). Des microparticules d'huile moteur ou de fluide hydraulique passent dans le système d'air conditionné. Ce point retient tout l'intérêt des acteurs liés à l'étude du sujet. En effet les huiles

et fluides hydrauliques liés au fonctionnement d'un avion démontrent la présence d'additifs divers, notamment dans les retardateurs de flammes dans la prévention du risque d'incendie. Plusieurs de ces additifs sont des organophosphorés, dont la neurotoxicité est réputée.

Le 29 octobre 2020, la Direction générale de l'Aviation civile a publié l'info sécurité n° 2020/05 dédiée à ce genre d'événements. Les risques sur la santé des équipages et la sécurité des vols y sont reconnus. De la même façon, l'OACI avait publié la circulaire n° 344-AN/202 (2015) : la formation et les pratiques de rapport en cas de FUME EVENT.

Le 1^{er} mars 2021, la F.A.A.⁸ a publié une Information pour les opérateurs, sur les supports de formation au profit des personnels de cabine (InFO 21002).

Aujourd'hui, nous savons que des centaines de rapports ont ainsi été transmis aux compagnies et autorités aériennes. Les informations contenues sont strictement confidentielles. Or, l'expert judiciaire doit respecter le principe de confidentialité, notamment en ce qui concerne les données médicales individuelles (experts médecins). Or, l'accès à ces données peut être éclairant pour une expertise technique. Il y a un conflit qui peut être perçu comme contraire à la transparence requise par l'article 11 du Code de procédure civile. Or, il est important de préciser que plusieurs rapports ont déjà permis de comprendre quelques problèmes techniques. Ils ont conduit les autorités aéronautiques à prendre des mesures spécifiques, telles que d'imposer des inspections à intervalles dédiés (émission de consignes de navigabilité⁹).

3.1. Les compléments techniques nécessaires : les statistiques

Afin de se rendre compte de la potentielle dangerosité du phénomène, un certain nombre de chiffres sont à définir. En 2017, 36 800 000 vols ont transporté 4 milliards de personnes. Le taux d'incidence, fondé sur le rapport des pilotes, connu est de 0,2 % des vols. Le résultat statistique est de l'ordre de huit millions d'expositions de personnes par an. Dans 95 % des cas, ces expositions ne sont pas symptomatiques ou incapacitantes.

Toutefois, dans moins de 5 % des cas, l'équipage et les passagers peuvent



Illustration d'un problème de pollution de l'air dans la cabine d'un avion.

présenter des symptômes plus ou moins sévères.

Les cas très préoccupants sont assez rares. Ils sont dépendants du type et de la concentration de polluant en suspension dans l'air de la cabine et de la susceptibilité individuelle de chacune des personnes exposées.

3.2. Toxicité

Il existe quelques facteurs toxicologiques à prendre en compte et à respecter au contradictoire, au-delà de l'approche classique sur la seule concentration d'un seul contaminant :

- **Susceptibilité individuelle** : elle se caractérise de manière individuelle par la génétique, ou est liée à des facteurs de comorbidité. La Covid est un bon exemple. Le spectre des symptômes est bien plus varié selon les individus, incluant phénomènes inflammatoires ou « orage immunitaire », effets à long terme (neurologiques, cardiaques, sensoriels, cognitifs...).
- **Types d'expositions chronique ou multiples** : elles sont fondées sur des modèles de type « perturbateurs endocriniens ». Il faut préciser que le principal perturbateur et ses effets associés, le T.C.P.¹⁰, est en cours d'étude sous Reach¹¹.
- **Mélange** : le niveau de contamination, des mélanges de polluants pris de manière individuelle (au-dessus de T.L.V.s¹²), n'est pas suffisant pour provoquer les symptômes majeurs. En découle une perception asymptomatique.

À travers ces quatre éléments de validation du niveau de toxicité et de réponse individuelle en fonction de critères tels que la saturation dans

l'air, il faut intégrer un critère de contamination supplémentaire qui est le temps d'exposition.

- **Substances non-monotoniques¹³** : elles se caractérisent par un profil dose-réponse non-linéaire. Elle peut être avec un ou deux points d'inflexion, entre très faibles doses et doses maximales. Certaines peuvent être plus toxiques à faible dose.

En toxicologie, il convient de tester des concentrations qui couvrent au moins 5 logs¹⁴. Or peu de substances ont été testées de la sorte, et quelques centaines d'entre elles s'avèrent effectivement non-monotoniques¹⁵.

3.3. Exposition

Lors d'une enquête faisant suite à une exposition de ce type, il existe une interrogation majeure sur la disponibilité des analyses de l'air pollué et de la fiabilité des mesures. Si les résultats sont rigoureusement exacts et irréfutables, il faut se poser la question de la largeur du spectre des polluants recherchés et mesurés. En effet, les données disponibles sur les composants de l'air de la cabine d'un avion pressurisé recensent de manière relativement fiable 340 composés répartis en 2/3 d'irritants et 1/3 de neurotoxiques incapacitants.

Les méthodes de recensements sont clairement hétérogènes et notoirement différentes en termes de précision (taux d'extraction/calibration). D'autre part, il faut préciser qu'aucune campagne de mesure sur des polluants identifiés n'a été faite sur la composition de l'air dans un avion « symptomatique ».

Ce point ne permet pas de valider la véracité d'un événement reporté par

un équipage sur le contexte de la qualité de l'air en cabine. Toute la difficulté de l'expertise judiciaire réside sur ce point.

En revanche, une campagne d'analyse systématique d'un large spectre de polluants non ciblés, sur des avions « témoins », a permis de relever la présence de seulement 30 % des substances toxiques. Cette explication permet de conforter la méthodologie et le résultat des mesures sur un modèle d'avion en fonction de sa motorisation, de son âge, de son modèle d'opération et de maintenance.

En effet, les événements liés à la qualité de l'air cabine par contamination du système d'air pourraient potentiellement être dépendants de la phase de vol et notamment en lien avec changement de régime moteur.

3.4. Exemple d'un composé

Le triméthylol propane phosphate (T.M.P.P.) est un des contaminants attendus.

Il s'agit d'un neurotoxique, parmi les plus puissants (hors gaz S.A.R.I.N.¹⁶). Les composés triméthylolpropane, présents dans l'huile d'avions, produisent des émanations toxiques. Celles-ci apparaissent en présence de phosphore lorsqu'ils atteignent une température de 500°C. Cette valeur est très inférieure à celles rencontrées dans les moteurs d'avion de type turboréacteurs.

Toutefois, aucune étude n'a démontré de trace de T.M.P.P. depuis 1973, à l'exception de celle réalisée par le Prof Vogel de l'Université de Hambourg¹⁷ en 2020. Il faut considérer que les huiles dans le moteur se trouvent sous forme d'aérosols. Ceux-ci peuvent être sévèrement fractionnés en dimension, du fait des conditions de température et de rotation du moteur et des contraintes de lubrification¹⁸. Ce fractionnement se fait sous forme de particules nanométriques polluantes ou nanos.

Elles sont notoirement plus concentrées dans le milieu aéroportuaire et dans l'air de la cabine (de 30 à 100 000 particules/cm³...). Lors des phases de mise en route du réacteur ou de roulage de l'avion vers les pistes d'envol, l'air se charge en particules polluantes par diffusion, dans la cabine, d'air issu des conduites de pressurisation et de climatisation, directement prélevés sur les moteurs.

Une fuite d'huile supérieure à 0,6 litre/heure/moteur suffit à générer des odeurs dans l'air conditionné.

4. DONNÉES PRATIQUES : LES SYMPTÔMES

Les premières publications sur le syndrome aérotoxique datent des années 2000. Elles décrivent les symptômes affectant les personnes exposées aux FUME et SMOKE EVENTS. Le spectre d'intoxication est large, l'intensité variable, souvent transitoire notamment pour l'inflammation.

L'intoxication peut s'installer sur plus long terme, notamment pour les symptômes neurologiques et cognitifs. Ceux-ci influent sur la mémoire à court terme et les temps de réaction des pilotes. Ces intoxications peuvent être de plus ou moins incapacitantes. De nombreux autres symptômes sont décrits, plus ou moins rares dans la population et d'étiologie plus ou moins débattue. Toutefois, il faut noter que la F.A.A. a récemment pris en compte ces phénomènes en publiant l'info 21002 dans la formation des personnels navigants commerciaux¹⁹.

Il ne faut ni nier ni négliger ces symptômes. Ils sont aussi décelés dans le voisinage des aéroports – parmi les riverains jusqu'à 10 km (USA, Europe). Il s'agit le plus souvent des mêmes symptômes que ceux ressentis par les équipages.

CONCLUSION

La prise en compte de ces deux phénomènes de FUME et SMOKE event, n'est pas clairement identifiée dans les règlements européens. Leur niveau de toxicité avéré est une donnée qui peut provoquer un des symptômes sur l'être humain, allant jusqu'à « l'incapacitation » complète des pilotes. Il s'agit d'un phénomène dangereux pour la sécurité des vols.

Les statistiques réalisées par les autorités de l'aviation civile internationale démontrent que ces événements sont plus fréquents lors des phases de démarrage moteur, de roulage sol, sous régime poussé des moteurs au décollage, ou de la descente. Afin de contrer les divers effets de contamination durant les différentes phases de vol, plusieurs solutions peuvent être envisagées. Celles-ci appartiennent essentiellement aux exploitants.

Par ailleurs, nous savons que toute contamination laisse des indices. Or, à ce jour, il n'existe pas de tests qui permettent d'établir avec précision quel polluant a été présent lors de la phase de contamination. Le soupçon louable doit être un argument à prendre en compte dans les questions qui se posent lors d'une expertise judiciaire. Il faut envisager un phénomène de FUME ou de SMOKE event.

NOTES

1. Terme anglais repris dans la littérature aéronautique à ce jour, et ne dispose d'aucune traduction officielle aéronautique.
2. AN/895b "l'incapacité soudaine de pilotes en vol, peut être définie comme étant toute réduction de l'aptitude physique ou mentale d'un degré ou d'une nature qui soit susceptible de compromettre la sécurité des vols.
3. Organisation de l'aviation civile internationale.
4. Direction générale de l'aviation civile.
5. Bureau Enquête Accident - Arrêté du 14 octobre 1994 relatif aux commissions d'enquête sur les accidents et incidents d'aéronefs civils.
6. Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail.
7. Agence européenne de sécurité aérienne.
8. Direction de l'aviation civile américaine ou Federal aviation administration.
9. Ou Airworthiness directives en anglais
10. Phosphate Tricalcique β
11. <https://www.perturbateurendocrinien.fr/2019/09/04/gestion-perturbateurs-endocriniens-reach-approche-pragmatique-entre-mise-oeuvre-cas-resorcinol/>
12. Threshold Limit Value en anglais, ou valeur limite d'exposition.
13. En quoi « la dose nécessaire aux effets peut aussi varier selon le toxique à différentes concentrations ».
14. Unité de mesure physique qui couvre au moins 100 000 particules par millilitres 100 000p/ml.
15. La vision selon laquelle « la dose fait le poison », utilisée conventionnellement pour évaluer les dangers implique que les effets augmentent de façon constante en fonction de la dose, c'est-à-dire qu'on observe une courbe dose-réponse monotone. (Le point sur la relation dose-réponse non-monotone | Autorité européenne de sécurité des aliments (europa.eu)).
16. Neurotoxique puissant inventé par le génie chimique allemand, dont els initiales sont celles des 5 chimiste à l'origine du produit
17. Dans la fraction ultrafine des particules en nanos... (<20 nm ou < 0,002 μm, alors que la chimie des particules porte classiquement sur les particules de 2,5 ; 5 ou 10μ).
18. Prévue pour permettre à l'huile de rester par pression entre les joints, acceptant ainsi une consommation d'huile qui ne devrait pas dépasser 1 litre à l'heure par moteur.
19. Voir le Safety bulletin d'AIRFLEX ingénierie pour le mois de mars 2021 sur LinkedIn.