

Le syndrome aérotoxique

Faut-il le reconnaître comme maladie professionnelle ?



Alice Belliard
Yasmine Daouia
Camille Dubois
Paul Gagna

Amin Hamzaoui
Kais Kharrat
Tanguy Renaudie
Guillaume Jarry

Cette publication a été réalisée par des étudiants en troisième année du cycle ingénieur de Mines Paris PSL Research University. Il présente le travail réalisé dans le cours intitulé « Descriptions de controverse », qui a pour objectif d'introduire les étudiants à l'univers incertain de la recherche scientifique et technique et de les sensibiliser aux enjeux de la participation citoyenne.

Mines Paris décline toute responsabilité pour les erreurs et les imprécisions que peut contenir cet article. Vos réactions et commentaires sont bienvenus. Pour signaler une erreur, réagir à un contenu ou demander une modification, merci d'écrire à la responsable de l'enseignement : madeleine.akrich@mines-paristech.fr.

Sommaire

Table des matières

■	SOMMAIRE.....	1
■	INTRODUCTION	2
■	ÉMERGENCE DU PROBLEME, APPARITION DE SYMPTOMES ET DIFFICULTE DE QUALIFICATION.....	3
■	DEVELOPPEMENT DU SYSTEME « BLEED-AIR » ET PREMIERS CAS D'INCIDENTS D'EMANATION.....	3
■	DE « AIR CABIN SYNDROME » A « SYNDROME AEROTOXIQUE », UN GLISSEMENT SEMANTIQUE QUI TRADUIT UNE RECRUESCENCE DES CAS ?	5
■	CONFLITS DE MESURE, DE QUALIFICATION ET QUANTIFICATION DU PHENOMENE.....	8
■	DU FAIT A LA PREUVE : COMMENT RELIER DES SYMPTOMES REPORTEES A UN "SYNDROME AEROTOXIQUE" ?.....	11
■	DES SYMPTOMES REPORTEES A DIFFERENTES ECHELLES DE GRAVITE : QUELS SYMPTOMES POUR QUEL SYNDROME ?.....	11
■	LA DIFFICULTE D'ETABLIR UN LIEN DE CAUSALITE DIRECT RESULTANTS DE ZONES D'OMBRES TOXICOLOGIQUES.....	14
■	LA CHARGE DE LA PREUVE : UN FREIN SUPPLEMENTAIRE A L'IDENTIFICATION DE CAUSALITE.....	15
■	LA QUETE DE LA RECONNAISSANCE DU SYNDROME COMME MALADIE PROFESSIONNELLE : QUELS EFFETS JURIDIQUES ?	19
■	LE POUVOIR CONTRAIGNANT DES NORMES	19
■	LA RECONNAISSANCE INDIVIDUELLE.....	22
■	RECONNAISSANCE D'UNE MALADIE COMME MALADIE PROFESSIONNELLE NATIONALE	23
■	CONCLUSION	25
■	MATERIEL ET METHODES.....	27
■	REFERENCES	28
■	ARTICLES DE PRESSE GENERALISTE / PRESSE PROFESSIONNELLE	28
■	ARTICLE DE REVUE SCIENTIFIQUE	28
■	RAPPORTS	28
■	TEXTES DE DROIT (LOIS, DECRETS, ...).....	28
■	DEFINITIONS	28
■	FILMS (DOCUMENTAIRE, FICTION, ...).....	29
■	IMAGES, PHOTOGRAPHIES, TABLEAUX ET GRAPHIQUES	29
■	AUTRES.....	29
■	ENTRETIENS	29

■ Introduction

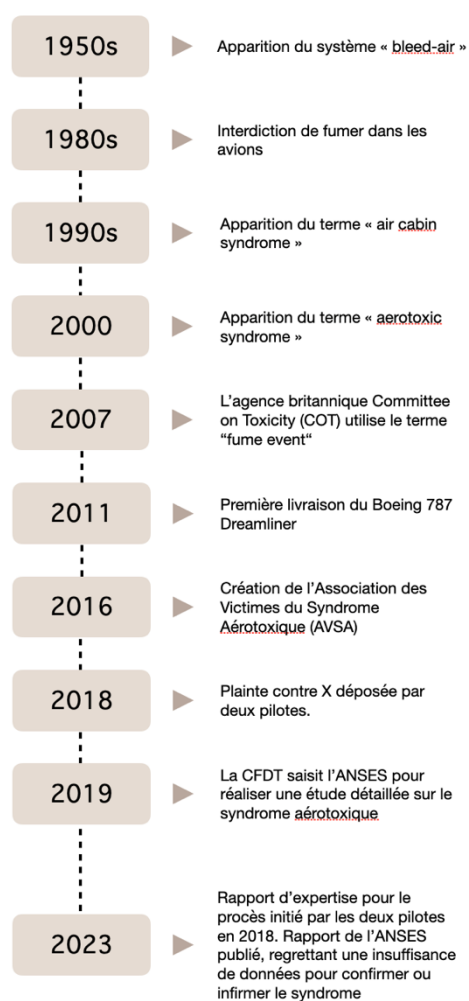
Le syndrome aérotoxique, anciennement dénommé *Air Cabin Syndrom*, représente une controverse depuis les années 1970, bien qu'il trouve ses racines dans les années cinquante avec l'apparition d'une technologie décriée par certains acteurs. Ce syndrome, auquel seraient communément associés de nombreux symptômes allant de gênes respiratoires ou d'irritations jusqu'à des troubles neurologiques, a gagné en visibilité ces dernières années, s'immisçant notamment dans les arènes médiatiques et judiciaires à la suite de plaintes de victimes présumées.

Selon les défenseurs d'une meilleure reconnaissance du syndrome, notamment des associations de victimes ou des syndicats de personnels navigant commerciaux (PNC) et de pilotes, il serait imputable à l'inhalation de substances chimiques circulant dans l'air de la cabine à cause de la technologie de captation d'air extérieur susmentionnée, le « *bleed-air* ». Le débat repose ainsi, dans un premier temps, sur la mesure, l'évaluation, et la reconnaissance de la toxicité éventuelle de l'air de cabine d'un avion et des dangers auxquels sont exposés les membres d'équipage et les passagers ; en particulier lors d'incidents de dégagements de produits toxiques voire

de fumée en vol. Ces incidents, communément appelés *fume events* lorsque les fumées sont visuellement imperceptibles mais olfactivement remarquables, et *smoke events*, lorsque la fumée devient perceptible, se déroulent à une fréquence oscillant entre un pour deux-cents et un pour deux mille, suivant les sources – ce qui illustre le nœud de controverse, et le rôle prépondérant que doivent y jouer les scientifiques.

Outre les critères évoqués précédemment, cette controverse s'articule également autour de la question de la charge de la preuve, du passage des symptômes au syndrome, avec des implications majeures pour les différents acteurs : victimes déclarées, compagnies aériennes, autorités de régulation nationales et internationales, associations, mondes scientifique et médical, industriels, etc... A qui revient-il d'essayer de démontrer l'existence du syndrome ? Quelle preuve est nécessaire ? Suffisante ? Comment montrer un lien de causalité directe ? S'agit-il d'une reconnaissance individuelle, ou collective ?

Au-delà de la reconnaissance juridique, cette dernière question ouvre le débat quant à une reconnaissance du syndrome comme maladie professionnelle. Controverses médicales et scientifiques mises de côté, la reconnaissance systématique de l'existence d'un lien entre l'activité professionnelle d'un ou une PNC et le syndrome aérotoxique se heurte à la complexité des normes qui régissent le secteur aérien, et à la difficulté pour les agences de régulation de proposer des évolutions pertinentes.



Chronologie du Syndrome Aérotoxique¹

¹ Groupe de travail « Syndrome aérotoxique » (2024), « Chronologie du Syndrome Aérotoxique ». Mines Paris – PSL.

■ Émergence du problème, apparition de symptômes et difficulté de qualification

■ Développement du système « bleed-air » et premiers cas d'incidents d'émanation

Dans les années 1950, une nouvelle technologie d'alimentation de la cabine en air, dite « *bleed-air* », apparaît dans les premiers avions de ligne à réaction. L'intégration de ce système coïncide avec l'apparition d'événements d'émanation de fumée de nouvelle nature (apparition de fumée visible), dont ce dernier pourrait être l'origine : le *bleed-air* capte l'air extérieur au niveau des compresseurs moteurs, puis l'achemine dans la cabine et le cockpit comme présenté sur le circuit du schéma en Figure 1. Si l'air du cockpit provient d'un seul des propulseurs, l'air de la cabine où sont installés les passagers provient, lui, des deux propulseurs, de part et d'autre de l'avion.

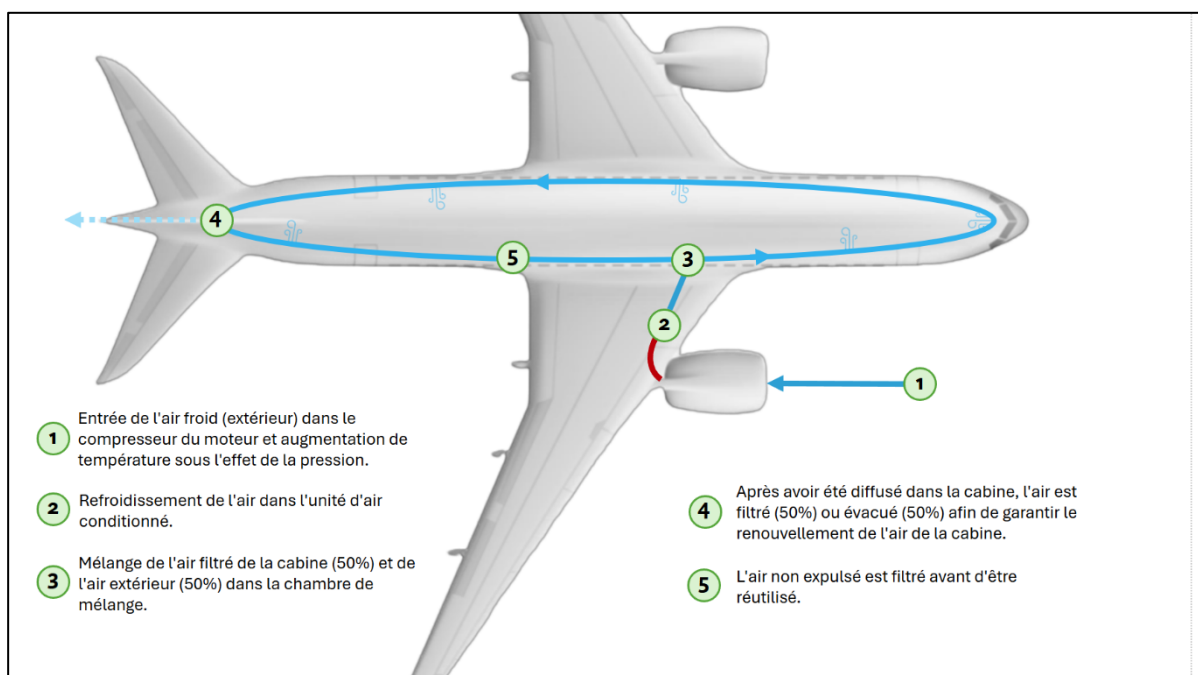


Figure 1 Schéma descriptif circulation de l'air avec système "bleed-air"².

Le principal intérêt du *bleed-air* réside dans la captation d'un gaz à des conditions de pression et température facilitant son utilisation, comme schématisé sur la Figure 2. Cela évite aux constructeurs de placer de lourds, volumineux et énergivores systèmes de compression électriques à d'autres endroits de l'appareil.

² Groupe de travail "Syndrome aérotoxique" (2024), "Fonctionnement du bleed-air". Mines Paris – PSL.

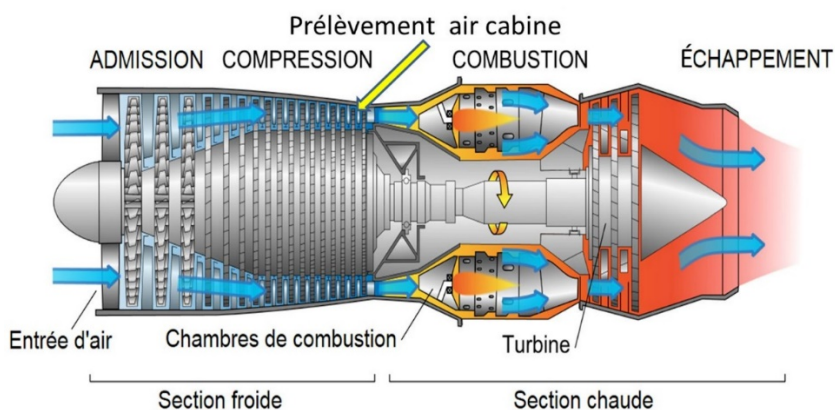


Figure 2 Schéma descriptif de la compression d'air par un propulseur d'avion³

La contrepartie majeure présentée par ce système réside dans sa porosité partielle avec certains systèmes de fluides utilisés dans les moteurs. Parmi ces composés, on retrouve l'huile servant à lubrifier les différentes pièces du moteur, dont les composés chimiques principaux sont rappelés dans le Tableau 1. Sous l'effet de la chaleur, l'huile peut changer d'état et former des nanoparticules que des joints usés peuvent laisser passer. Ces particules sont donc mélangées à l'air circulant dans la cabine et le cockpit.

Composé	Sous composés	Formule	Proportion dans les huiles moteur	Dangerosité
<i>Esters gras</i>	Pentaérythritol, Acide valérique	-	95%	pas d'effets neurotoxiques
Phosphates d'aryles (TCP)	Phosphate de Tri-ortho-crésyle	TOCP	2-6%	effets neurotoxiques importants
	Phosphates de méta Crésyle	TMCP		effets neurotoxiques faibles
	Phosphates de para Crésyle	TPCP		pas d'effets neurotoxiques
	Autres isomères	-		-

Tableau 1 Composition chimique des huiles moteurs (principales) et précision des effets neurotoxiques connus. ⁴

Dans un rapport de l'ATC (Association Toxicologie Chimie), l'huile et ses composés sont décrits comme suit :

« L'huile utilisée pour la lubrification de l'APU (Mobil Jet Oil II) est la même que celle employée pour les moteurs. Cette huile contient des additifs anti-usures à haute pression. Lorsqu'ils sont portés à haute température (pyrolyse), ces lubrifiants peuvent dégager des composés organiques volatils potentiellement dangereux comme les TriCrésyl-Phosphates (TCP) qui sont des neurotoxiques. »⁵

Ces caractérisations de contaminations de l'air restent néanmoins imprécises, sont décrites des odeurs désagréables de "chaussettes mouillées", des difficultés respiratoires et, dans les cas rapportés les plus sévères, des émanations de fumée perceptibles, communément appelées "smoke event" ou "fume event". Ces

³ Jeff Dahl et Berrucommons, « Jet engine French.svg », Jet engine French.svg, Wikipedia, 16 décembre 2017, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jet_engine.svg.

⁴ ATC, PICOT A. & al. (2018) Connaissez-vous le syndrome aérotoxique ? p.10-13. Disponible sur : https://atctoxicologie.fr/images/Dossier/Le_SYNDROME_A%C3%89ROTOXIQUE/20181125_D21_SyndAeroTox_V_P-20181125.pdf

⁵ ATC, PICOT A. & al. (2018) Connaissez-vous le syndrome aérotoxique ? p.10-13. Disponible sur : https://atctoxicologie.fr/images/Dossier/Le_SYNDROME_A%C3%89ROTOXIQUE/20181125_D21_SyndAeroTox_V_P-20181125.pdf

événements apparaissent dans les cas spécifiques où les joints au niveau des réacteurs sont particulièrement usés et les changements d'états de l'huile ont pu mener au dégagement important de composants. Dans une temporalité similaire à l'apparition du système, les équipages militaires et civils ont commencé à rapporter des symptômes neurologiques et respiratoires après l'inhalation de ces fumées, bien que la dangerosité exacte des produits chimiques impliqués reste difficile à évaluer. Un article des syndicats national des pilotes et personnel navigant commercial (SNPNC), menant une étude avec la Force Ouvrière (FO) indique :

« Le premier cas d'intoxication très bien documenté est celui d'un navigateur C-130 Hercules devenu inapte en 1977 après avoir respiré de l'air cabine contaminée. Les propriétés neurotoxiques des organophosphates ont été connues avant la Deuxième Guerre mondiale. La toxicité de l'huile à réaction chauffée a été connue dès 1954. »⁶

C'est dans ce contexte et à la suite de ces événements qu'émerge le débat relatif au syndrome aérotoxique.

■ De « Air Cabin Syndrome » à « Syndrome aérotoxique », un glissement sémantique qui traduit une recrudescence des cas ?

Le regroupement de ces symptômes, désormais connu sous le terme "Syndrome Aérotoxique" n'a pas toujours porté cette dénomination. Ainsi, si les premiers cas rapportés datent des années 1950, il faut attendre les années 1990 pour qu'ils soient désignés sous le terme "air cabin syndrome". Une décennie plus tard, on constate une évolution sémantique, avec l'apparition de "aerotoxic syndrome" ou "syndrome aérotoxique" dans la presse.

« Le syndrome aérotoxique est le nom donné à la maladie causée par les effets consécutifs à l'inhalation de l'air contaminé qui pressurise la cabine d'un avion. Le terme a été introduit en 1999 par le Docteur Harry Hoffman, le Professeur et toxicologue Chris Winder et l'expert Jean-Christophe Balouet. »⁷

Ce choix de terminologie dénote une volonté par les victimes et les syndicats d'insister sur la nature qu'ils considèrent "toxique" du syndrome. Ce faisant, ils alertent sur de potentiels risques de troubles neurodégénératifs à long terme pour les personnels de bord, les pilotes et passagers. On trouve, dans le dictionnaire Le Robert, la définition suivante concernant "toxique" :

« Toxique : 2. Adjectif : qui agit comme un poison. »⁸

⁶ Sorel, G. (2016, novembre 22). AÉROTOXICITÉ. SNPNC-FO. <https://snpnc.org/aerotoxicite/>

⁷ Entretien avec deux représentants de l'AVSA, 13 novembre 2024.

⁸ Dictionnaire Le Robert, "Toxique". Disponible sur : <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/toxique>.

Le glissement sémantique décrit non seulement une évolution sur la nature des symptômes désignés, mais aussi sur leur localisation. En France, le Journal du Dimanche publie en 2016 un article intitulé « Pilotes de ligne, la maladie des cockpits »⁹. Le terme “cockpit” ne désigne pas la même région de l’avion que la “cabine”. Cela peut être mis en lien avec des incidents incluant des membres d’équipage ne se trouvant pas dans le cockpit. Le choix du terme “syndrome aérotoxique” souligne qu’il s’agit d’un problème sanitaire et technologique généralisé aux avions (comportant un système “bleed air”) et centré sur la notion de caractérisation de l’air, désigné par les termes “toxique” ou “pollué”. Dans un épisode d’Envoyé Spécial consacré au sujet, les journalistes de France 2 ont filmé une séquence montrant des passagers d’un vol British Airways affectés à la suite d’un incident d’émanation :

« Une passagère s’inquiète du comportement inhabituel de l’équipage. “J’ai demandé au chef de cabine ce qu’il se passait, il m’a répondu que tous les membres de son équipe tombaient comme des mouches” [...] Le pilote décide d’atterrir en urgence à Vancouver. “Nous aurons besoin des équipes médicales au sol [...] Onze membres d’équipage sont affectés et quelques passagers” »¹⁰

Une augmentation de l’utilisation de ces termes s’adjoint à ce glissement sémantique. L’analyse quantitative des articles scientifiques et de presse a montré des évolutions importantes.

Le nombre d’articles scientifiques évoquant une potentielle pollution de l’air des avions a connu un premier pic en 2000, correspondant à la parution du terme syndrome aérotoxique, et une seconde augmentation autour de l’année 2013. Le nombre d’articles et de citations sur le sujet de la pollution des cabines aériennes n’a cessé d’augmenter, montrant un réel intérêt pour la santé des équipages et passagers. Le glissement sémantique est aussi observé parmi les articles scientifiques. Le graphe présenté en Figure 3 montre deux évolutions successives : cependant l’utilisation du terme “aerotoxic syndrome” n’a pas fait chuter celle de « air cabin syndrome ». Cette subtilité indique la précaution de la sphère scientifique quant à la caractérisation par le terme « toxique », sujet délicat à l’interface entre médecine et sciences chimiques.

⁹ Tabet M. (2016, 16 octobre), “Pilotes de ligne, la maladie des cockpits”, Journal du Dimanche. Disponible sur : <https://www.lejdd.fr/Societe/Pilotes-de-ligne-la-maladie-des-cockpits-817468>.

¹⁰ Kerfriden M. et Conchon S. (2018, 26 avril). “ [Fume event] L’air des avions est-il toxique ? ” [Reportage]. Envoyé Spécial, France TV. Disponible sur <https://www.youtube.com/watch?v=koEGB2U2xE>

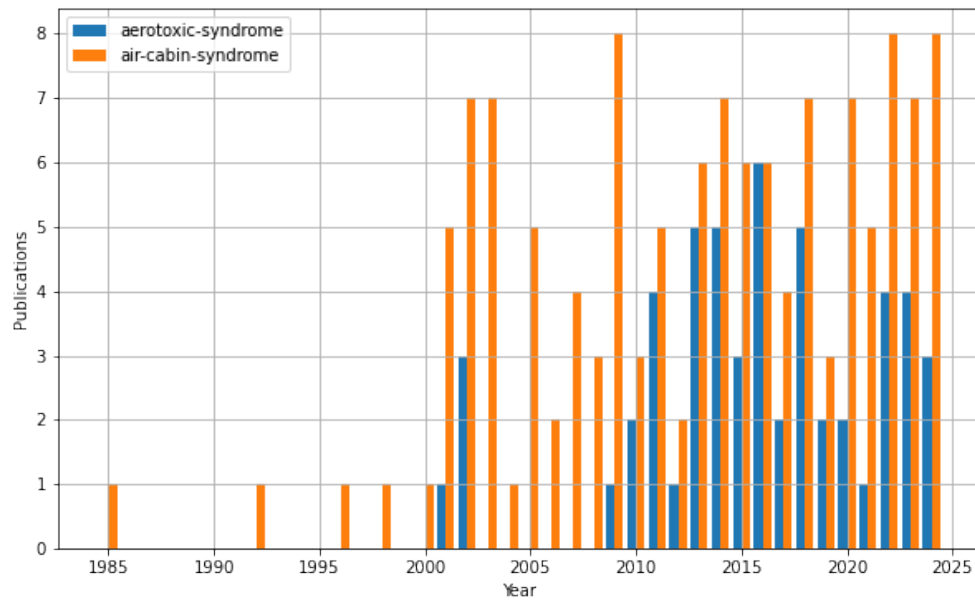


Figure 3 : Glissement sémantique : histogramme des occurrences des termes "aerotoxic syndrome" et "air cabin syndrome" au fil des années.¹¹

Dans la presse, on observe des tendances identiques concernant l'augmentation du nombre d'article de presse traitant du sujet. Quant au glissement sémantique, le terme « air cabin syndrome » n'apparaît qu'une fois, sous la dénomination analogue « maladie du cockpit », alors que le nombre d'occurrences du terme « syndrome aérotoxique » augmente conséquemment après 2015 (voir figure 3), suite à une première utilisation au début des années 2000.

¹¹ Groupe de travail "Syndrome aérotoxique". (2024). "Glissement sémantique", Mines Paris – PSL

Histogramme des mentions de syndrome aérotoxique

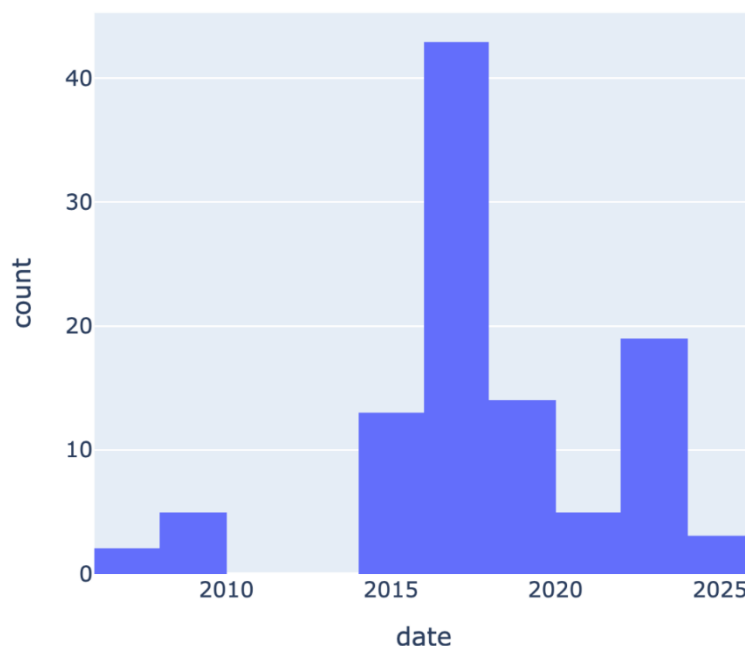


Figure 4 : Histogramme de l'occurrence du terme « syndrome aérotoxique » dans les articles de presse au cours des années.¹²

Le terme « syndrome aérotoxique » est donc employé assez fréquemment dans ce débat, surtout dans la presse, et connu au sein des compagnies aériennes, pilotes et personnels navigant, ainsi qu'au niveau du personnel médical. Cependant, il convient de se poser la question de la pertinence du terme : nous remarquons, en effet une certaine précaution non seulement dans les articles scientifiques mais également dans la sphère médicale. Ceci se traduit dans la prise de parole d'un médecin du travail en entreprise, lors d'un entretien :

« Déjà, il faut que vous sachiez que nous avons pris parti dans le domaine médical, de mettre des guillemets au autour du mot aérotoxique, parce que dans l'ensemble, on va dire, je pense qu'à quasiment 100% les médecins ne considèrent pas qu'il y ait un problème de toxicité dans ce qui est convenu d'appeler syndrome aérotoxique. »¹³

■ Conflits de mesure, de qualification et quantification du phénomène

Les compagnies aériennes et les autorités de régulation soutiennent en premier lieu que la qualité de l'air en cabine est, en fonctionnement normal, supérieure à celle dans une agglomération (cf. ANSES, COT). Le cas spécifique des fume et smoke events reste, quant à lui, insuffisamment étayé par des données scientifiques directes - alors même qu'il concentre de nombreuses interrogations. En effet, l'absence de dispositifs de mesure d'air en temps réel à bord des avions empêche la collecte de données précises au moment même où les incidents surviennent, rendant difficile toute quantification rigoureuse des niveaux d'exposition.

¹² Groupe de travail "Syndrome aérotoxique". (2024). "Histogramme de l'occurrence des termes", Mines Paris – PSL

¹³ Entretien avec un médecin du travail, 14 novembre 2024

Ceci expliqué, les difficultés d'évaluation quantitative des smoke events débutent avant même le défi numérique que représente la question. En effet, les notions de « smoke event » et « fume event » sont ambiguës et jamais définies de manière unanime, rendant leur appréhension difficile. Dans un article publié en 2017, Susan Michaelis tente à travers deux études de qualifier les circonstances dans lesquels travaillent des équipages de l'air. En particulier, un sondage effectué auprès de 274 pilotes de ligne lui permet de déduire que :

« 88% were aware of exposure to aircraft contaminated air. In all, 34% reported frequent exposures, 18% reported one to two big events and 7% reported visible smoke or mist events, with most reporting fumes only. »¹⁴

Cette quantification reste assez vague sur les notions de « big events », « frequent exposure » ne précise pas non plus de quelle exposition il s'agit. En 2007, un rapport du COT quantifie pour la première fois la fréquence de ces incidents d'émanation à 1 vol sur 200 - tandis que certaines compagnies à 1/1000, et d'autres, comme EasyJet, l'estiment autour de 1/13500. Encore une fois, les écarts visibles sur ces chiffres indiquent la difficulté d'obtenir un comptage précis des faits et fait revenir sur l'ambiguïté autour des définitions de smoke et fume events. L'avionneur Airbus propose, lui, les définitions suivantes :

« Smoke: the products of burning materials made visible by the presence of small particles (ICAO).
Fumes: Gaseous compounds which are not visible (ICAO).
Odor: A particular smell especially an unpleasant one. »¹⁵

Un nouveau frein à l'établissement de données quantitatives repose sur le manque de rapports par les pilotes et personnels volant. La plupart des pilotes n'étant pas originellement formés pour reconnaître certains produits toxiques dont il est question dans ce débat, l'établissement d'un rapport précis est impossible. De plus, la déclaration des incidents de fume events est découragée par les compagnies aériennes. Un ancien pilote d'Air France nous rapporte dans un entretien :

« les fume events doivent faire l'objet d'un atterrissage d'urgence selon la procédure en place. Or les pilotes hésitent souvent à respecter cette procédure afin de ne pas être dans le viseur de la hiérarchie et voir leur évolution de carrière menacée. Aussi, dans certaines compagnies aériennes, il arrive que les pilotes soient actionnaires et hésitent à déclencher un atterrissage d'urgence. »¹⁶

Outre un manque de mesures en temps réel et de quantification précise des incidents, sont présentes des difficultés à effectuer des études scientifiques pertinentes de toxicité. Chacun des composés potentiellement nocifs est clairement identifié et étudié individuellement hors contexte cabine. Des seuils de dangerosité sont

¹⁴ S. Michaelis, J. Burdon, C. V. Howard, et W. H. O. R. O. for Europe, « Aerotoxic syndrome: a new occupational disease? », Public health panorama, vol. 03, n° 02, Art. n° 02, 2017.

¹⁵ Airbus. (2019, mai). *Flight Operations Recommendations*. Disponible sur <https://www.airbus-win.com/wp-content/uploads/2019/06/managing-smoke-and-fumes-in-flight.pdf>

¹⁶ Entretien avec un ancien pilote de la compagnie Air France se considérant victime du syndrome aérotoxique, le 13 novembre 2024

établis pour tous dans les conditions données de laboratoire à petite échelle, reproduisant plus ou moins bien le cadre voulu. Dans le cadre des études menées sur huiles moteur, les températures sont contrôlées et assurées afin de correspondre aux conditions réelles de vol, tandis que d'autres fonctions et variables d'état telles que la pression, l'altitude ou l'hygrométrie ne peuvent pas être reproduites à l'identique, parfois par manque de moyens. Malgré ces méthodologies approximatives, les conclusions des papiers sont claires : les différents TPC présents dans les huiles moteurs sont toxiques, mais à des seuils difficilement déterminés par manque d'information. L'état de l'art en matière de toxicologie identifie un réel besoin d'approfondissement concernant les TCP et plus particulièrement dans le cas de l'air des avions.

Rappelons de plus qu'à ces recherches est imposé un protocole d'étude spécifique, étudiant "un composant chimique à la fois", ne rendant pas compte des effets cocktails ni des répétitions. Les scientifiques en charge soulignent bien souvent l'impertinence de ces études voire l'inutilité quant à l'étude du syndrome aérotoxique et déplorent le manque total de mesures en vol, qui serait pourtant des plus pertinentes pour l'établissement de concentrations de chaque composé et leur proportion. En conclusion, un article précise :

« The current approach of the toxicological consequences to consider candidate chemicals, for which trigger limits can be set, is a standard approach in classical toxicology. However, it should be stated explicitly that, based on the current evidence in the peer reviewed scientific literature, the proposed 'One chemical at a time' approach will do absolutely nothing to address health problems that air crew and frequent flyers suffer from. »¹⁷

En effet, l'huile moteur comprenant un mélange connu de composants ne peut être prise hors contexte et décomposée pour l'étude de sa dangerosité. Michaelis, Susan ; Jonathan Burdon; C. Vyvyan Howard, scientifiques et experts en chimie et toxicologie travaillant spécifiquement sur ce sujet, appellent à agir urgemment, à prendre ces nouvelles composantes en compte, élargir les études toxicologiques et neurologiques, à implémenter des capteurs en vols et des filtres sur les conduits pour relier ces études aux mesures réelles et ainsi mettre en avant le potentiel danger. Ainsi, la sphère scientifique s'attaquant au sujet dénonce principalement une mauvaise méthodologie et un consensus non négligeable, notamment en sciences où la rigueur est clé.

En résumé, les dernières 50 années ont marqué une émergence des cas de syndrome aérotoxique, possiblement liée à la nouvelle technologie « bleed air » laissant pénétrer des composants toxiques dans l'air des cabines. L'apparition du terme précis et le glissement terminologique vers « syndrome aérotoxique » rendent compte de l'identification d'un problème généralisé. Un conflit de qualification et quantification du problème émerge tout de même au sein de la sphère scientifique, mais le manque de données, l'appréhension de la toxicité de l'air et la méthodologie scientifique non pertinente pour la définir complexifient par essence la description du problème. La persistance de ces zones d'ombre maintient la controverse entre experts, autorités sanitaires, et compagnies aériennes, tandis que les membres d'équipage continuent de réclamer des mesures concrètes pour minimiser les risques.

17 C. Vyvyan Howard et al., « Is a Cumulative Exposure to a Background Aerosol of Nanoparticles Part of the Causal Mechanism of Aerotoxic Syndrome? », *Nanomedicine and Nanoscience Research*, 7 février 2018, <https://www.gavinpublishers.com/article/view/is-a-cumulative-exposure-to-a-background-aerosol-of-nanoparticles-part-of-the-causal-mechanism-of-aerotoxic-syndrome>.

■ Du fait à la preuve : comment relier des symptômes reportés à un “syndrome aérotoxique” ?

L'augmentation des cas et de la gravité des effets donnent une ampleur encore plus grande au débat. Les premières qualifications du problème sont mises à l'épreuve dès lors qu'il y a des cas concrets de toxicité et apparition de problèmes de santé à différents degrés de gravité. Le manque de conclusions scientifiques s'accompagne d'incertitudes médicales et alors s'ouvre une nouvelle problématique : que faire lors des cas cliniques et comment reconnaître un lien de cause à effet ? Le débat autour du syndrome aérotoxique se heurte donc également à des enjeux épistémologiques cruciaux liés à la charge de la preuve, une problématique qui complique la reconnaissance officielle de cette condition comme un syndrome.

■ Des symptômes reportés à différentes échelles de gravité : quels symptômes pour quel syndrome ?

Dans un contexte de débat sanitaire, il est important de rappeler tout d'abord ce qui est entendu par symptômes, syndrome et maladie. Le dictionnaire de l'académie médicale donne les définitions suivantes :

« Symptôme n.m. (symptom): Manifestation pathologique perçue par le malade, par opposition au signe constaté lors de l'examen. »¹⁹

« Syndrome n.m. (syndrome) : Ensemble de **symptômes** et **signes cliniques** et de modifications pathologiques, toujours associés, dont les causes ou les mécanismes peuvent être différents et qui permettent d'individualiser une **affection**. (*Affection n.f. (affection)* : Manifestations pathologiques qui correspondent à une entité morbide). »²⁰

« Maladie n.f. (disease, illness, sickness) : Altération des fonctions physiques ou mentales d'une personne à l'origine de souffrances. »²¹

Ces définitions sont accompagnées des précisions suivantes :

« Le terme de maladie, dans le langage médical courant, correspond à un ensemble de symptômes anormaux résultant d'une même **cause connue**. Son identification aboutit à l'établissement d'un diagnostic et d'un traitement approprié, adapté de façon globale aux attentes du patient, tenant compte de ses attentes, dans le respect de ses croyances et valeurs. »²²

18 Howard et al., « Is a Cumulative Exposure to a Background Aerosol of Nanoparticles Part of the Causal Mechanism of Aerotoxic Syndrome? » Howard et al., « Is a Cumulative Exposure to a Background Aerosol of Nanoparticles Part of the Causal Mechanism of Aerotoxic Syndrome? »

19 « Symptôme - Dictionnaire médical de l'Académie de Médecine », 2020, <https://www.academie-medecine.fr/le-dictionnaire/index.php?q=sympt%C3%B4me>.

20 « Syndrome - Dictionnaire médical de l'Académie de Médecine », 2020, <https://www.academie-medecine.fr/le-dictionnaire/index.php?q=syndrome>.

21 « Maladie - Dictionnaire médical de l'Académie de Médecine », 2020, <https://www.academie-medecine.fr/le-dictionnaire/index.php?q=maladie>.

22 « Maladie - Dictionnaire médical de l'Académie de Médecine », 2020, <https://www.academie-medecine.fr/le-dictionnaire/index.php?q=maladie>.

« Le terme de syndrome est souvent utilisé en lieu et place de maladie. Il s'agit d'un ensemble de symptômes qui ne constituent pas une entité ou un concept dont l'identification correspond à une cause parfaitement connue. »²³

« Assez souvent un syndrome peut être rattaché à une cause. Il s'apparente à une maladie. Le terme de syndrome est alors souvent utilisé en lieu et place de maladie, soit parce que la cause n'est pas parfaitement élucidée, soit par usage même lorsque l'avancée des connaissances a permis de mieux classer la maladie. »²⁴

Autrement résumé, nous pouvons schématiser ainsi : un syndrome est ensemble de symptômes dont la cause n'est pas identifiée. La terminologie évolue s'il y a identification : un syndrome devient une maladie dès lors que ses causes sont connues et identifiées, alors un diagnostic et un traitement peuvent être élaborés.

Le débat autour du syndrome aérotoxique porte à juste titre cette terminologie et labellisation de "syndrome", puisqu'encore aucune cause précise n'est officiellement identifiée. Dans une démarche de reconnaissance de maladie, une étude clinique précise est donc nécessaire. Ce processus est cependant complexe et requiert de nombreuses analyses ainsi que des témoignages de cas avérés. Le Syndicat National du Personnel Navigant Commercial Force Ouvrière (SNPNC-FO) écrit :

« Les symptômes du syndrome aérotoxique peuvent être aigus, de courte durée ou chroniques, à savoir de longue durée. Toutes les combinaisons de ce qui suit peuvent être vécues : État d'épuisement, même après le sommeil ; Vision floue ou vision en tunnel ; Secousses et tremblements ; Perte d'équilibre et des vertiges ; Crise cardiaque ; Perte de conscience ; Troubles de la mémoire ; Maux de tête ; Bourdonnements d'oreilles ; Étourdissements, vertiges ; Confusion / problèmes cognitifs ; Sensation d'état d'ébriété ; Nausée ; Diarrhée ; Vomissement ; Difficultés respiratoires (essoufflement) ; Serrement dans la poitrine ; Insuffisance respiratoire ; Palpitations cardiaques ; Irritation : yeux, nez, voies respiratoires »²⁵

Toutefois, la médecine reste un domaine où le doute épistémologique persiste et les avis de différents professionnels peuvent varier sur un même cas. La notion de syndrome même pose un problème pour certains, où déjà reconnaître un syndrome reviendrait à trop avancer dans l'identification d'un lien de causalité, regroupant des symptômes non corrélés sous une même appellation. En effet, le médecin du travail avec qui nous sommes entretenus nous explique avoir du mal à appeler ce problème un « syndrome », qu'il s'agit simplement de symptômes plus ou moins généraux. Il nous explique que ces symptômes sont courants et donc décorrélés d'une exposition à un fume ou smoke event.

« Il y a quelques études qui montrent que les symptômes très vagues qui sont dans le syndrome aérotoxique "Je suis mal à la tête, j'ai des problèmes de concentration J'ai des petits fourmillements dans les mains, J'ai des tremblements, j'ai du mal à marcher Les symptômes, "light headedness" "Sensation de tête légère". Donc ces symptômes-là, si vous prenez une population en général, Ils sont de l'ordre de 20%, Il y a 20% de gens, qui vous les prenez n'importe quand, n'importe comment,

23 « Maladie - Dictionnaire médical de l'Académie de Médecine », 2020, <https://www.academie-medecine.fr/le-dictionnaire/index.php?q=maladie>.

24 « Syndrome - Dictionnaire médical de l'Académie de Médecine », 2020, <https://www.academie-medecine.fr/le-dictionnaire/index.php?q=syndrome>.

25 Guillaume Sorel, « AÉROTOXICITÉ », SNPNC-FO (blog), 22 novembre 2016, <https://snpnc.org/aerotoxicite/>.

ils ont ça. Évidemment que 20% sont aussi des gens qui travaillent, sont aussi des gens qui sont dans les avions quand ça sent pas bon »²⁶

Afin de mieux encadrer ce débat autour de l'existence du syndrome en tant que tel, une analyse qualitative et quantitative des cas pratiques médicaux a été effectuée. En raison de la caractérisation complexe et des symptômes variés du syndrome aérotoxique, il reste difficile de mesurer de manière qualitative et quantitative les effets de cette pathologie. Pour mieux comprendre les liens entre l'exposition à l'air contaminé des cabines pressurisées et les symptômes rapportés, Susan Michaelis a conduit deux études distinctes, présentées dans son article de recherche publié en 2017 *"AEROTOXIC SYNDROME : A NEW OCCUPATIONAL DISEASE?"*.

La première étude, menée entre 2005 et 2009, s'est concentrée sur les pilotes de BAe 146, un avion connu pour des incidents de contamination de l'air. Un échantillon de 274 pilotes a participé à une enquête sur leur historique d'exposition, leurs effets sur la santé et leurs diagnostics médicaux. Parmi eux :

- 63 % ont signalé des effets indésirables allant de symptômes aigus immédiats (fatigue, troubles cognitifs, problèmes respiratoires) à des symptômes chroniques (fatigue persistante, sensibilité chimique multiple, troubles neurologiques).
- 88 % étaient conscients de leur exposition à de l'air contaminé, et 34 % ont rapporté des expositions fréquentes.
- 36 pilotes (13 %) ont perdu leur aptitude médicale à voler en raison de problèmes de santé chroniques graves.

Les effets indésirables (symptômes aigus ou à long terme) étaient des effets cardiovasculaires, digestifs, généraux (fatigue, baisse des performances), irritants, neurocomportementaux, neurologiques et respiratoires, reporté sur le graphe en Figure 5.

FIG 1. ÉTUDE A: ENQUÊTE DE SANTÉ CHEZ DES PILOTES BAe 146 – EFFETS SANITAIRES (N = 219)

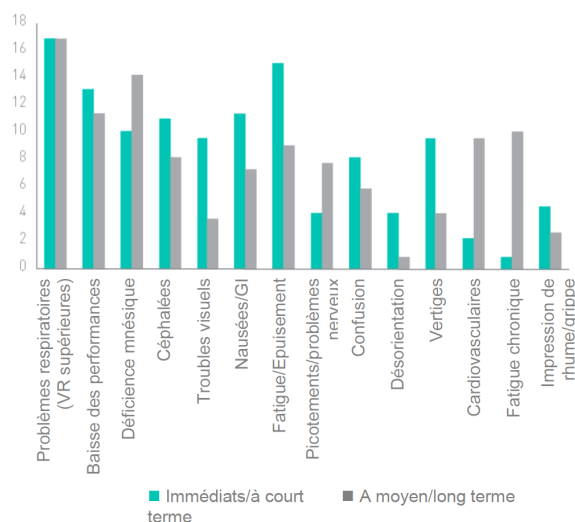


Figure 5 effets sanitaires étude pilotes BAe 146 (Michangelis)²⁷

²⁶ Entretien avec un médecin du travail, 14 novembre 2024

²⁷ Susan Michaelis et al., « Aerotoxic Syndrome: A New Occupational Disease? », Public Health Panorama 03, no 02 (2017): 198-211. Michaelis et al., « Aerotoxic Syndrome ».

La deuxième étude a examiné 15 incidents spécifiques de contamination d'air survenus dans plusieurs types d'avions. Ces événements étaient caractérisés par :

- 80 % impliquent des émanations sans fumée visible, souvent lors des phases de montée ou de descente.
- 93 % des incidents ont conduit à des symptômes chez les équipages, tels qu'une incapacité partielle ou complète en vol.
- Des effets à long terme ont été identifiés dans 53 % des cas, incluant des troubles neurocomportementaux, neurologiques et respiratoires.

Les résultats des deux études montrent une cohérence dans les effets aigus et chroniques rapportés, notamment au niveau neurologique et respiratoire. Cependant, malgré ces observations, l'absence de protocole médical standardisé complique la reconnaissance officielle du syndrome aérotoxique comme une maladie professionnelle. Ces cas illustrent la nécessité d'une collecte rigoureuse de données médicales et environnementales pour mieux établir les liens de causalité et améliorer la prise en charge des personnes exposées.

■ La difficulté d'établir un lien de causalité direct résultants de zones d'ombres toxicologiques

L'établissement d'un seuil de toxicité pour la santé et d'un lien de causalité direct entre certains produits et les effets et symptômes qu'ils engendrent sur le corps humain n'est pas tâche facile. Comment savoir si l'état du personnel navigant ainsi que des passagers est réellement menacé ? Une composante clé du débat repose sur l'étude de toxicologie. Domaine d'activité en constante évolution, la toxicologie n'est pas individualisée comme une discipline spécialisée mais pluridisciplinaire concentrant activités médicales (réanimation, médecine d'urgence, médecine du travail, médecine légale...) et non médicales (pharmacie, biologie...). L'analyse de toxicologie s'avère difficile en considération des apports de chaque discipline, ralentissant l'établissement d'un bilan précis commun pour des situations particulières telles que le débat autour du syndrome aérotoxique. De nombreuses recherches scientifiques commanditées par la FAA, l'Union européenne, les lobbys de compagnies aériennes et l'ATC (Association Toxicologie Chimie) visent à étudier l'impact de nano substances sur la santé, et remettre à jour ces seuils en vue du problème du syndrome aérotoxique. Le rapport de l'ATC, ainsi que les travaux des scientifiques Susan Michaelis, Jonathan Burdon, Howard C. Vyvyan se sont appliqués à l'étude des composés contenus spécifiquement dans les huiles moteurs (cf. Apparition du système « bleed-air » et premiers cas d'incidents d'émanation) comme les différents Phosphates de Tri-crésyle (TCP) et leur différents sous-types.

L'attention accrue portée à ce phénomène mène à davantage d'études quantitatives qui, en 2015, confirment que l'exposition répétée aux organophosphorés tels que les TCP (molécules également présentes dans les insecticides) peut entraîner des symptômes persistants. Toutefois, sans preuve scientifique suffisante pour établir une causalité directe, on en reste à l'établissement d'une simple liste de symptômes, sans pour autant faire reconnaître ce problème comme syndrome. C'est là le cœur du débat pour l'établissement de lien de causalité.

Dans un article de recherche publiée en 2019 dans *Chemosphere*, Megson a cherché à déterminer si un catalyseur de palladium, présent dans les systèmes de climatisation des avions, pouvait transformer les isomères de TCP non toxiques en isomères toxiques ooo-TCP (ou ToCP). Cet isomère est souvent détecté à des

concentrations significatives (10 % à 60 % des TCP totaux) dans l'air des cabines, bien que les huiles moteur des avions n'en contiennent pas initialement.²⁸

Pour explorer cette hypothèse, les chercheurs ont essayé de recréer en laboratoire des conditions proches de celles des avions par une température de 400 °C, représentative de l'air des moteurs. Ils ont mis en contact des mélanges de TCP non toxique avec un catalyseur de palladium (Figure 6). Après analyse des échantillons, les résultats n'ont montré aucune preuve d'apparition des isomères toxiques ooo-TCP.

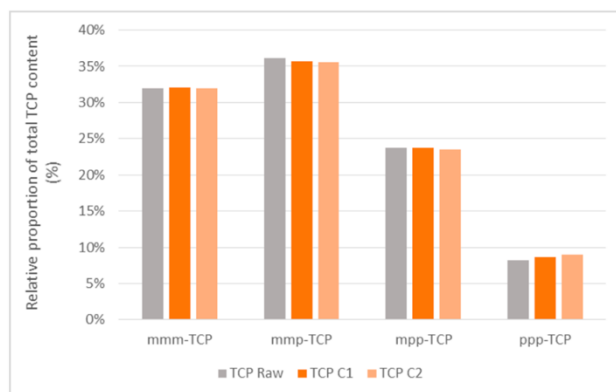


Figure 1. Percent abundance of each of the 4 TCP isomers recorded in the original TCP mixture (TCP Raw) and the two replicates passed through the catalysts (TCP C1 and TCP C2).

Figure 6 Chemosphère 2019²⁹

Cette conclusion suggère que la présence de ToCP dans les cabines d'avion ne provient pas du catalyseur de palladium. Toutefois, l'étude n'a pas reproduit toutes les conditions réelles, notamment les pressions et altitudes caractéristiques des vols. Ces résultats incitent donc à explorer d'autres sources potentielles de ToCP dans l'air des cabines. Ceci illustre parfaitement la difficulté qu'il y a à établir une causalité directe.

■ La charge de la preuve : un frein supplémentaire à l'identification de causalité

La charge de la preuve est un concept central dans le monde juridique. Cette charge repose sur le demandeur à l'instance. Aussi appelée « fardeau de la preuve », elle « correspond aux éléments que chaque partie doit apporter pour prouver les faits »³⁰. En droit français, cette charge de la preuve trouve son origine dans les maximes « Actori incumbit probatio » : « la preuve incombe au demandeur » ; et « Necessitas probandi incumbit ei qui agit » : « la preuve incombe à celui qui agit ». Dans le Code de Procédure civile, on peut ainsi lire :

« Article 9 : Il incombe à chaque partie de prouver conformément à la loi les faits nécessaires au succès de sa prétention. »³¹

²⁸ D. Megson, S. Hajimirzaee, A. Doyle, F. Cannon, et J.-C. Balouet, « Investigating the potential for transisomerisation of trycresyl phosphate with a palladium catalyst and its implications for aircraft cabin air quality », *Chemosphere*, vol. 215, p. 532-534, janv. 2019, doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.082.

²⁹ David Megson et al., « Investigating the potential for transisomerisation of trycresyl phosphate with a palladium catalyst and its implications for aircraft cabin air quality », *Chemosphere* 215 (1 janvier 2019): 532-34, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.082>.

³⁰ Wikipedia, « Charge de la preuve ». Disponible sur [https://fr.wikipedia.org/wiki/Charge_de_la_preuve_\(droit\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Charge_de_la_preuve_(droit)).

³¹ CPC/Legifrance, disponible sur https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006070716/LEGISCTA000006149637/#LEGISCTA000006149637

Par conséquent, dans le contexte du débat, ce sont les victimes, principalement les membres d'équipage, qui doivent apporter les preuves établissant un lien de causalité direct entre leurs symptômes et leurs conditions de travail, comme par exemple l'exposition à un ou plusieurs *fume event* et *smoke event*. La preuve de cette relation et de son impact direct s'avère complexe pour plusieurs raisons.

Le flottement scientifique et médical entourant le syndrome aérotoxique complique la tâche des experts et des juristes, car le lien exclusif entre les *fume events* et les pathologies rapportées ne peut être établi qu'avec un certain degré de certitude – une exigence imposée par le système judiciaire pour ouvrir la voie aux indemnisations.

Le terme de « charge » ou de « fardeau » illustrent la difficulté que le droit de la preuve fait peser sur le demandeur. Ainsi, on trouve, dans le dictionnaire en ligne Le Robert, les définitions suivantes :

« Fardeau : 1. Chose pesante qu'il faut lever ou transporter. 2. au figuré Chose pénible (qu'il faut supporter)

Charge : II.2 Ce qui met dans la nécessité de faire des frais, des dépenses »³²

Ces deux notions – le poids symbolique qui pèse sur le demandeur, risquant d'entraîner la perte du procès (on utilise d'ailleurs le terme 'succomber' en droit) – et celle désignant le coût financier et psychologique, sont les raisons pour laquelle les syndicats, comme la CFDT, et diverses associations de victimes, notamment l'Association des Victimes du Syndrome Aérotoxique (AVSA) en France, se mobilisent pour alléger cette charge de preuve pesant sur les plaignants, en plaidant pour une inversion accusatoire, où il reviendrait aux compagnies aériennes de prouver que l'air de cabine est sans danger.

La reconnaissance de lien de causalité d'un point de vue global est rendue d'autant plus difficile car elle ouvre à de nouvelles zones d'ombres et controverses sur les définitions qu'elle englobe. Les preuves, recensements et statistiques autour du symptôme sont difficiles à obtenir étant donné le manque de clarté et manque d'homogénéisation des définitions de «fume event», «smoke event», impossibilité de mesure de qualité de l'air, incertitudes et variations sur les seuils de toxicité dangereuses (jugés inadaptés par la sphère scientifique). Les méthodologies de mesure et d'évaluation des seuils de toxicité n'étant pas encore pleinement établies ni standardisées. Les sous composants du syndrome aérotoxique ouvrent donc à de nouvelles controverses, rendant complexe l'établissement de preuves et inutilisable la plupart d'entre elles par manque d'uniformisation de normes et seuils. Tout cela aboutit à une situation de conflit de preuves où les opposants et les soutiens au syndrome aérotoxique présentent l'un contre l'autre leurs preuves. Stephen E. Mawdsley, dans son article Burden of Proof: The Debate Surrounding Aerotoxic Syndrome³³ liste les arguments de ces groupes, figurant dans le Tableau 2.

32 « charge - Définitions, synonymes, prononciation, exemples », Dico en ligne Le Robert, consulté le 20 janvier 2025, <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/charge>.

« fardeau - Définitions, synonymes, prononciation, exemples », Dico en ligne Le Robert, consulté le 20 janvier 2025, <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/fardeau>. « charge - Définitions, synonymes, prononciation, exemples »; « fardeau - Définitions, synonymes, prononciation, exemples ».

33 S. E. Mawdsley, « Burden of Proof: The Debate Surrounding Aerotoxic Syndrome », *Journal of Contemporary History*, vol. 57, n° 4, Art. n° 4, oct. 2022, doi: 10.1177/00220094221074819.

Arguments en faveur	Arguments en opposition (Industriels)
Les pilotes témoignent de la manière dont les fume events ont affectés leur santé.	Les avancées constantes en sécurité économiques prouvent l'engagement puissant des industriels envers la santé des voyageurs
Usage des fiches techniques et des rapports de technologie pour comprendre les effets du lubrifiant brûlé	Il n'y a pas de preuves scientifiques indépendantes montrant que les personnes se disant rendues malades, le sont à cause des fumées
Peu de scientifiques sont prêts à mettre en péril leur carrière en menant des études pouvant détourner des partenaires industriels ou risquant de recevoir peu de financements externes	Remise en cause des méthodes et de la précision des échantillons récoltés par les chercheurs
	Remise en cause de la fréquence des fume events
	Certains fournisseurs de lubrifiant pour propulseur ont témoigné qu'ils ne posaient pas de danger

Tableau 2 Résumé des arguments (*The Burden of Proof*)³⁴

La notion même de ce qu'est une preuve suffisante est à définir. Toujours dans *The Burden of Proof*, on trouve : « Le seuil de preuves nécessaires pour qualifier la démonstration de rigoureuse a augmenté depuis les années 2000 ». Cette difficulté à fournir des preuves jugées suffisantes est soulignée par les organismes publics. En 2019, l'ANSES a recommandé de mener des études exhaustives pour évaluer la toxicité des fume events : une étude à ce propos est en cours de réalisation. Les acteurs engagés, comprenant des chercheurs en toxicologie, des juristes, des syndicats, et des membres d'équipage, s'accordent sur la nécessité d'établir un cadre de preuve plus clair afin de garantir des conditions de travail sécurisées, mais le défi réside dans l'élaboration de preuves suffisamment robustes pour que les tribunaux puissent rendre des jugements éclairés.

Ainsi, cette reconnaissance de lien de causalité d'un point de vue global est rendue d'autant plus difficile car elle ouvre à de nouvelles zones d'ombres et controverses sur les définitions qu'elle englobe. Les preuves, recensements et statistiques autour du symptôme sont difficiles à obtenir étant donné le manque de clarté et manque d'homogénéisation des définitions de "fume event", "smoke event", impossibilité de mesure de qualité de l'air, incertitudes et variations sur les seuils de toxicité dangereuses (jugés inadaptés par la sphère scientifique). Les méthodologies de mesure et d'évaluation des seuils de toxicité n'étant pas encore pleinement établies ni standardisées. Les sous composants du syndrome aérotoxique ouvrent donc à de nouvelles controverses, rendant complexe l'établissement de preuves et inutilisable la plupart d'entre elles par manque d'uniformisation de normes et seuils.

Ce délai pour obtenir des preuves scientifiques crée un décalage par rapport à l'urgence d'agir sur le plan juridique, sanitaire et en termes de prise de responsabilité. Le syndrome aérotoxique est un cas d'école qui illustre

34 Stephen E. Mawdsley, « Burden of Proof: The Debate Surrounding Aerotoxic Syndrome », *Journal of Contemporary History* 57, no 4 (1 octobre 2022): 959-74, <https://doi.org/10.1177/00220094221074819>.
Le Résumé en lui-même : Groupe de travail "Syndrome aérotoxique" (2024), Mines Paris – PSL

la difficulté de concilier le temps long de la recherche scientifique avec l'immédiateté des enjeux de santé publique et des attentes sociétales.

En résumé, en addition aux zones d'ombres scientifiques s'ajoutent les nombreuses zones d'ombre médicales. De la pertinence de la dénomination de « syndrome » à la preuve épistémologique, le problème de reconnaissance de lien de causalité se heurte à nouveau à un manque crucial d'information, d'étude de cas et de cadre pour identifier l'origine des symptômes rapportés. Le conflit de qualification et quantification scientifique impacte et résonne avec les conflits d'identifications clinique. Pour chaque nouvelle sphère du débat concerné s'ajoute une couche de difficulté, de zone d'ombre et de controverse, rendant inévitablement la reconnaissance de ce syndrome comme maladie d'origine professionnelle complexe.

■ La quête de la reconnaissance du syndrome comme maladie professionnelle : quels effets juridiques ?

Le cœur du débat pour les victimes touchées et le personnel navigant à risque réside dans leur volonté de faire reconnaître le syndrome aérotoxique comme une maladie professionnelle. Cependant, les multiples difficultés liées à sa qualification scientifique et médicale rendent sa reconnaissance juridique d'autant plus délicate. S'ouvre ainsi un nouveau débat : le syndrome aérotoxique soulève inévitablement des enjeux juridiques, mais aussi politiques et sociaux. En effet, un problème sanitaire globalisé ne peut être traité au cas par cas, surtout lorsqu'il concerne toute une branche de la société et du monde du travail. Les conséquences d'une telle reconnaissance seraient considérables, tant pour l'ensemble du personnel navigant et les voyageurs que pour les compagnies aériennes et les constructeurs aéronautiques. Avant d'envisager une reconnaissance générale, il est essentiel de comprendre les mécanismes d'une reconnaissance individuelle ainsi que le cadre normatif actuel qui régit – tant bien que mal – la santé et la sécurité en vol.

■ Le pouvoir contraignant des normes

Le pouvoir contraignant des normes est un problème dans la reconnaissance du syndrome aérotoxique comme maladie professionnelle. Les réglementations en vigueur, notamment celles définies par la DGAC (Direction générale de l'aviation civile), ont des lacunes qui empêchent la reconnaissance du syndrome aérotoxique.

Tout d'abord, les normes sur les tests et la surveillance de la qualité de l'air ne sont pas clairement définies par les instances de réglementation. Les tests peuvent être réalisés au sol et en vol, et dans des conditions de contamination ou dans des conditions normales. Or, les conditions de contamination des systèmes bleed air sont difficiles à simuler. À la suite des rapports de l'EASA, un projet de recherche a été conçu sur financement de la Commission européenne pour approfondir l'identification des causes et effets possibles des événements de contamination de l'air de la cabine en lien avec l'alimentation en air (bleed air - cf. partie 5.4.1). Il s'agit du projet FACTS (European Commission 2020a) qui a fait l'objet de plusieurs rapports publiés en 2020³⁵. Ce projet met en évidence la présence de contaminants chimiques. Différents composés gazeux et particulaires ont été mesurés dans l'air des cabines : particules, PUF, carbone suie (Black carbon – BC), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), polychlorobiphényles (PCB), organophosphates, composés organiques volatils (COV) et le paramètre COV Totaux (COVT), composés carbonylés, dioxines/furanes, monoxyde de carbone (CO), dioxyde de carbone (CO₂), ozone (O₃), lors d'un test en vol, avec simulation d'un incident de contamination du bleed air. Cependant, le rapport souligne que ce dispositif expérimental n'est pas une réplique parfaite des événements de contamination en conditions réelles de vol.

Most in-flight measurement campaigns differ in terms of experimental design, analytical approach and the statistical presentation of results. This also makes comparisons difficult. Analytical standardisation processes are needed in order to harmonise the monitoring of air quality.³⁶

De la même manière, le rapport de l'ANSES rejette les conclusions des études visant à simuler les événements de contamination de l'air de cabine, car les conditions expérimentales sont trop éloignées des conditions réelles.

³⁵ EASA. (2024, 26 septembre). "FACTS - Toxicity of contaminated aircraft cabin air". Disponible sur <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/research-reports/facts-about-cabin-air-quality-board-large-transport-aircraft>

³⁶ EASA. (2024, 26 septembre). "FACTS - Toxicity of contaminated aircraft cabin air". Disponible sur <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/research-reports/facts-about-cabin-air-quality-board-large-transport-aircraft>

Des études visant à provoquer des épisodes de contamination de bleed air lors de vols expérimentaux mettent en évidence une augmentation de la concentration de certains polluants (particules, aldéhydes, acides organiques, et TCP) dans l'air des cabines. Toutefois, ces résultats ne permettent pas de présager de l'impact de tels événements sur la qualité de l'air du fait de conditions expérimentales non transposables aux conditions réelles.³⁷

Quant aux études réalisées en conditions réelles, les mesures de la composition de l'air des cabines ne permettent pas d'attribuer la présence de contaminants gazeux ou particulaires à un événement de contamination de l'air de cabine. L'hypothèse d'une contamination du bleed air par des huiles de moteur ou du fluide hydraulique est difficile à vérifier, tant le nombre de sources des contaminants gazeux ou particulaires est grand, et leur identification est difficile. Le rapport distingue trois études réalisées en conditions réelles et au moment d'événements de contamination d'air de cabine. Mais ces études en vol sur les "fume events" montrent des résultats peu concluants : soit les concentrations mesurées sont similaires aux vols normaux, soit les pics de pollution détectés, même associés à une odeur d'huile moteur, n'ont pas permis d'identifier la nature et l'origine précise des contaminants

"Néanmoins, cette hypothèse [de contamination du *bleed air* comme source des polluants dans l'air de cabine] n'est pas encore réellement objectivée. Seules 3 études rapportent des mesures de polluants effectuées lors de vols au cours desquels des « fume events » ont été rapportés mais les résultats ne permettent pas de caractériser ces événements : soit les concentrations rapportées ne sont pas différentes des vols sans événement rapporté, soit les pics de particules enregistrés bien qu'associés à une odeur d'huile moteur ne permettent pas d'identifier la nature des polluants ni leur origine"³⁸

Face à ces problèmes, le corps scientifique a conclu à l'urgence d'établir certaines normes, à la fois médicale et réglementaires, pour mieux favoriser la collecte de données sur les contaminations d'air en cabines d'avion, et poursuivre les recherches scientifiques sur les effets de ces incidents sur la santé.

"Over 3.5 billion passengers and 0.5 million aircrew were exposed to low levels of engine oils in 2015 (34–36). There is an obvious need for a clearly defined internationally recognized medical protocol, occupational syndrome and disease recognition, and health and environmental data collection."³⁹

Cependant, la mise en place de normes est aujourd'hui complexe, tant au niveau des constructeurs que des compagnies aériennes. Le Comité Européen de Normalisation (CEN) a publié le projet de norme prEN17436 "Qualité de l'air en cabine des aéronefs civils - Composés chimiques", qui constitue une référence mondiale sur

³⁷ ANSES, « Avis de l'ANSES - Rapport d'expertise collective - Effets sur la santé liés à la profession de personnels navigants et sur la qualité de l'air dans les cabines d'avions », octobre 2023.

³⁸ ANSES, « Avis de l'ANSES - Rapport d'expertise collective - Effets sur la santé liés à la profession de personnels navigants et sur la qualité de l'air dans les cabines d'avions », octobre 2023.

³⁹ S. Michaelis, J. Burdon, C. V. Howard, et W. H. O. R. O. for Europe, « Aerotoxic syndrome: a new occupational disease? », Public health panorama, vol. 03, n° 02, Art. n° 02, 2017.

la gestion de la contamination de l'air dans les avions. Ce projet recommande la mise en place de systèmes de surveillance de l'air en cabine, afin de mieux détecter les événements de contamination avant et pendant le vol. Il établit également des protocoles d'actions préventives et réactives lors d'incidents de contamination de l'air.

“Airline manufacturers shall install, and airline operators shall operate and maintain, air monitoring equipment intended to identify the presence of at least the following contaminant sources: engine oil, hydraulic fluid, engine exhaust/fuel, and de-icing fluid. When available technology allows, the monitoring data shall also distinguish between these contaminant sources. The monitoring requirements in Clause 7 also apply to maintenance organizations, where applicable.”⁴⁰

Or, ces mesures de surveillance et procédures d'action ne sont pas encore normalisées à travers les acteurs industriels. En effet, le rapport "Anatomy of an occupational hazard: Cabin air contamination in the air transportation industry - Part 2. Root cause" de J.M. Lind, CPCU ARM (USA), souligne une absence de standardisation des mesures de sécurité, malgré la reconnaissance des risques de contamination. Selon le rapport, un problème particulièrement critique concerne la responsabilité de la sécurité, notamment en ce qui concerne la contamination de l'air en cabine. La situation actuelle révèle un vide organisationnel problématique : si des professionnels de la sécurité au sol étaient encore employés par les compagnies aériennes, ils entreraient en conflit de compétence avec le domaine d'expertise des pilotes. Cependant, en l'absence de ces professionnels, personne ne prend véritablement en charge la responsabilité de la contamination de l'air en cabine. Cette zone grise dans l'attribution des responsabilités crée un risque significatif pour la sécurité et la santé des passagers et de l'équipage, sans qu'une entité clairement désignée ne soit chargée de sa gestion et de sa surveillance.

“If ground safety professionals were still employed by the airlines, they would be imposing themselves upon the domain of the pilot. Today, no one is taking responsibility for cabin air contamination.”⁴¹

Il existe actuellement un manque de réglementation claire définissant les méthodes de test et de surveillance de la qualité de l'air en cabine. Bien que l'air de cabine présente des concentrations en composants chimiques non négligeables, celles-ci restent généralement inférieures aux seuils réglementaires. Par ailleurs, les événements de contamination du bleed air ne font pas l'objet d'études suffisamment approfondies. Les protocoles d'étude s'avèrent difficilement applicables aux conditions réelles (simulations d'incidents de contamination, tests au sol, tests en vol, etc.). De plus, les études menées en conditions réelles sont à la fois rares et peu concluantes. L'ANSES, l'EASA et les constructeurs d'avions recommandent aux compagnies aériennes de mettre en place des dispositifs plus performants pour la surveillance et la gestion des incidents de contamination de l'air de cabine. Toutefois, l'adoption généralisée de ces changements dans le secteur de l'aviation commerciale nécessitera l'établissement d'une réglementation contraignante.

“Je veux revenir sur un document, une définition factuelle du fume event à ma connaissance c'est la seule elle figure dans la circulaire 344 de l'OACI et la définition que donne l'OACI fume event est tout simplement toute émanation et toute odeur et ils ont une définition au sens large et à ma connaissance, c'est la seule définition officielle qui existe néanmoins comme je vous l'ai expliqué auparavant l'OACI ne peut émettre que des recommandations et donc ne peut prétendre à aucune

⁴⁰ European Technical Committee, « prEN 17436: Cabin air quality on civil aircraft - Chemical compounds [Draft]. »

⁴¹ J. M. Lind, « Anatomy of an occupational hazard: Cabin air contamination in the air transportation industry Part 2. Root cause », JBPC, vol. 23, n° 1, p. 20-24, mars 2023, doi: 10.4024/17LI22A.jbpc.23.01.

mesure contraignante. L'OACI demande avec la circulaire 344 qu'on informe les équipages, qu'on les entraîne et qu'on répertorie tous les événements feu, fumée, odeur. Sauf que bien évidemment, ils ont commencé à donner des formations, dans les formations qu'ont les équipages, c'est-à-dire les pilotes et le personnel navigant commercial. Ils ont mis des pseudo-odeurs qui n'ont pas forcément les odeurs que l'on a à rebord. Ils en parlent vite fait et vont plus s'étendre sur un feu d'iPad ou un feu de batterie lithium à bord, ça peut être dramatique, tellement c'est fort et puissant. Mais par contre, ils survolent vite le fume event et voilà, donc moi, mes arrivées dans des stages, je me présente. Et certains formateurs, un peu plus ouverts que les autres, fermaient la porte, ils disaient "Bah nan, explique-nous ce que c'est parce qu'on aimerait bien savoir, voilà". Donc c'est vraiment un sujet tabou, et voilà, et là, les gens, plus forcés de constater que bien souvent, sont au courant de plus en plus, surtout avec les fréquences de vols qui ont augmenté, au niveau des équipages. On a des cadences assez infernales, donc il y a de plus en plus de fume events."⁴²

■ La reconnaissance individuelle

Ensuite, ce syndrome revêt un enjeu politique et social majeur, notamment concernant sa requalification comme maladie professionnelle, un statut qui garantirait une meilleure prise en charge pour les membres d'équipage exposés et ouvrirait la voie à des indemnités. Une telle décision aurait de nombreuses conséquences sur le secteur aérien, qui devrait s'adapter afin de garantir des conditions de travail prévenant l'apparition de la maladie.

Depuis les premiers cas documentés dans les années 1970, les syndicats et associations de victimes, comme la CFDT et l'association des victimes du syndrome aérotoxique créée en 2016, militent activement pour que les symptômes imputés aux *fume events* soient reconnus comme résultant d'un environnement de travail dangereux. Cette reconnaissance permettrait d'obtenir des compensations financières et des protections légales pour les personnes affectées. En 2019, la CFDT a saisi l'ANSES pour demander une étude détaillée, conduisant à la publication d'un rapport qui, bien que ne confirmant pas définitivement la toxicité des substances inhalées, recommande des mesures de précaution pour limiter les expositions.

La mobilisation politique s'est renforcée en 2023 avec un rapport d'expertise juridique produit au tribunal de Nice, une visibilité accrue de l'affaire dans l'arène médiatique et une plainte pour « mise en danger de la vie d'autrui » déposée par un commandant de bord. Ces actions mettent en lumière l'inquiétude croissante autour de la santé des professionnels de l'aviation et accentuent la pression exercée sur les organes de régulation, le monde politique et les acteurs. Cependant, les compagnies aériennes et industriels de l'aviation rejettent souvent les effets des *fume events* et nient le caractère nécessairement toxique du syndrome. Ils s'opposent à une réglementation stricte qui imposerait des modifications coûteuses, comme l'abandon ou l'adaptation du système *bleed air* d'aération des avions et la recherche de filtres de nanoparticules adaptés, tant que des "preuves scientifiques" ne seront pas apportées.

La reconnaissance du syndrome aérotoxique en tant que maladie professionnelle serait un tournant historique. Il aurait automatiquement de vastes conséquences quant à la responsabilité des pouvoirs publics (pourquoi l'ANSES se serait-elle saisie du problème douze ans après son alter ego britannique ?), aux frais d'indemnisation, à la capacité de la France à changer des normes européennes de sécurité et d'homologation des appareils. L'impact économique sur l'ensemble du secteur serait majeur.

⁴² Entretien avec un ancien pilote de la compagnie Air France se considérant victime du syndrome aérotoxique, le 13 novembre 2024

■ Reconnaissance d'une maladie comme maladie professionnelle nationale

Comme nous l'avons vu précédemment, la différence fondamentale entre les termes « syndrome » et « maladie » porte sur le degré de connaissance de la cause des symptômes composant le syndrome. Cette question du degré de certitude est profondément ancrée dans le débat autour de l'existence ou non du syndrome aérotoxique, et de sa qualification.

De même qu'il y a une différence sémantique entre les termes « syndrome » et « maladie », les notions de « maladie » et de « maladies professionnelles » doivent aussi être distinguées. Le site [service-public.fr](https://www.service-public.fr) indique, sur sa page « Qu'est-ce qu'une maladie professionnelle »⁴³ :

« Une maladie peut être considérée comme professionnelle lorsqu'elle est contractée du fait de votre travail. La maladie peut être d'origine professionnelle qu'elle figure ou non au tableau des maladies professionnelles [...]. »

Les règles précises applicables peuvent être retrouvées dans le code de la sécurité sociale :

« Article L461-1 : Les dispositions du présent livre sont applicables aux maladies d'origine professionnelle sous réserve des dispositions du présent titre. [...] Est présumée d'origine professionnelle toute maladie désignée dans un tableau de maladies professionnelles et contractée dans les conditions mentionnées à ce tableau.

Si une ou plusieurs conditions tenant au délai de prise en charge, à la durée d'exposition ou à la liste limitative des travaux ne sont pas remplies, la maladie telle qu'elle est désignée dans un tableau de maladies professionnelles peut être reconnue d'origine professionnelle lorsqu'il est établi qu'elle est directement causée par le travail habituel de la victime.

Peut être également reconnue d'origine professionnelle une maladie caractérisée non désignée dans un tableau de maladies professionnelles lorsqu'il est établi qu'elle est essentiellement et directement causée par le travail habituel de la victime et qu'elle entraîne le décès de celle-ci ou une incapacité permanente d'un taux évalué dans les conditions mentionnées à l'article L. 434-2 et au moins égal à un pourcentage déterminé. [...] »⁴⁴

« Article R461-8 : Le taux d'incapacité mentionné au septième alinéa de l'article L. 461-1 est fixé à 25 %. »⁴⁵

Il y a donc deux possibilités pour faire reconnaître une maladie professionnelle dans le droit français :

- L'utilisation des tableaux des maladies professionnelles
- Une maladie **essentiellement et directement causée** par le travail habituel, et ayant entraîné un certain dommage.

Le « syndrome aérotoxique » n'est pas reconnu comme une maladie. Il ne figure donc pas au tableau. Les victimes présumées doivent donc suivre le deuxième processus et prouver, entre autres, que leur maladie est essentiellement et directement causée par le travail habituel.

43« Qu'est-ce qu'une maladie professionnelle ? », consulté le 18 janvier 2025, <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F31880>.

44« Article L461-1 - Code de la sécurité sociale - Légifrance », consulté le 18 janvier 2025, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000036393217.

45« Article R461-8 - Code de la sécurité sociale - Légifrance », consulté le 18 janvier 2025, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000038423415.

Si à l'avenir le « syndrome aérotoxique » devenait « maladie » aérotoxique, et était ajouté au tableau des maladies professionnelles, alors la procédure, pour les victimes, consisteraient à montrer qu'elles auraient la maladie décrite dans les conditions des autres colonnes. Un médecin du travail résume le fonctionnement du tableau :

« En France, une maladie professionnelle, c'est comme accident du travail, c'est extrêmement bien défini, les maladies professionnelles en France, c'est à peu près un peu plus de 100-110 tableaux dans lesquels on a la première colonne, on a la première colonne qui dit de quelle maladie on parle, la deuxième colonne, jusqu'à combien de temps, après la fin de l'exposition, on peut quand même avoir la maladie. La troisième colonne qui dit quels sur les travaux peuvent provoquer cette maladie, ça c'est le fonctionnement du tableau de maladie professionnelle [...] si vous réunissez les 3 conditions que je viens d'indiquer, vous avez une maladie professionnelle, peu importe que vous ayez une autre raison d'avoir [cette maladie professionnelle]. C'est ce qu'on appelle le principe de présomption d'imputabilité, ça date de 1920, on a fait ça de façon à ce qu'il n'y ait plus de discussions infinies »⁴⁶

À noter qu'ajouter une maladie dans le tableau des maladies professionnelles nécessitent une procédure particulière incluant l'accord des partenaires sociaux :

« C'est au niveau national, il y a une commission supérieure des risques professionnels qui a une sous-commission maladie professionnelle et c'est une discussion entre partenaires sociaux, syndicats d'un côté, patronat de l'autre et au milieu quelques experts plus l'administration, la direction générale du travail. La DGT met par-dessus tous les accords entre partenaires sociaux. Si des deux côtés de la table tout le monde est d'accord il n'y a pas d'histoire, le tableau va être publié. S'il y a une partie qui dit je veux absolument et l'autre qui dit je ne veux surtout pas, alors là ça traîne, parfois très longtemps [...]. Le rythme moyen, c'est max une tous les deux trois ans »⁴⁷

⁴⁶ Entretien avec un médecin du travail, 14 novembre 2024

⁴⁷ Entretien avec un médecin du travail, 14 novembre 2024

■ Conclusion

Le syndrome aérotoxique est une controverse s'inscrivant dans un temps long. Débutant dans les années 1950 avec les techniques de construction de l'aviation civile, elle a gagné en importance avec des témoignages de personnels navigant et avec les questions liées à la preuve, tant dans le domaine scientifique que dans le domaine juridique. Pour conclure, nous allons récapituler un par un les nœuds de la controverse :

Les origines de la controverse remontent aux années 1950, lors du développement du système « bleed-air ». Avant tout un gain technologique important dans l'industrie aéronautique qui a permis le développement de l'aviation civile, le développement du système bleed-air est aussi lié à l'apparition d'incidents d'émanation de fumées. Ce système, qui capte l'air extérieur via les compresseurs moteurs, présente une efficacité énergétique notable mais peut exposer les passagers et l'équipage à des risques de contamination de l'air par des nanoparticules d'huile moteur, potentiellement toxiques. Ces incidents, parfois visibles sous forme de fumée, ont conduit à des rapports de symptômes neurologiques et respiratoires, bien que la dangerosité exacte des produits chimiques impliqués reste floue. Le terme « syndrome aérotoxique », apparu dans les années 1990, souligne une préoccupation croissante pour la santé des équipages, même si la communauté scientifique reste prudente dans sa qualification du phénomène. L'absence de mesures en temps réel et les difficultés à quantifier précisément les incidents complexifient l'évaluation du risque, laissant subsister des incertitudes quant à l'impact réel sur la santé.

Certains incidents d'émanation ont entraîné des plaintes du personnel navigant. La controverse s'est alors cristallisée autour de la notion de preuve, en particulier dans un premier autour des preuves scientifiques. En effet, ce débat se heurte à des difficultés liées à l'absence de preuves scientifiques définitives, empêchant la promotion du « syndrome » aérotoxique vers une « maladie » aérotoxique avec une cause reconnue. Concernant les symptômes caractérisant le syndrome, ils touchent principalement les systèmes respiratoires et neurologiques, et sont assez variés, allant de la fatigue à des troubles neurologiques et respiratoires. Cependant leur nature peut spécifique complique l'établissement d'un lien direct avec l'exposition aux fume events, en particulier dans un environnement comme celui des cabines d'avion (exposition aux rayonnements cosmiques et altération du cycle nyctéméral). Des études, comme celles de Susan Michaelis, mettent en lumière des effets cohérents parmi les pilotes exposés, mais le manque de protocoles médicaux standardisés entrave la validation de ces observations. La toxicologie, en tant que discipline complexe et pluridisciplinaire, n'a pas encore permis de déterminer des seuils de toxicité précis pour les cocktails de composés chimiques tels que les TCP, ce qui rend encore plus difficile l'établissement d'une causalité directe. La charge de la preuve repose sur les victimes, ce qui complique leur quête de reconnaissance juridique et sanitaire. Les divergences entre les preuves apportées par les partisans du syndrome et les contre-arguments des industriels montrent l'importance d'un cadre de preuve clair. Ce contexte illustre la difficulté de concilier les besoins immédiats de santé publique avec les exigences de la recherche scientifique et la rigueur du droit.

La question de la reconnaissance du syndrome aérotoxique comme maladie professionnelle est le dernier axe d'opposition que nous avons traité. Cette reconnaissance se voit d'abord compliquée par les normes définies par les agences de science réglementaire, telle que la DGAC. Les seuils manquant de précision à ou ne prenant pas en compte l'effet cocktail ne permettent pas aux victimes présumées de s'appuyer sur la science réglementaire pour défendre leurs demandes. La reconnaissance officielle du syndrome permettrait d'améliorer la prise en charge des équipages et de leur offrir des indemnités, mais elle est confrontée à une opposition des compagnies aériennes, qui pour leur part soulignent que le syndrome n'est pas de leur fait, et que les mesures techniques de prévention et de mesure d'exposition seraient sans fondements scientifiques solides. Enfin, le passage d'un syndrome aérotoxique à une maladie professionnelle aérotoxique nécessiterait des discussions entre les partenaires sociaux et résulteraient en l'application de la présomption d'imputabilité du demandeur à l'égard de la compagnie.

En conclusion, le syndrome aérotoxique est un sujet qui illustre bien la complexité spatiale et temporelle de la notion de preuve. Du point de vue spatial, les éléments qui semblent le plus objectifs sont les plus débattus : quoi mesurer, comment, avec quels seuils, dans quel contexte ? Les questions autour du syndrome aérotoxique

montrent aussi l'importance de la composante temporelle : initialement il s'agissait de preuves scientifiques et médicales, puis des preuves juridiques. C'est l'entremêlement de ces composantes qui créent une situation subtile rendant d'autant plus difficile la résolution de la controverse.

■ Matériel et méthodes

Le présent travail résulte tout d'abord d'une analyse de la presse nationale et internationale, depuis les années 2000, au sujet du syndrome aérotoxique. La base de données Europresse a été consultée au moyen de la requête suivante "aerotoxic syndrome" | "syndrome aérotoxique" | "air cabin syndrome" | "maladie du cockpit". Nous obtenons un total de 1000 articles de presse, entre 1953 et 2024 inclus. Nous réalisons une analyse sémantique du corpus avec le logiciel Cortext et une analyse du glissement sémantique du terme "syndrome aérotoxique". Nous utilisons un modèle LLM pour classer les articles selon ces quatre catégories. Ces quatre catégories sont les suivantes : 1. Les articles qui traitent de problèmes de respiration lié au vol, dont le syndrome aérotoxique, mais pas du Covid-19. 2. Les articles qui traitent de problèmes de respiration lié au vol, mais spécifiquement du Covid-19. 3. Les articles qui traitent de problèmes de santé non-respiratoires liés au vol. 3. Les articles qui ne portent pas sur des problèmes de santé. Cette classification s'applique à un échantillon du corpus pour lequel les filtres manuels ne sont pas assez puissants (environ 500 articles) et coûte environ une heure et 5 euros.

Notre étude bibliographique a été complétée par un corpus scientifique construit à partir des bases de données Scopus et Web of Science, en exploitant des descripteurs tels que le titre, le résumé et les mots-clés pour identifier des articles pertinents. La requête utilisée est la suivante : " (air AND cabin AND syndrome) OR (aerotoxic AND syndrome) OR (aircraft AND cabin AND air AND quality) OR (in-flight AND air AND contamination) OR (fume AND events AND in AND aircraft) OR (organophosphate AND exposure AND in AND aviation) OR (tricresyl AND phosphate AND tcp AND in AND aircraft) OR (neurological AND effects AND of AND cabin AND air) OR (bleed AND air AND contamination)". Cette sélection a permis de réaliser une première analyse quantitative, incluant des indicateurs tels que le nombre de publications par année, les auteurs principaux, les disciplines concernées et les sponsors identifiés. Par la suite, une analyse de cooccurrence des mots a été menée à l'aide de l'outil Cortex, ce qui a permis de générer un graphe mettant en lumière plusieurs clusters thématiques. Ces clusters révèlent les principaux nœuds ou acteurs liés aux enjeux de la controverse étudiée, contribuant à une compréhension approfondie des dynamiques en jeu.

Ce travail initial a permis l'élaboration de grilles de questions adressées à quatre acteurs de la controverse analysée, au cours d'entretiens semi-directifs. Les témoignages de ces acteurs, qui occupent tous des fonctions différentes, ont été retranscrits puis analysés, et des extraits pertinents ont été exploités dans ce document. Nous avons eu l'occasion d'échanger avec :

- Des membres de l'AVSA (4 intervenants) ;
- Des membres de la CFDT ;
- Un ancien pilote ;
- Un médecin du travail ;

Il convient toutefois de souligner que notre enquête a été effectuée dans un laps de temps assez restreint - trois mois - et que le corpus de témoignages aurait gagné à être enrichi. Nous regrettons par exemple l'absence de témoignages d'acteurs impliqués dans les cercles juridiques. Nous avons également sollicité des entretiens auprès de spécialistes de la régulation (ANSES), mais nos demandes sont restées sans réponse à ce jour.

Références

Articles de presse généraliste / presse professionnelle

Sorel, Guillaume. « AÉROTOXICITÉ ». SNPNC-FO (blog), 22 novembre 2016. <https://snpnc.org/aerotoxicite/>.

Tabet M. (2016, 16 octobre), "Pilotes de ligne, la maladie des cockpits", Journal du Dimanche. Disponible sur : <https://www.lejdd.fr/Societe/Pilotes-de-ligne-la-maladie-des-cockpits-817468>.

Article de revue scientifique

Howard, C. Vyvyan, David W. Johnson, John Morton, Susan Michaelis, David Supplee, et Jonathan Burdon. « Is a Cumulative Exposure to a Background Aerosol of Nanoparticles Part of the Causal Mechanism of Aerotoxic Syndrome? » *Nanomedicine and Nanoscience Research*, 7 février 2018. <https://www.gavinpublishers.com/article/view/is-a-cumulative-exposure-to-a-background-aerosol-of-nanoparticles-part-of-the-causal-mechanism-of-aerotoxic-syndrome>.

Lind, J.M. « Anatomy of an Occupational Hazard: Cabin Air Contamination in the Air Transportation Industry Part 2. Root Cause ». *Journal of Biological Physics and Chemistry* 23, no 1 (30 mars 2023): 20-24. <https://doi.org/10.4024/17LI22A.jbpc.23.01>.

Mawdsley, Stephen E. « Burden of Proof: The Debate Surrounding Aerotoxic Syndrome ». *Journal of Contemporary History* 57, no 4 (1 octobre 2022): 959-74. <https://doi.org/10.1177/00220094221074819>.

Megson, David, Saeed Hajimirzaee, Aidan Doyle, Frank Cannon, et Jean-Christophe Balouet. « Investigating the potential for transisomerisation of trycresyl phosphate with a palladium catalyst and its implications for aircraft cabin air quality ». *Chemosphere* 215 (1 janvier 2019): 532-34. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.082>.

Michaelis, Susan, Jonathan Burdon, C. Vyvyan Howard, et World Health Organization Regional Office for Europe. « Aerotoxic Syndrome: A New Occupational Disease? » *Public Health Panorama* 03, no 02 (2017): 198-211.

Rapports

ANSES, « Avis de l'ANSES - Rapport d'expertise collective - Effets sur la santé liés à la profession de personnels navigants et sur la qualité de l'air dans les cabines d'avions », octobre 2023.

EASA. « FACTS – Toxicity of Contaminated Aircraft Cabin Air - Facts about Cabin Air Quality on-Board Large Transport Aircraft | EASA », 26 septembre 2024. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/research-reports/facts-about-cabin-air-quality-board-large-transport-aircraft>.

European Technical Committee. « CEN. (2023). prEN 17436: Cabin air quality on civil aircraft - Chemical compounds [Draft]. », 2023.

ATC, Picot, André, Jean Ducret, et Stéphane Pasqualini. « CONNAISSEZ-VOUS LE SYNDROME AÉROTOXIQUE ? » 1^{ère} édition, 18 juin 2018.

Textes de Droit (lois, décrets, ...)

« Article 9 - Code de procédure civile - Légifrance ». Consulté le 20 janvier 2025. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000006410102.

« Article L461-1 - Code de la sécurité sociale - Légifrance ». Consulté le 18 janvier 2025. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000036393217.

« Article R461-8 - Code de la sécurité sociale - Légifrance ». Consulté le 18 janvier 2025. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000038423415.

Définitions

Académie de Médecine, « Maladie - Dictionnaire médical de l'Académie de Médecine », 2020. <https://www.academie-medecine.fr/le-dictionnaire/index.php?q=maladie>.

Académie de Médecine, « Symptôme - Dictionnaire médical de l'Académie de Médecine », 2020. <https://www.academie-medecine.fr/le-dictionnaire/index.php?q=sympt%C3%B4me>.

Académie de Médecine, « Syndrome - Dictionnaire médical de l'Académie de Médecine », 2020. <https://www.academie-medecine.fr/le-dictionnaire/index.php?q=syndrome>.

Dico en ligne Le Robert. « charge - Définitions, synonymes, prononciation, exemples ». Consulté le 20 janvier 2025. <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/charge>.

Dico en ligne Le Robert. « fardeau - Définitions, synonymes, prononciation, exemples ». Consulté le 20 janvier 2025. <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/fardeau>.

Dico en ligne Le Robert. « toxique - Définitions, synonymes, prononciation, exemples ». Consulté le 20 janvier 2025. <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/toxique>.

■ Films (documentaire, fiction, ...)

Envoyé Spécial. « Envoyé spécial. [Fume event] L'air des avions est-il toxique ? - 26 avril 2018 (France2) - YouTube ». Consulté le 19 décembre 2024. <https://www.youtube.com/watch?v=koEGB2U22xE>.

■ Images, photographies, tableaux et graphiques

Illustration de la page de garde : Image générée par OpenAI ChatGPT, « Génère une image d'un avion en vol, avec une vue du dessus », générée le dimanche 19 janvier 2025

Airbus. « Flight Operations Recommendations », mai 2019. <https://www.airbus-win.com/wp-content/uploads/2019/06/managing-smoke-and-fumes-in-flight.pdf>.

Dahl, Jeff et Berrucommons. « Jet engine French.svg ». Jet engine French.svg. Wikipedia, 16 décembre 2017. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jet_engine.svg.

Force Ouvrière. « Bleed Air FO ». Le syndrome aérotoxique serait-il lié à la politique outrancière de rentabilité menée par l'aviation civile ? Le syndrome aérotoxique serait-il lié à la politique outrancière de rentabilité menée par l'aviation civile ?, 8 novembre 2017. https://www.force-ouvriere.fr/local/adapt-img/960/20x/IMG/jpg/sans_titre-2-18.jpg?1694196786.

Groupe de travail "Syndrome aérotoxique" (2024), "Chronologie du Syndrome Aérotoxique". Mines Paris – PSL

Groupe de travail "Syndrome aérotoxique" (2024), "Fonctionnement du bleed-air". Mines Paris – PSL

Groupe de travail "Syndrome aérotoxique" (2024), "Glissement sémantique". Mines Paris – PSL

Groupe de travail "Syndrome aérotoxique" (2024), "Histogramme de l'occurrence des termes". Mines Paris – PSL

Groupe de travail "Syndrome aérotoxique" (2024), "Résumé des arguments (The Burden of Proof)". Mines Paris – PSL

■ Autres

« Charge de la preuve (droit) — Wikipédia ». Consulté le 20 janvier 2025. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Charge_de_la_preuve_\(droit\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Charge_de_la_preuve_(droit)).

« Qu'est-ce qu'une maladie professionnelle ? » Consulté le 18 janvier 2025. <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F31880>.

■ Entretiens

Des membres de l'AVSA (4 intervenants). Entretiens réalisés les 31 Octobre et 13 Novembre;

Des membres de la CFDT. Entretien réalisé le 13 Novembre ;

Un ancien pilote. Entretien réalisé le 13 Novembre ;

Un médecin du travail. Entretien réalisé le 14 Novembre ;